

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Stanovení nejistoty měření

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2015/2016

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

Jméno a příjmení: **Adam NEHONSKÝ**
Osobní číslo: **E12B0461P**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Stanovení nejistoty měření**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Popište jakým způsobem se počítají nejistoty měřidel.
2. Seznamte se s činností měřících přijímačů rušení.
3. Spočtete nejistoty měření těchto přijímačů v různých provozních režimech.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Technická norma ČSN EN 55016-4-2.
2. Svačina: Encyklopedie elektromagnetické kompatibility.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Miroslav Hromádka, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2015**

Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2016**


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




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá postupem pro vyhodnocování standardních nejistot typu A, B a udává postup výpočtu kombinované a rozšířené nejistoty. Dále jsou popsány chyby měření, jejich rozdělení a parametry. Součástí práce je popis a klasifikace měřících přijímačů rušení. Hlavním přínosem práce je popis postupu výpočtu nejistot pro kombinaci vybraného měřícího přijímače rušení s různými typy snímačů rušivých signálů.

Klíčová slova

Nejistota, chyba, měření, přijímače rušení, rušivé signály, snímače.

Abstract

This bachelor's thesis deals with description of evaluation of Type A and Type B uncertainty. Evaluation of combined standard uncertainty and expanded uncertainty is also presented. Observational errors, their classification and parameters are discussed. The thesis also deals with classification of devices for interference measurement. Main focus is on the evaluation of uncertainty using selected receiver with combination of various types of interference sensors.

Key words

Uncertainty, error, measurement, measuring receiver, interfering signals, sensors.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 25.5.2016

Adam Nehonský

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Miroslavu Hromádkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych rád poděkoval doc. Ing. Evě Müllerové, Ph.D.

Obsah

| | |
|--|-----------|
| OBSAH | 8 |
| SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK | 9 |
| ÚVOD | 11 |
| 1 CHYBY MĚŘENÍ | 12 |
| 1.1 ZAOKROUHLOVÁNÍ A ZÁPIS VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ | 14 |
| 2 NEJISTOTY MĚŘENÍ | 15 |
| 2.1 ROZDĚLENÍ NEJISTOT MĚŘENÍ | 15 |
| 2.1.1 <i>Hodnocení standardní nejistoty způsobem A</i> | 15 |
| 2.1.2 <i>Hodnocení standardní nejistoty způsobem B</i> | 17 |
| 2.1.3 <i>Určení kombinované standardní nejistoty</i> | 18 |
| 2.1.4 <i>Určení rozšířené nejistoty</i> | 19 |
| 3 MĚŘENÍ RUŠIVÝCH SIGNÁLŮ | 20 |
| 3.1 DRUHY SNÍMAČŮ | 22 |
| 3.1.1 <i>Měření s umělou sítí</i> | 22 |
| 3.1.2 <i>Měření s napěťovou sondou</i> | 25 |
| 3.1.3 <i>Měření s proudovou sondou</i> | 27 |
| 3.1.4 <i>Měření pomocí antén</i> | 29 |
| 3.2 PŘÍSTOJE PRO MĚŘENÍ RUŠENÍ..... | 32 |
| 4 URČENÍ NEJISTOTY PRO RŮZNÉ TYPY KOMBINACÍ MĚŘICÍHO PŘIJÍMAČE A SNÍMAČŮ RUŠIVÝCH SIGNÁLŮ | 37 |
| 4.1 POUŽITÉ TYPY SNÍMAČŮ RUŠIVÝCH SIGNÁLŮ A MĚŘICÍHO PŘIJÍMAČE..... | 37 |
| 4.2 KOMBINACE SNÍMAČŮ RUŠIVÝCH SIGNÁLŮ A MĚŘICÍHO PŘIJÍMAČE..... | 41 |
| 4.3 KRITÉRIA VYHOVĚNÍ PRO NEJISTOTU MĚŘICÍ KOMBINACE | 43 |
| 4.4 VYHODNOCENÍ MĚŘICÍCH KOMBINACÍ ZDA SPLŮJÍ KRITÉRIA | 45 |
| ZÁVĚR | 47 |
| SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ | 48 |

Seznam symbolů a zkratek

| | |
|-----------------------|---|
| A | Atenuátor |
| AAN | Asymmetric artificial network (Asymetrická umělá síť) |
| AK | Absorpční kleště |
| AMN | Artificial Mains Network (Umělá síť) |
| AV | Average detector (Průměrující detektor) |
| C | Kapacita |
| CP | Current probe (Proudová sonda) |
| CVP | Capacitive voltage probe (Kapacitní napěťová sonda) |
| D | Detektor |
| EA | European accreditation (Evropská spolupráce v oblasti akreditace) |
| EMC | Electromagnetic Compatibility (Elektromagnetická kompatibilita) |
| EMI | Electromagnetic Interference (Elektromagnetické rušení) |
| F | Filtr |
| FAR | Fully anechoic room (Plně bezodrazová komora) |
| G | Kalibrační generátor |
| I | Indikátor |
| L | Indukčnost |
| LISN | Line Impedance Stabilizing Network (Umělá zátěž vedení) |
| MO | Místní oscilátor |
| MR | Měřič rušení |
| OATS | Open area test site (Zkušební pracoviště ve venkovním prostoru) |
| P | Peak detector (Špičkový detektor) |
| PS | Proudová sonda |
| QP | Quasi – Peak detector (Kvazi – špičkový detektor) |
| R | Elektrický odpor |
| SAC | Semi – anechoic chamber (Částečně bezodrazová komora) |
| SM | Směšovač |
| VP | Voltage probe (Napěťová sonda) |
| Z | Zesilovač |
| ZO | Zkoušený objekt |
| u_A | Nejistota typu A |
| $\sigma^2(X_i)$ | Rozptyl základního souboru |

| | |
|-----------------------|---|
| $\sigma(X_i)$ | Směrodatná odchylka základního souboru |
| $s^2(X_i)$ | Odhad rozptylu náhodného výběru označovaný jako výběrový rozptyl |
| $s(X_i)$ | Výběrová směrodatná odchylka náhodného výběru |
| $s(\bar{X})$ | Výběrová směrodatná odchylka výběrových průměrů (standartní nejistota typu A) |
| n | Počet naměřených hodnot |
| \bar{X} | Aritmetický průměr z naměřených hodnot |
| ks | Koeficient, jehož hodnota závisí na počtu měření |
| X_i | Jednotlivé naměřené hodnoty |
| s | Směrodatná odchylka z opakovaných naměřených hodnot |
| u_B | Nejistota typu B |
| U | Rozšířená nejistota |
| k_r | Koeficient rozšíření zdroje nejistoty |
| Z_{MAX} | Maximální odchylka od zdroje nejistoty |
| χ | Koeficient statistického rozdělení |
| u_c | Kombinovaná nejistota |
| k_u | Koeficient rozšíření |
| a_p, a_a, a_s | Přesnost |
| u_p, u_a, u_s | Nejistota kalibrace |
| u_0 | Nespecifikovaná nejistota |
| U_{lab} | Rozšířená nejistota měření způsobená přístrojovým vybavením |
| U_{cisprr} | Kritérium CISPR pro rozšířenou nejistotu měření vyhodnocenou v normě pro každou měřící metodu |
| I_r | Rušivý proud |
| U_r | Rušivé napětí |
| P_r | Rušivý výkon |
| E_r | Intenzita rušivého elektrického pole |
| H_r | Intenzita rušivého magnetického pole |
| u_{mf} | Mezifrekvenční napětí |
| U_p | Maximální hodnota napětí |
| I | Elektrický proud |
| P | Pravděpodobnost |
| AF | Anténní faktor |

Úvod

Bakalářská práce je rozdělena na dvě části. První část se zabývá stanovením nejistoty měření a druhá část měřícími přijímači rušení.

Cílem této práce je vysvětlit problematiku nejistot měření, které jsou v dnešní době velice důležité pro přesná měření a metrologii a nahrazují tak chyby měření. V první části jsou uvedeny nejistoty měření typu A a B, kde každý typ zahrnuje jiné vlivy, které negativně ovlivňují měření. V práci je uvedena i kombinovaná nejistota, která vznikne sloučením obou typů nejistot a rozšířená nejistota, která vznikne vynásobením kombinované nejistoty koeficientem rozšíření.

Dále jsou provedeny výpočty nejistot pro kombinace měřícího přijímače s různými druhy snímačů, které se porovnávají s maximální povolenou hodnotou určenou podle normy ČSN EN 55016-4-2. ed. 2.

V druhé části se práce zaměřuje na měřící přijímače rušení, kde jsou popsány jednotlivé snímače rušivých signálů, jako je umělá síť, napěťová a proudová sonda a měřící antény.

1 Chyby měření

Chyby měření se využívaly dříve k určení odchylky mezi naměřenou a skutečnou hodnotou měřené veličiny, kvůli vzniku nepřesnosti způsobené negativními vlivy, které se při měření vyskytují. Dnes jsou tyto chyby měření nahrazeny komplexnější metodou nejistot měření. Postup nejistot měření tedy vychází ze starší metody.[4]

Rozdělení chyb podle příčiny vzniku:

a) Chyby metody

Jedná se o systematické chyby, které lze ve většině případů odstranit korekcí. Jsou způsobené např. volbou postupu měření, provedením zapojení, atd. Jsou to chyby, které vznikají vzájemným působením měřícího přístroje a měřeného obvodu. Takže pokud je přístroj připojen do obvodu, bude zařazen jako další rezistor, cívka, nebo kondenzátor (podle charakteru přístroje). Každý přístroj odebírá část energie z měřeného signálu.[10]

b) Chyby měřících přístrojů

Tyto chyby jsou způsobeny vlastnostmi měřících přístrojů, nedokonalostí výroby a vlivem okolí. Chyby se dělí na základní a přídavné. **Základní chyba** je dána součtem všech rušivých vlivů, které při měření působí na měřící přístroj. Pro praktickou potřebu byla zvolena a normována charakteristika nazývaná třídou přesnosti, která zahrnuje všechny dílčí rušivé vlivy a určuje mezní relativní chybu v celém měřícím rozsahu přístroje při dodržení pokynů a podmínek udaných výrobcem (vlhkost, teplota, tlak, cizí elektromagnetické pole, poloha, druh měřených veličin, apod.). Při nedodržení těchto podmínek dochází k **přídavným chybám**, které mohou být až několikanásobně větší než chyby základní.[10][11]

c) Chyby členů měřícího obvodu

Jsou způsobeny nepřesnostmi vyrovnání a kalibrace etalonů (napětí, odporu, kapacity).[10]

d) Chyby způsobené rušivými vlivy

Chyby způsobené rušivým napětím, odpory vodičů, kapacitními a induktivními vazbami apod.[10]

e) Chyby čtení

Chyby zapříčiněny lidským faktorem (nesprávná volba měřící metody, chybné zapojení přístrojů do obvodu, nevhodná volba měřícího rozsahu, chybné čtení údajů měřícího přístroje).[10][11]

f) Celkové chyby měření

Výsledek většího počtu chyb. [10]

Rozdělení chyb podle zdrojů:**a) Objektivní**

Chyby zapříčiněné chybou metody, chybou měřícího přístroje, tolerancí součástek, rušivými vlivy.

b) Subjektivní

Chyby zapříčiněné obsluhou.[10]

Rozdělení chyb podle charakteru výskytu:**a) Hrubé chyby**

Chyba může být zapříčiněna například chybným zapsáním výsledku, selháním měřící techniky, nesprávným nastavením podmínek měření apod. Tyto chyby se označují také jako vybočující, nebo odlehlé z důvodu, že při opakovaném měření tuto chybu lze odhalit odlišností od ostatních hodnot a musí být z měření odstraněna, aby nedošlo ke zkreslení výsledku.[4]

b) Systematické chyby

Systematická chyba je součástí měřené hodnoty a při opakovaném měření zůstává neměnná (časem se i tato chyba může měnit z důvodu stárnutí měřícího přístroje apod.). Pokud je známá příčina chyby (systematického vlivu), může být kvantifikována a pokud její působení významně ovlivňuje výsledek, lze provést korekci ke kompenzaci tohoto vlivu. Po korekci lze očekávat, že hodnota chyby způsobena systematickým vlivem bude nulová.[1][4]

c) Náhodné chyby

Náhodná chyba vzniká z nepředvídatelných, náhodně dočasných a prostorových kolísání ovlivňujících veličinu. Tuto chybu nelze kompenzovat, ale lze ji snížit pomocí většího počtu měření za stejných podmínek. Minimální počet těchto měření je 5 – 10 a maximální počet ovlivňuje čas, náklady apod. (většinou více než sté opakování, už výrazně nezpřesňuje výsledek).[1][4]

Rozdělení chyb podle matematického vyjádření:

a) Relativní chyba měření

Relativní chyba se vypočte jako podíl absolutní chyby a skutečné hodnoty. Tato chyba je bezrozměrná, nebo po vynásobení stem se chyba udává v procentech. Při hodnocení kvality měření je tato chyba používaná častěji.[5]

b) Absolutní chyba měření

Absolutní chyba je rozdíl mezi naměřenou hodnotou a skutečnou (pravou) hodnotou.[5]

1.1 Zaokrouhlování a zápis výsledků měření

Při získání údajů z měřicích přístrojů, nebo pomocí výpočtů může nastat situace, kdy výsledná číselná hodnota má jiný počet desetinných míst než je přesnost měření. Proto se musí tento výsledek zaokrouhlit včetně jeho chybového intervalu, protože výsledná hodnota je ve tvaru: $I = 2,35 \text{ mA} \pm 0,65 \text{ mA}$ ($P = 95 \%$), tedy že nejpravděpodobnější odhad pravé hodnoty je 2,35 mA a kolem této hodnoty se v intervalu $\pm 0,65 \text{ mA}$ nachází pravá hodnota s pravděpodobností 95 %. Pro relativní vyjádření variability lze použít tento zápis: $I = 2,35 \text{ mA} \pm 28 \%$ ($P = 95 \%$).

Chyba se kvůli nepřesnosti zaokrouhluje na jednu platnou cifru, pouze v případě, že první cifrou je číslice 1, nebo 2 se tato chyba zaokrouhluje na dvě platné cifry. Za platné cifry se označují všechny cifry kromě nul vlevo od první nenulové cifry (např. číslo 0,0170 má tři platné cifry). Nula na konci tohoto čísla udává přesnost na desetitisíciny a vynecháním této nuly by byla přesnost snížena desetkrát. Číslo 17 000 má pět platných cifer, při převedení na tři platné cifry by bylo ve tvaru $1,70 * 10^4$. Výsledná hodnota je pak zaokrouhlena na tolik míst, kolik má zaokrouhlená chyba. Pro konečný zápis se často využívá exponenciálního tvaru (např. číslo 23442 ± 679 se zaokrouhlí na $(234 \pm 7) * 10^2$). Při zaokrouhlování podle hodnoty výrazu za poslední cifrou platí, že je-li větší než pět, zaokrouhluje se nahoru, je-li menší, tak dolů. Pokud je výraz roven pěti a předchozí cifra je lichá zaokrouhluje se nahoru, pokud sudá, tak dolů. Při nedostatku počtu platných cifer podle řádu chyby se musí k hodnotě přidat nuly.[4][5][9]

2 Nejistoty měření

Tento údaj je spojen s výsledkem měření, kde charakterizuje rozptýlení hodnot, které mohou být důvodně přiřazeny měřené veličině. Jde tedy o interval, kde se nachází skutečná hodnota měřené veličiny s určitou pravděpodobností. Nejistota měření závisí jak na přesnosti měřících přístrojů, tak i na zvolené metodě měření a na náhodných jevech. Nejistoty jsou rozlišeny na typ A a typ B.[1] [6]

2.1 Rozdělení nejistot měření

2.1.1 Hodnocení standardní nejistoty způsobem A

Většinou jsou způsobeny náhodnými chybami. Nejistota tohoto typu vychází ze statistické metody z naměřených dat, kde je důležité, aby nezávislá opakování měření proběhla za stejných podmínek. Je-li n nezávislých pozorování provedeno za stejných podmínek, je odhad výsledné hodnoty prezentován hodnotou výběrového aritmetického průměru \bar{X} . Základem pro vyhodnocování nejistoty typu A je rozptyl a jeho odmocnina – směrodatná odchylka. Při počtu deseti naměřených hodnot lze přímo vypočítat nejistotu typu A. Ta se vypočte jako směrodatná odchylka výběrového průměru. V případě, že je provedeno méně než deset měření a je tedy nemožné získat spolehlivý odhad rozptylu, je zaveden koeficient k_s (tab. 1.). V případě, že data pocházejí z normálního rozdělení, platí rovnice (2.1.1.7). Hodnota nejistoty typu A u_A , klesá s počtem měření. [4] [6][9][10]

| | | | | | | | | | |
|------------------------------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|
| Počet měření | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 |
| Koeficient k_s | 1 | 1,2 | 1,2 | 1,3 | 1,3 | 1,4 | 1,7 | 2,3 | 7 |

tab. 1. Hodnoty rozšiřujícího koeficientu. [4]

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (2.1.1.1)$$

\bar{X} Aritmetický průměr z naměřených hodnot

n Počet naměřených hodnot

X_i Jednotlivé naměřené hodnoty

Rozptyl základního souboru:

$$\sigma^2(X_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (2.1.1.2)$$

Směrodatná odchylka základního souboru:

$$\sigma(X_i) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (2.1.1.3)$$

Odhad rozptylu náhodného výběru označovaný jako výběrový rozptyl:

$$s^2(X_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (2.1.1.4)$$

Výběrová směrodatná odchylka náhodného výběru:

$$s(X_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (2.1.1.5)$$

Výběrová směrodatná odchylka výběrových průměrů = standardní nejistota typu A u_A :

$$u_A = s(\bar{X}) = \sqrt{\frac{s^2(X_i)}{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (2.1.1.6)$$

s Směrodatná odchylka z opakovaných naměřených hodnot

u_A Nejistota typu A

$$u_A = k_s \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2.1.1.7)$$

k_s Koeficient, jehož hodnota závisí na počtu měření

2.1.2 Hodnocení standardní nejistoty způsobem B

Základem určování nejistoty typu B je určení nejistot od dílčích zdrojů. Nejistota typu B nemá náhodný charakter a stanovení se provede z charakteru měření, bez statistického výpočtu. Je to metoda podobná systematickým chybám, ale může být použita i pro odhad vlivu náhodné chyby. Pro odhad nejistoty se vychází z racionální úvahy (vlastností měřících přístrojů, zkušeností z předchozích experimentů, informací z kalibračních certifikátů, katalogových listů, manuálů apod.)

Tato nejistota zahrnuje nedokonalosti něčím způsobené (vlivem operátora, měřících přístrojů, podmínkami při měření, technikou, metodami, konstantami apod.).

Při určení této nejistoty je důležité odhadnout maximální rozsah odchylek od naměřené hodnoty a dosáhnout tak toho, že zde bude ležet skutečná hodnota. Pokud je v měřícím řetězci více těchto nejistot, tak se nejistota určí pomocí geometrického součtu, každé jednotlivé části řetězce a ten dá výslednou nejistotu.[4] [6][10]

Obecný postup při odhadování nejistot:

1. Určení všech zdrojů nejistot.
2. Určení jejich stálé (referenční) hodnoty.
3. Určení variabilní složky zdroje (její meze, symetrie).
4. Posouzení statistického rozdělení pravděpodobnosti.
5. Výpočet přírůstku u_{bi} k celkové nejistotě každého i -tého zdroje.
6. Stanovení celkové nejistoty typu B.[9]

Způsoby jak vypočítat nejistoty typu B:

- a) Nejistoty typu B lze dohledat v informacích od výrobce a v kalibračním certifikátu, kde je uvedena rozšířená nejistota U a koeficientu k_r a z těchto hodnot podle rovnice (2.1.2.1) dopočítat nejistotu typu B.[6]

$$u_B = \frac{U}{k_r} \quad (2.1.2.1)$$

u_B Nejistota typu B

U Rozšířená nejistota

k_r Koeficient rozšíření zdroje nejistoty

- b) Odhad nejistoty typu B na základě variability známého zdroje. Vzorec (2.1.2.2) je vyjádřením výpočtu směrodatné odchylky jinou než statistickou cestou. Z_{MAX} popisuje známé rozpětí zdroje nejistoty a χ slouží k přepočtu na směrodatnou odchylku příslušného rozdělení. [9]

$$u_B = \frac{Z_{MAX}}{\chi} \quad (2.1.2.2)$$

Z_{MAX} ... Maximální odchylka od zdroje nejistoty

χ Koeficient statistického rozdělení

Koeficient statistického rozdělení nabývá hodnoty pro normální rozdělení $\chi = 2$ až 3, pro rovnoměrné rozdělení $\chi = \sqrt{3}$, pro trojúhelníkové (Simpsonovo) $\chi = \sqrt{6}$, pro trojúhelníkové (Bimodální) $\chi = \sqrt{2}$ a pro Diracovo $\chi = 1$. [9]

2.1.3 Určení kombinované standardní nejistoty

Kombinovaná standardní nejistota udává interval, ve kterém se s pravděpodobností $P = 68,27\%$ vyskytuje skutečná hodnota a pokud je požadována větší pravděpodobnost výskytu, tak se musí zavést rozšířená standardní nejistota.

Kombinovaná nejistota se vypočte podle vztahu:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (2.1.3.1)$$

u_c ... Kombinovaná nejistota

Za situace, kdy je nejistota typu A výrazně větší než nejistota typu B, lze předpokládat, že v systému měření převládají náhodné vlivy a je důležité zaměřit se právě na ně. Pokud je situace opačná a převládá nejistota typu B, lze předpokládat, že je nevhodně navržen systém měření. [9]

2.1.4 Určení rozšířené nejistoty

Pomocí tohoto rozšíření se zvětší pravděpodobnost, že se v intervalu kolem naměřené hodnoty nalézá skutečná hodnota. Určíme je pomocí rovnice (2.1.4.1).[7]

$$U = k_u \cdot u_C \quad (2.1.4.1)$$

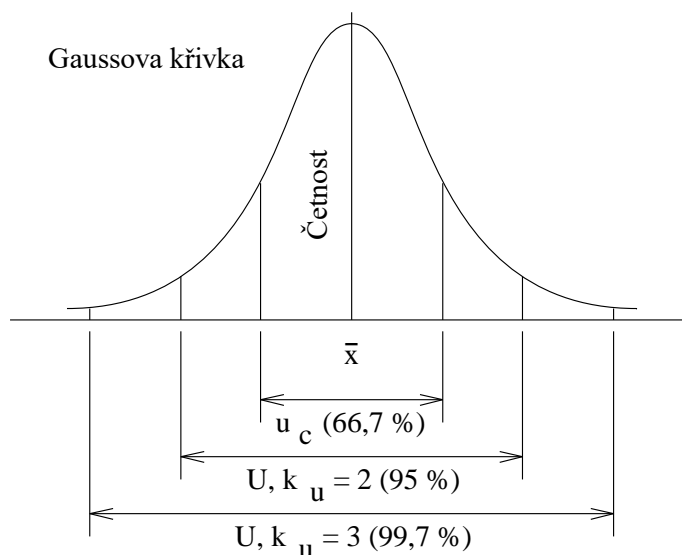
U Rozšířená nejistota

k_u Koeficient rozšíření

u_C Kombinovaná nejistota

Nejčastěji se používá **normální (Gaussovo) rozdělení** (obr. 1.), u kterého můžeme pomocí koeficientu rozšíření k_u zvyšovat nebo snižovat pravděpodobnost, že se v dané oblasti nachází skutečná hodnota. Toto rozdělení se volí, tam kde je daný model lineární pro vstupní veličiny a **platí alespoň jedna ze tří možností:**

1. Existuje jediný dominantní příspěvek k nejistotě, který vzniká z N – rozdělení a odpovídající stupně volnosti přesahují 30.
2. Tři největší příspěvky nejistoty mají srovnatelnou velikost.
3. Tři největší příspěvky a zároveň efektivní stupně volnosti přesahují 30.



Obr. 1. Gaussovo (normální) rozdělení.[7]

Pro normální rozdělení se koeficient pokrytí většinou volí $k_u = 2$, nebo 3. Pro trojúhelníkové - Simpsonovo rozdělení $\sqrt{6}$, pro rovnoměrné $\sqrt{3}$, $\sqrt{2}$ pro trojúhelníkové - bimodální a 1 pro bimodální (Diracovo).[7][8]

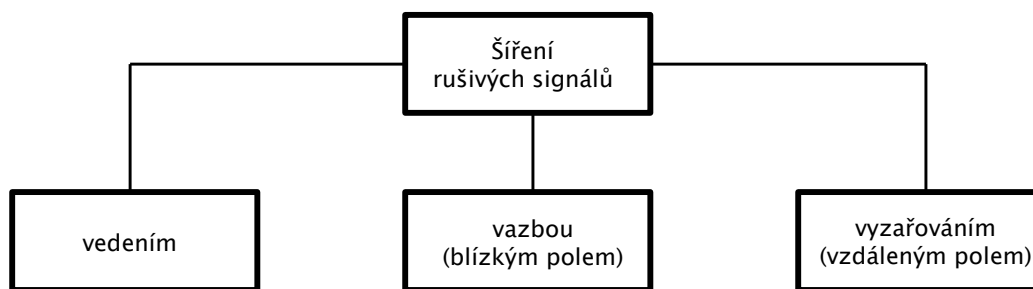
3 Měření rušivých signálů

Měření rušivých signálů slouží k vyhodnocení velikosti rušivého vyzařování testovaného zařízení, které je jednou z nejdůležitějších částí problematiky EMC. Jde o praktické ověření dosaženého stupně EMC. Kvůli nemožnosti dosažení absolutně dokonalé elektromagnetické kompatibility jakéhokoli zařízení, musí být pro daný typ zařízení stanoveno a měřením ověřeno dodržení maximálních přípustných hodnot rušivých signálů.[2]

Pro dosažení přesných a vzájemně porovnatelných výsledků měření je důležité dodržení instrukcí, které jsou uvedeny v mezinárodních, případně národních normách a dalších regulačních předpisech. Tyto normy popisují všechna měření EMC, jejich postupy, metody, podmínky, i použité měřicí přístroje, z důvodu různorodosti proměřovaných zařízení a různorodosti pracovních podmínek. [2]

Při měření EMC může být zdrojem a zároveň přijímačem rušivých signálů i samotný měřicí přístroj.[2]

Rušivé signály se šíří třemi způsoby:



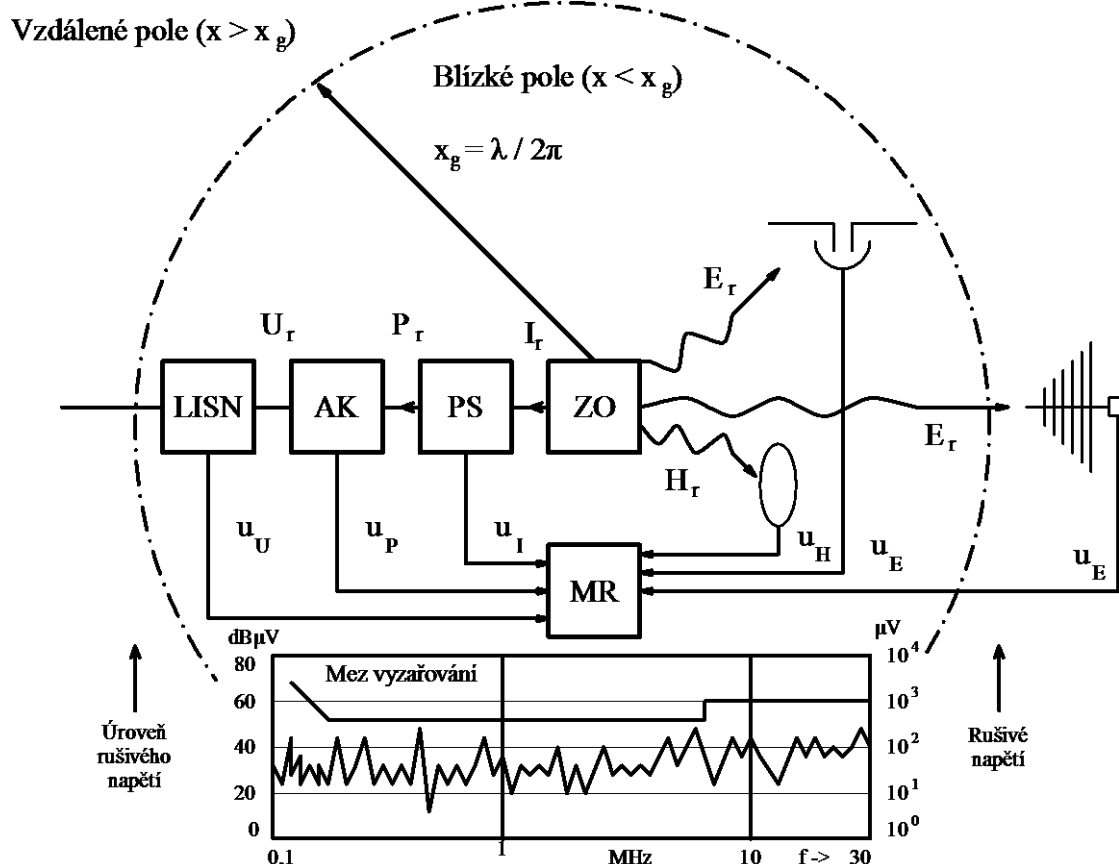
Obr. 2. Způsoby šíření rušivých elektromagnetických signálů.[2]

- 1) Přenos vedením (např. napájecím či datovým vedením daného zařízení). Elektromagnetické rušení zde charakterizují měřené veličiny rušivé napětí U_r , rušivý proud I_r , a rušivý výkon P_r signálu.
- 2) Přenos elektrickou či magnetickou vazbou (blízkým elektromagnetickým polem) mezi dvěma blízkými objekty či zařízeními. Intenzitou rušivého elektrického pole E_r , nebo intenzitou rušivého magnetického pole H_r , je zde charakterizována parazitní vazba.

- 3) Přenos vyzařováním elektromagnetických vln (vzdáleným elektromagnetickým polem) se uplatňuje především mezi vzdálenými objekty na vyšších rádiových kmitočtech. Intenzity elektrického pole E_r či magnetického pole H_r příp. hustota vyzářeného výkonu P_r rušivého signálu (velikost Poyntingova vektoru rušivého pole), jsou zde opět charakteristickými veličinami.

Na těchto třech způsobech šíření závisí postup měření rušivých signálů a volba vhodného měřicího zařízení.[2]

Veličiny představující rušivé elektromagnetické signály lze vzájemně převádět (přepočítávat), kdy je tento převod dán způsobem a zařízením, kterým danou veličinu měříme. Např. pro převod intenzity rušivých polí E_r či H_r pomocí měřících antén je získáno napětí U_r na jejich svorkách a převodními koeficienty jsou efektivní výška, efektivní plocha, příp. tzv. anténní faktor použité antény pro daný měřicí kmitočet či pásmo kmitočtů.[2]



Obr. 3. Přehled způsobů měření rušivých elektromagnetických signálů a příklad vyhodnocení výsledku měření LISN - umělá zátěž vedení, AK - absorpční kleště, PS - proudová sonda, ZO - zkoušený objekt (zdroj rušení), MR - měřič rušení. [2]

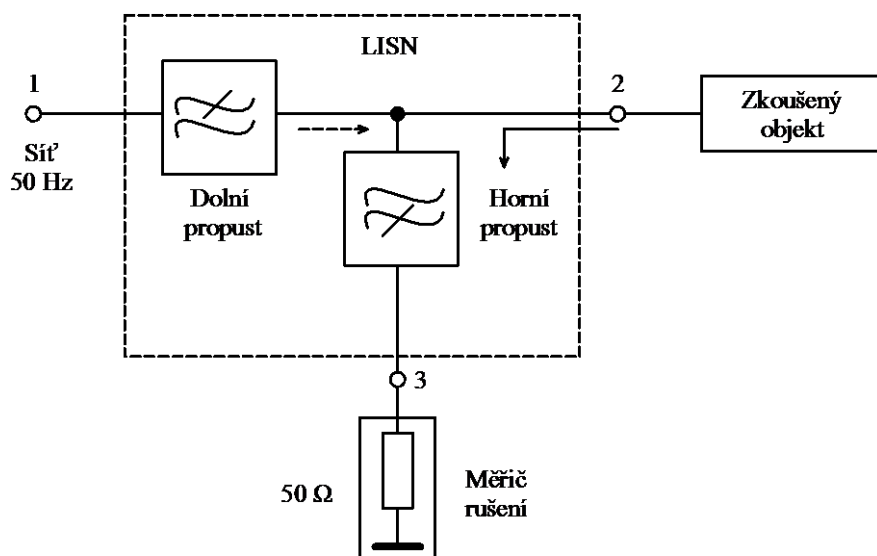
Pro hodnocení všech druhů elektromagnetických rušivých signálů se používá základní přístroj měřič rušení MR, což je selektivní μV – metr, spektrální analyzátor či speciální měřicí přijímač pro požadovaný rozsah měřicích kmitočtů obvykle od 9 kHz do 6 GHz. Měřená rušivá veličina (napětí U_r , proud I_r či výkon rušivého signálu P_r , případně intenzity rušivých polí E_r a H_r) je snímána vhodným snímačem senzorem, jímž je převedena na napětí. Toto napětí je následně měřeno měřičem rušení MR. **Klasické druhy snímačů v technice EMC jsou:** umělá síť, napěťová sonda, proudová sonda a absorpční kleště pro měření vedených rušivých signálů a různé typy měřicích antén pro měření vyzařovaných rušivých signálů. Pro předpoklad správného měření je u všech těchto způsobů důležité, aby měřicí zařízení reagovalo pouze na rušivé signály pocházející z vyšetřovaného zařízení (zkoušeného objektu ZO), tak aby nebylo ovlivněno jinými zdroji rušení a to přírodními ani umělými. Pro rušivé signály z měřicího či vyhodnocovacího zařízení platí, že musí být účinně potlačeny, nebo jinak respektovány a neovlivňovali tak správnost a reprodukovatelnost měřených údajů. Pro správné měření je tedy zapotřebí kvalitního přístrojového vybavení, zajištění správného uspořádání, prostorové řešení měřicího pracoviště a jeho nejbližšího okolí.[2]

3.1 Druhy snímačů

3.1.1 Měření s umělou sítí

Umělá síť AMN (Artificial Mains Network) se častěji označuje jako umělá zátěž vedení LISN (Line Impedance Stabilizing Network) a slouží k měření rušivých signálů. Tyto rušivé signály vznikají v zařízení napájeném z rozvodné elektrické sítě (v síťovém elektrickém spotřebiči) a z tohoto spotřebiče vystupují právě tímto napájecím vedením. Na blokovém schématu (obr. 4.) jsou označeny **tři druhy svorek:**

- 1) Vstupní síťové svorky 1 pro připojení vnější napájecí sítě.
- 2) Výstupní síťové svorky 2 pro připojení zkoušeného objektu.
- 3) Výstupní přístrojové svorky 3 pro připojení měřicího zařízení měřiče rušení.

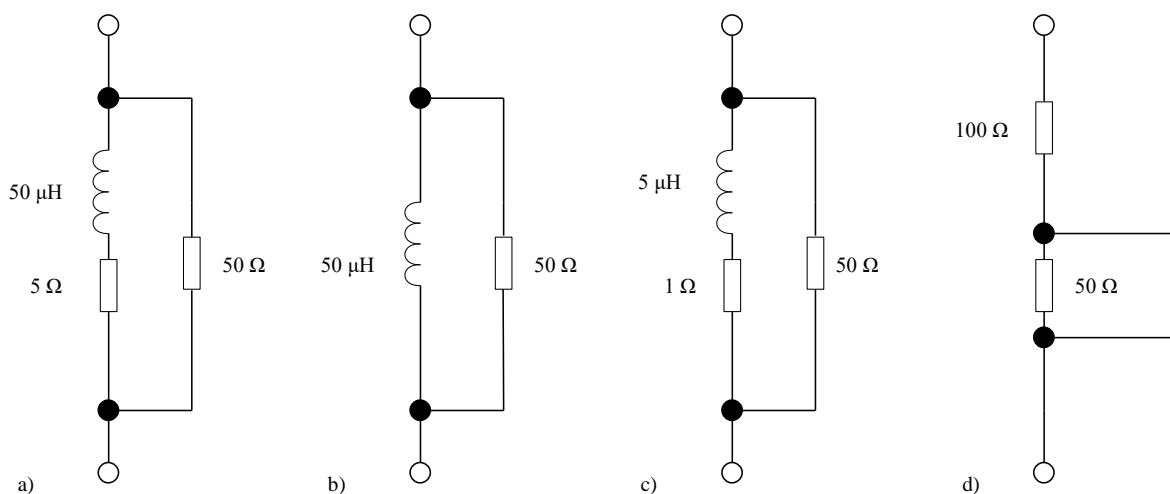


Obr. 4. Blokové schéma umělé sítě LISN.[2]

Umělá síť LISN zajišťuje tři funkce:

- 1) Zajišťuje připojení měřicího zařízení (měřiče rušení) k proměřovanému (zkoušenému) objektu pro celý rozsah měřených kmitočtů funkce horní propusti. Horní propust je často tvořena samotným oddělovacím kondenzátorem s hodnotou několika set nF.
- 2) Zajišťuje, že se na vstup měřicího zařízení nedostanou rušivé signály z vnější napájecí sítě (50 Hz), což je funkce dolní propusti a na vstupu měřicího zařízení budou rušivé signály ze zkoušeného objektu. Vnější rušivé signály se tak nedostanou ani k vlastnímu zkoumanému spotřebiči a neovlivňují tak výsledky měření. Útlum dolní propusti musí být v pracovním kmitočtovém pásmu nejméně 30 dB. Tato propust je většinou tvořena jediným článkem LC.
- 3) Zajišťuje impedanční přizpůsobení měřicího zařízení (měřicího přijímače) k výstupním přístrojovým svorkám 3 umělé sítě LISN a současně zajišťuje definovanou hodnotu impedance na jejích výstupních síťových svorkách 2. Impedance LISN ze strany horní propusti (na přístrojových výstupních svorkách 3) je tedy v celém pásmu přibližně rovna vstupní impedanci měřicího přijímače (obvykle 50Ω), impedance LISN ze strany zkoušeného objektu (na výstupních síťových svorkách 2) tzv. impedance umělé sítě simuluje impedanci příslušné napájecí sítě v daném pásmu kmitočtů. Protože tato impedance je obtížně definovatelná, předepisují příslušné normy její hodnotu pro určitá kmitočtová pásma a pro určité druhy vnější energetické napájecí sítě. Přehled

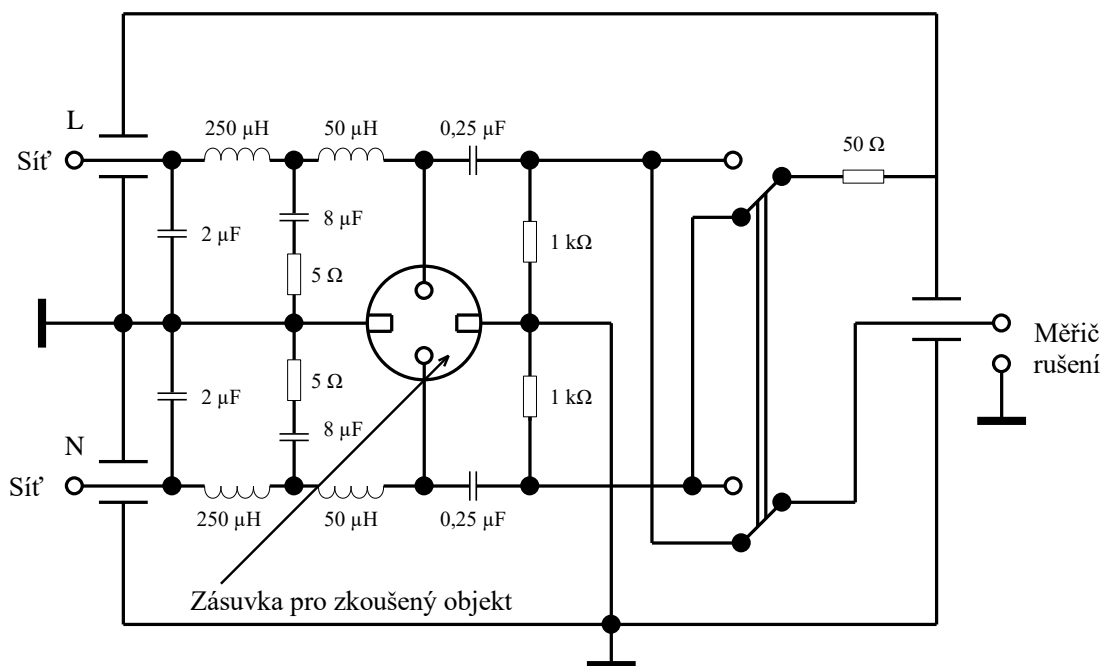
těchto impedancí dle normy ČSN EN 55016-1-1 ed. 2 je na obr. 5.[2]



Obr. 5. Impedance umělých sítí dle ČSN EN 55016-1-1 ed. 2: a) $50 \Omega / 50 \mu H + 5 \Omega$ pro 9 kHz až 30 MHz (nízkonapěťové sítě) b) $50 \Omega / 50 \mu H$ pro 0,15 až 30 MHz (průmyslové napájecí sítě) c) $50 \Omega / 5 \mu H + 1 \Omega$ pro 0,15 až 100 MHz (palubní napájecí sítě) d) 150Ω pro 150 kHz až 30 MHz (klasické napájecí sítě). [2]

Podle vnější napájecí sítě, ve které se předpokládá činnost zkoušeného zařízení se pro měření nasimuluje umělá síť, která má stejnou impedanci jako vnější napájecí síť.

Příklad konkrétní realizace jednofázové umělé sítě je uveden na obr. 6., určené pro kmitočtové pásmo 10 kHz – 30 MHz na napájecím vedení.



Obr. 6. Zapojení jednofázové umělé sítě. [2]

Standardní umělý operátor (umělá ruka) se používá při měření s LISN, kde simuluje vliv ruky u elektrických spotřebičů v místě dotyku. Obvod umělé ruky se skládá ze sériového spojení kondenzátoru s hodnotou $220 \text{ pF} \pm 20 \%$ a odporu s hodnotou $510 \Omega \pm 10 \%$. [2]

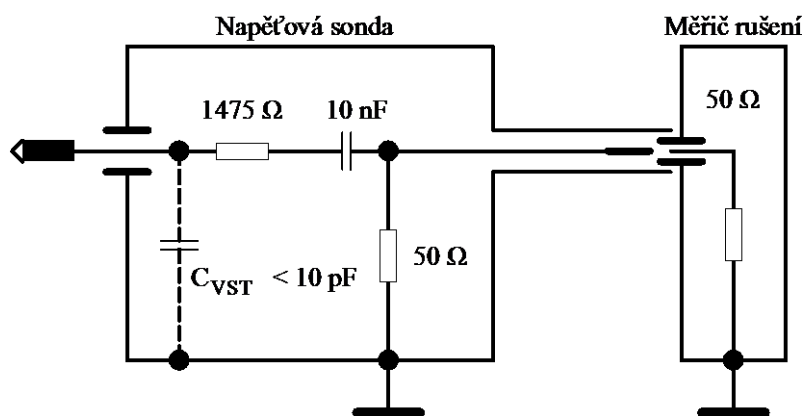
Správné uspořádání pracoviště je důležité z důvodu přesnosti, správnosti a reprodukovatelnosti měření. Podle mezinárodní normy CISPR 16-1-1 ed.2.0 jsou uvedeny pro měření s LISN v pásmu 10 kHz – 30 MHz tyto **požadavky**:

1. Zkoušený objekt ZO s umělou sítí LISN a měřičem rušení MR musí být umístěny na dřevěném stole, tak aby byly vzdáleny od nejbližšího okraje LISN 80 cm.
2. Sít'ová napájecí šňůra zkoušeného objektu nesmí být delší než 1 m, pokud je delší musí být meandrovitě složena a zároveň nesmí takto složený svazek být větší než 40 cm.
3. Zkoušený objekt musí pracovat ve svém standardním režimu a v sestavě uvedené jeho výrobcem v příslušném návodu k obsluze. Pokud má být zkoušený objekt z bezpečnostních důvodů uzemněn, musí být jeho zemnění připojeno ke vztažnému zemnicímu bodu umělé sítě. Jestliže zkoušené zařízení nemusí být uzemněno, musí být umístěno 40 cm od umělé země, kterou představuje svislá kovová deska o rozměru minimálně 2 x 2 m, která musí být vzdálena minimálně 80 cm od jiných kovových částí, které nejsou součástí měřeného vzorku.

Téměř stejné zásady platí i pro jiná měření vedených rušivých signálů, např. pomocí proudových a napět'ových sond. [2]

3.1.2 Měření s napět'ovou sondou

Měření rušivých napětí pomocí napět'ové sondy se používá tam, kde nelze použít umělou síť LISN, nebo na jiných místech než na napájecích svorkách zkoušeného objektu. Pomocí napět'ové sondy může být přímo připojen měřící přijímač do zadaného bodu zkoumaného zařízení. Toho se využívá hlavně při diagnostických měření EMC ve stádiu vývoje daného zařízení. Další výhodou napět'ové sondy je vysoká vstupní impedance, které se využívá při měření napětí ve vysokoimpedančních obvodech, jež by umělá síť kvůli své nízké impedanci nepřípustně zatěžovala. [2]



Obr. 7. Schéma zapojení napěťové sondy. [2]

Vstupní odpor sondy $> 1500 \Omega$, vstupní kapacita $< 10 \text{ pF}$, napěťové zeslabení 35,4 dB. Zemnicí konektor sondy musí být přímo spojen s referenční zemí zkoušeného zařízení nízkoimpedančním páskem. U napěťových sond je důležitým parametrem maximální velikost vstupního provozního napětí, na které může být připojena. Z toho vyplývá, že všechny součástky sond i její celková konstrukce včetně izolační pevnosti apod. musí být napěťově dimenzovány. Většina napěťových sond pro EMC jsou konstruovány pro maximální vstupní střídavé napětí 250 V. [2]

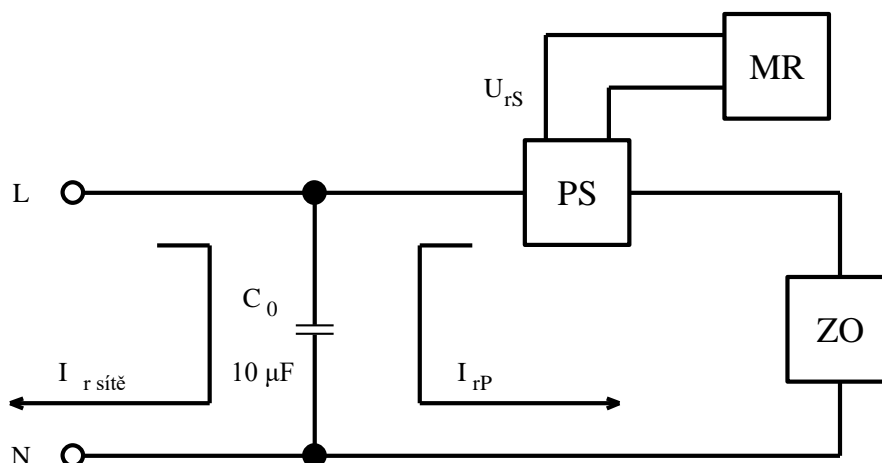
Z důvodu značného zeslabení a nevelkého vstupního odporu je sonda na obr. 7. pro měření rušivého napětí většího než asi 60 dB μV , a to v obvodech s relativně nízkou impedancí. Pokud jsou požadavky na měření malých rušivých napětí ve vysokofrekvenčních obvodech, tak musí být vstupní kapacita napěťové sondy $< 5 \text{ pF}$ a vstupní odpor $> 1 \text{ M}\Omega$. Těchto parametrů se dosáhne použitím aktivní napěťové sondy osazené na vstupu tranzistorem FET. Aktivní sondy mají zisk, nebo nepatrné zeslabení, šířku kmitočtového pásma 300 Hz i více, vstupní kapacitu 3 – 5 pF a velký vstupní odpor řádu 10 M Ω . [2]



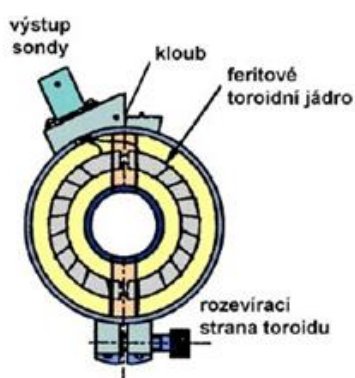
Obr. 8. Vnější vzhled napěťové sondy.

3.1.3 Měření s proudovou sondou

Proudová sonda se používá pro měření rušivého proudu, který se změří bez přerušení vodiče. Na obrázku 9. je znázorněn princip měření pomocí proudové sondy. Konstrukce podle ČSN EN 55016-1-1 ed. 2 a vnější vzhled sondy je na obrázku 10. [2]



Obr. 9. Měření rušivého proudu proudovou sondou (ZO zkoušený objekt; MR měřič rušení; PS proudová sonda).[2]

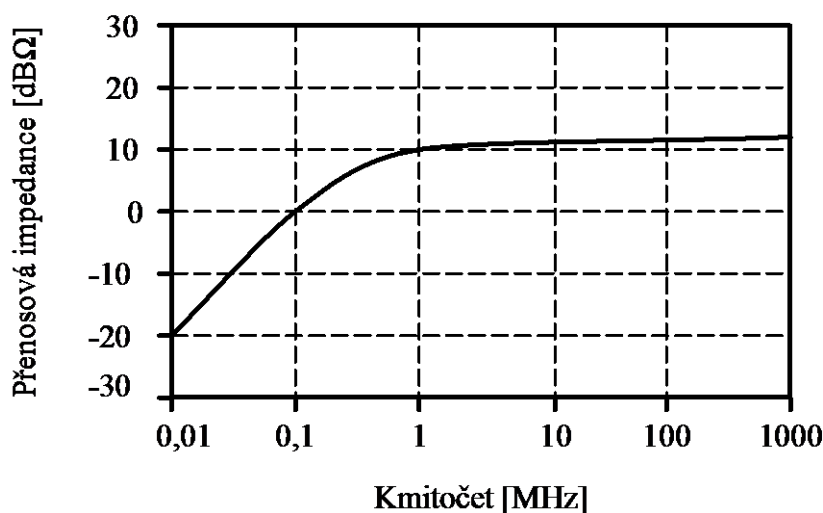


Obr. 10. Konstrukce a vnější vzhled proudové sondy.[2][3]

Princip proudové sondy spočívá v tom, že vodič, na kterém je měřen rušivý proud představuje (jednofázové) vinutí transformátoru sondy a proudová sonda, která vodič obepíná, tvoří sekundární vinutí (tvar toroidního transformátoru). Pro vložení vodiče je toroid rozdělen na dvě poloviny, tyto poloviny se následně uzavřou a rušivý (primární) proud protékající vodičem I_{rP} je převeden na napětí U_{rS} na výstupu sekundárního vinutí sondy a měří se měřicím přijímačem. Zkratovací kondenzátor C_0 (obr. 9.) je v obvodu použit, aby se zamezilo vniku rušivých signálů z vnější napájecí sítě do sondy a nedošlo

k ovlivnění správnosti měření, dále slouží k uzavření vysokofrekvenční cesty měřeného rušivého proudu, který vytváří zkoušený objekt ZO a brání jeho postupu do napájecí sítě. Kondenzátor tak funguje jako dolní a horní propusti v LISN (obr. 4.). [2]

Přenosová impedance $Z_T = U_{rS} / I_{rP}$ [dB Ω], je základním parametrem sondy. Na obr. 11. je její kmitočtová závislost. [2]



Obr. 11. Kmitočtový průběh přenosové impedance proudové sondy. [2]

Z obr. 11. vyplývá, že při nízkých kmitočtech klesá přenosová impedance o 20 dB / dekádu. Nejnižší pracovní kmitočet sondy je tedy určen poklesem citlivosti pod přípustnou mez. Její citlivost můžeme zvýšit vysokým počtem závitů a použitím toroidního jádra s vysokou permeabilitou. Maximální pracovní kmitočet sondy vychází z vlastní rezonance její indukčnosti a parazitních kapacit vinutí transformátoru. Dnešní proudové sondy EMC dosahují rozsahu 30 Hz – 100 MHz, případně až 1000 MHz. Pokud měření probíhá při takto vysokých kmitočtech, vznikají na měřeném vedení stojaté vlny rušivého vysokofrekvenčního signálu, kdy je třeba sondu při měření umístit tak, že bude měřen maximální rušivý proud. [2]

Dalšími charakteristickými parametry proudové sondy jsou zejména:

- Maximální stejnosměrný a nízkofrekvenční primární proud.
- Minimální měřitelná a maximální přípustná velikost primárního rušivého proudu I_{rP} v pracovním kmitočtovém pásmu.
- Impedance sekundárního obvodu sondy (pro přizpůsobení k měřiči rušení).
- Rozměrové údaje, např. největší průměr kabelu, na němž lze sondu instalovat. [2]

Měřicí sondy, které se používají k měření pracovních proudů na napájecích vedeních nelze použít pro EMC kvůli tomu, že nejsou navrženy pro měření vysokofrekvenčních signálů. [2]

3.1.4 Měření pomocí antén

Využívají se pro měření rušivých signálů, které jsou vyzařovány do okolního prostoru na kmitočtech od 10 kHz až 6 GHz, ale i vyšších. Pro kmitočty 80 MHz a výš je měření rušivých elektromagnetických polí významné, protože realizace přímého měření rušivých napětí či proudů je velmi problematické. K měření se používá vhodná anténa (typy jsou uvedeny v tab. 2.) a měřicí přijímač. Antény jsou pasivní nebo aktivní - vybavené měřicími zesilovači. [2]

| | Frekvence [MHz] | Měřená veličina |
|--------------------------------|-----------------|-----------------|
| Rámová (smyčková) anténa | 0,009 – 30 | H |
| Prutová anténa (monopól) | 0,009 – 30 | E |
| Symetrické (laděné) dipóly | 30 – 1000 | E |
| Bikónická anténa | 20 – 300 | E |
| Logaritmicko-periodická anténa | 200 – 3000 | E |
| Kónicko-logaritmická anténa | 200 – 3000 | E |
| Složená širokopásmová anténa | 20 – 2000 | E |
| Trychtýřové antény | 1000 – 40000 | E, H |

tab. 2. Přehled měřících antén pro systémy EMI. [2]

Rámová (smyčková) anténa a feritová anténa

Používají se v pásmu od 9 kHz až 150 kHz o maximálních rozměrech 60 x 60 cm. Měřená veličina je H_r (magnetické rušivé pole), protože u těchto kmitočtů je většina rušivých jevů způsobena magnetickou složkou pole. Používají se i pro pásmo 150 kHz až 30 MHz. [2]

Prutová anténa (monopól)

Měřená veličina je E_r (rušivé elektrické pole). Měří v pásmu 9 kHz až 30 MHz s doporučenou délkou antény 1 m. [2]

Symetrické (laděné) dipóly

Nejčastěji se uplatní v pásmu 30 až 80 MHz symetrický půlvlnný dipól, který je nastavený na rezonanční délku odpovídající kmitočtu 80 MHz. Používá se až do 1000 MHz jako přesné, případně kalibrační antény. Nevýhodou je jejich pracné nastavování, a proto nejsou příliš vhodné pro běžné měření. [2]

Bikónická anténa

Této antény se využívá v pásmu od 20 až 300 MHz. [2]

Logaritmicko-periodická anténa

Pro pásmo od 200 MHz až 6000 MHz je nejrozšířenější anténou. [2]

Kónicko-logaritmická anténa

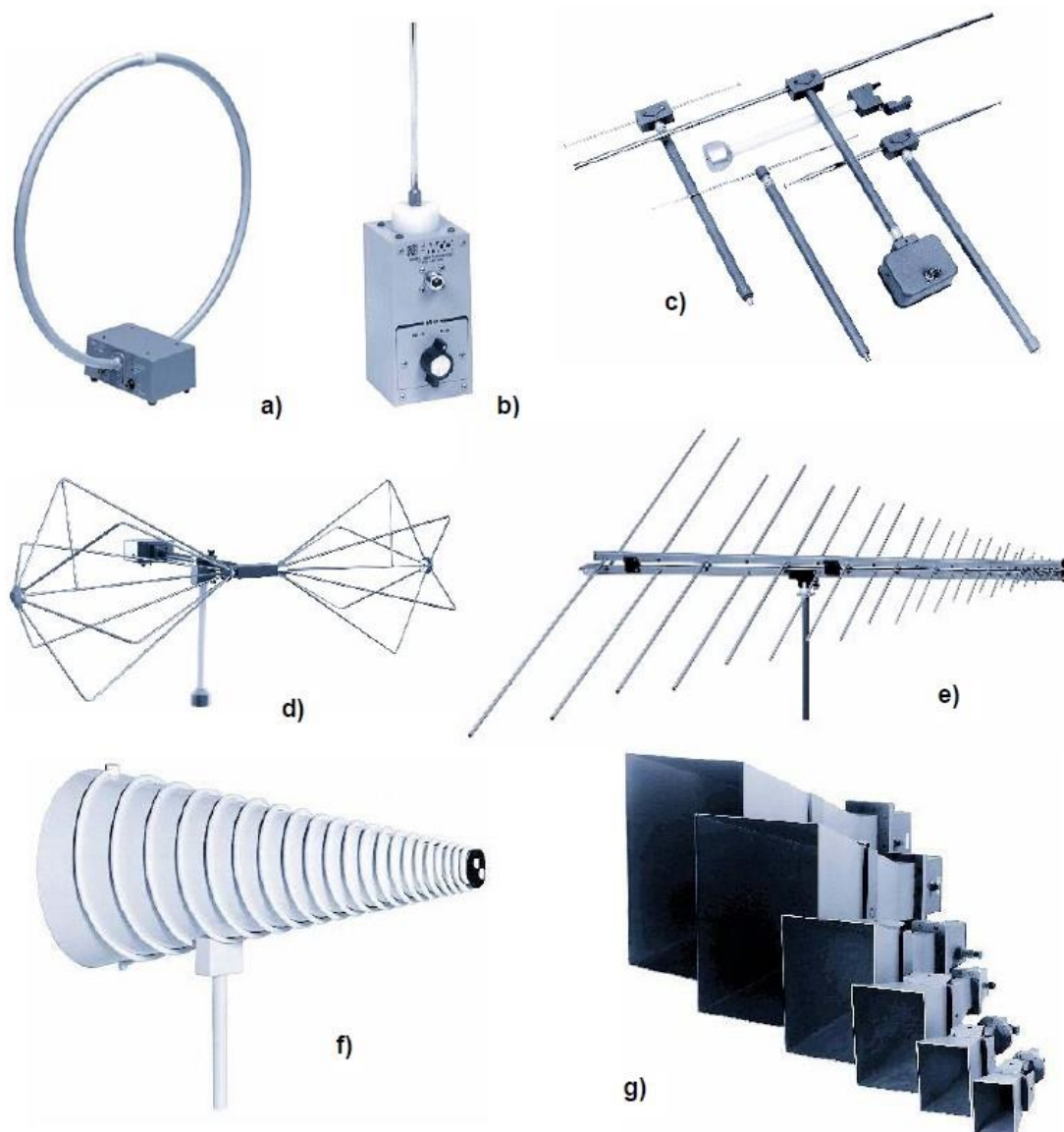
Tato anténa je speciálním typem širokopásmové antény, která má schopnost pracovat až do oblasti GHz. Od ostatních antén se liší tím, že je určena pro příjem (či vysílání) kruhově polarizovaného elektromagnetického pole a není tak vhodná pro testy EMC dle civilních norem IEC, CISPR a EN, protože všechny předepisují testy s lineární polarizací. Uplatnění v oblasti vojenství. [2]

Složená širokopásmová anténa

Anténa je navržena tak, aby byla schopna pokrýt celý nejčastěji využívaný rozsah měření EMI, tedy pásmo od 30 MHz až 2 ÷ 6 GHz. Pásmo od 30 MHz až 300 MHz je vykrýváno bikónickou anténou a pásmo od 300 MHz výše anténou logaritmicko – periodickou. [2]

Trychtýřové antény

Používají se ve vyšších gigahertzových pásmech a i přes konstrukční úpravy rozšiřující šířku jejich pracovního pásma je lze zařadit do úzkopásmových. Pro měření od jednotek do desítek GHz je tak potřeba 8 až 10 těchto antén. [2]



Obr. 12. Měřicí antény pro systémy EMI: a) aktivní rámová anténa pro magnetická měření do 30 MHz; b) aktivní prutová anténa 1-30 MHz; c) sada laděných symetrických dipólů 30-1000 MHz; d) bikónická anténa 30-300 MHz; e) logaritmicke-periodická anténa 200-1000 MHz; f) kónicko-logaritmicke anténa 200-1000 MHz; g) sada trychtýřových antén 1-12 GHz.[2]

Při měření elektromagnetického rušení přijímá anténa elektrickou složku E_r či magnetickou složku H_r rušivého pole, kterou převede na výstupní napětí U_r , a je vyhodnoceno měřičem rušení. Důležitým parametrem antén je anténní faktor, který se vypočte pomocí vzorce:

$$AF = \frac{E_r}{U_r} \left[\frac{1}{\text{m}}; \frac{\text{V}}{\text{m}}; \text{V} \right] \quad (3.1.4.1)$$

Anténní faktor je často vyjádřený v logaritmické míře:

$$AF \left[\frac{\text{dB}}{\text{m}} \right] = E_r \left[\frac{\text{dBV}}{\text{m}} \right] - U_r [\text{dBV}] \quad (3.1.4.2)$$

AF ... Anténní faktor

E_r Vstupní intenzita elektrického pole

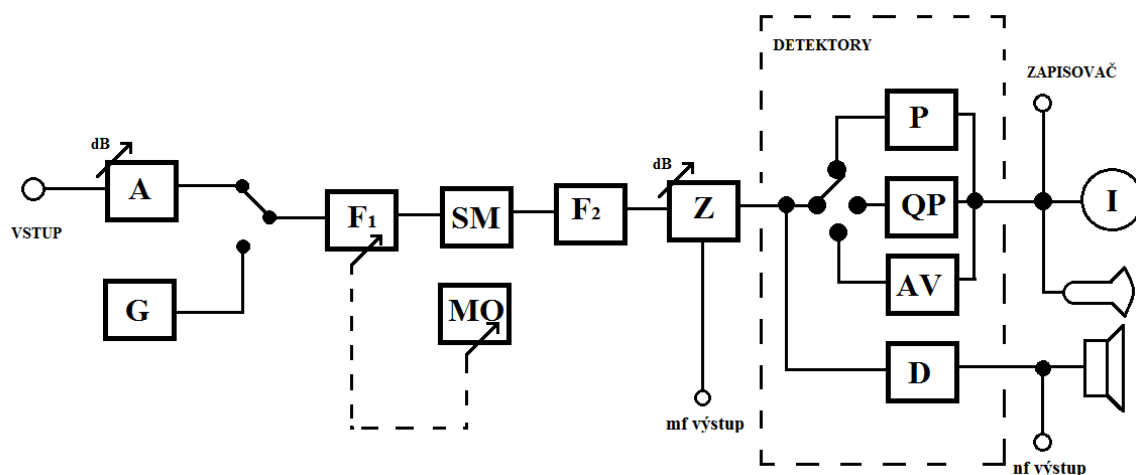
U_r Výstupní napětí antény

3.2 Přístroje pro měření rušení

Při měření rušivého signálu se nejdříve na zkoušený objekt připojí snímač (umělá síť, napěťová sonda, proudová sonda, absorpční kleště, nebo měřicí anténa), který získá hodnotu rušivého signálu. Tento signál je přiveden z výstupu snímače (senzoru) na vstup měřiče rušení (měřícího přijímače) a ten provede vlastní měření tohoto výstupního rušivého napětí, následně kvantitativní vyhodnocení a srovnání s mezemi vyzařování zkoušeného objektu podle příslušných norem. Nejčastěji se vyskytují rušivé signály neharmonického průběhu, z čehož vyplývá velké množství složek v kmitočtovém spektru.[2]

Požadavky na kvalitní měřič rušení:

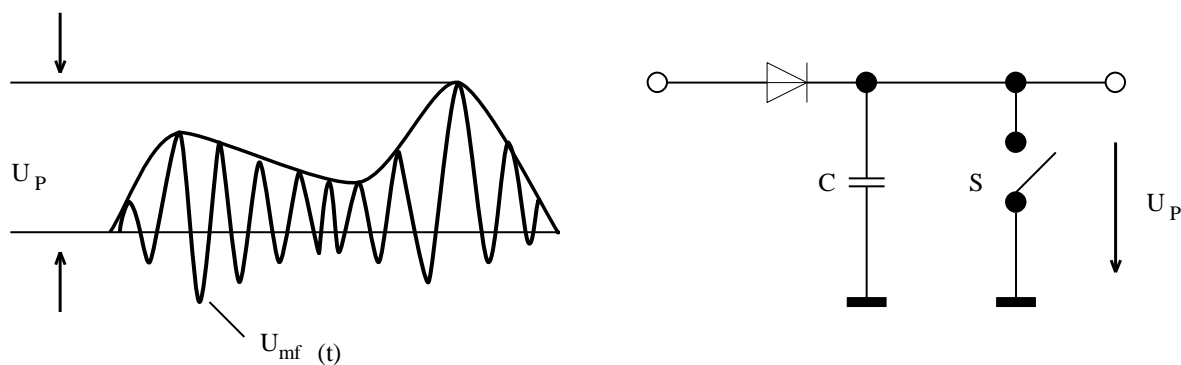
- Možnost spojitého přeladování v širokém kmitočtovém rozsahu minimálně 9 kHz až 18 GHz, s výhledem k vyšším pásmům.
- Vysoká citlivost a nízký vlastní šum pro možnost měřit i nízké úrovně rušivých napětí.
- Velký dynamický rozsah (větší než 40 dB) a vysoká přebuditelnost umožňující v lineárním režimu měřit i vysoké úrovně rušivých napětí.
- Různé typy detektorů pro různé způsoby vyhodnocení rušivých napětí v souladu s normami.
- Výstupy, příp. obvody pro zvukovou a obrazovou analýzu a monitorování měřených signálů.
- Kvalitní elektromagnetické stínění celého měřiče i jeho dílčích bloků pro dosažení jeho vysoké elektromagnetické odolnosti vůči vlastnímu i vnějšímu rušení. [2]



Obr. 13. Blokové schéma měřiče elektromagnetického rušení.[2]

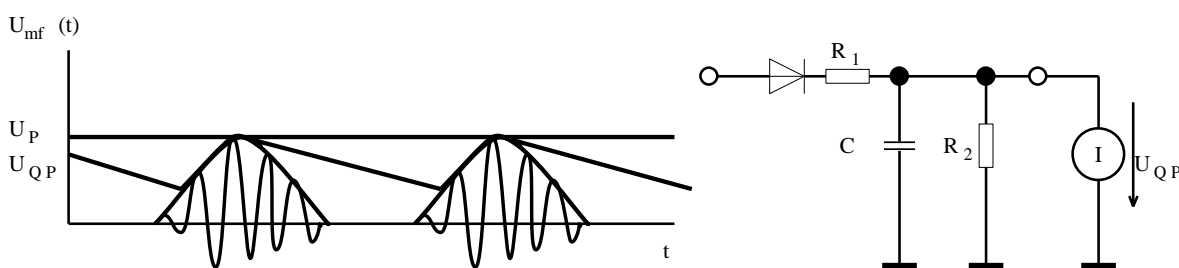
Nejprve je velikost vstupního měřeného napětí upravena v širokopásmovém děliči napětí A (atenuátor) a následně prochází signál vysokofrekvenčním pásmovým filtrem F_1 (preselektor), většinou jde o tzv. aktivní (laděný selektivní zesilovač). Poté se provede směšování signálu se signálem místního oscilátoru MO ve směšovači SM a prochází mezifrekvenční signál o konstantním rozdílovém (mezifrekvenčním) kmitočtu mezifrekvenčním pásmovým filtrem F_2 a několikastupňovým mezifrekvenčním zesilovačem Z. K jeho výstupu je připojen blok detektorů špičkový detektor (obr. 14.), kvazi – špičkový detektor (obr. 15.), detektor střední hodnoty (obr. 16.). [2]

Výstupní napětí špičkového detektoru P (Peak detector) neboli detektoru vrcholové hodnoty je rovno maximální velikosti vstupního napětí, tedy maximální hodnotě obálky napětí na mezifrekvenčním výstupu měřiče rušení. Dioda usměrňuje mezifrekvenční výstupní napětí $u_{mf}(t)$ a nabíjí kondenzátor C na maximální velikost napětí jeho obálky U_P . Kondenzátor pak drží tuto hodnotu až do doby kdy spínač sepne. Tento detektor má tak krátkou nabíjecí a dlouhou vybíjecí časovou konstantu.



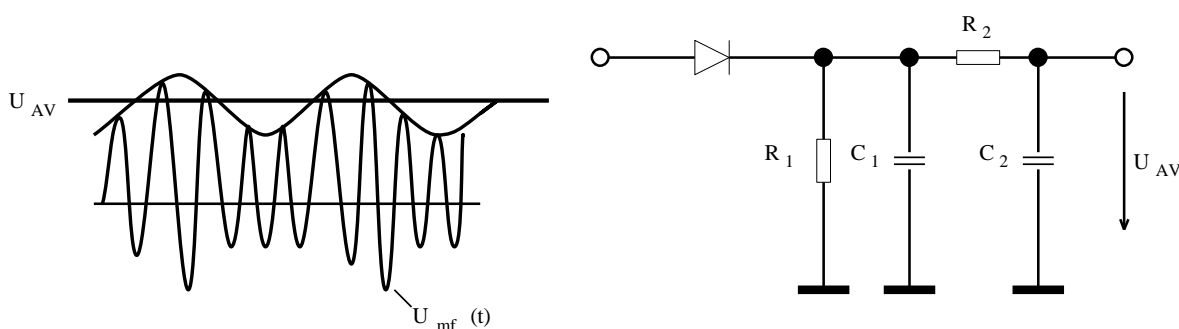
Obr. 14. Princip špičkového detektoru (detektoru vrcholové hodnoty). [2]

Hodnota výstupního napětí Kvazi – špičkového detektoru QP (Quasi – Peak detector) je úměrná napěťově – časové ploše obálky vstupního mezifrekvenčního signálu. Ovlivňuje jí tak velikost i opakovací kmitočet vstupních impulzů rušivého napětí. Efektu kvazi – špičkové detekce se dosahuje vhodnou volbou nabíjecí a vybíjecí časové konstanty R_1C a R_2C tak, že kondenzátor C se mezi sousedními impulzy vždy částečně vybije. Hodnoty těchto konstant uvádí norma ČSN EN 55016-1-1 ed. 2. Tato hodnota napětí je tedy menší než hodnota špičková.



Obr. 15. Principiální zapojení kvazi-špičkového detektoru. [2]

Výstupní napětí detektoru střední hodnoty AV (Average detector), tzv. průměrujícího detektoru, je rovno aritmetické střední hodnotě obálky vstupního (rušivého) mezifrekvenčního napětí $u_{mf}(t)$. Dioda usměrňuje mezifrekvenční napětí a nabíjí kondenzátor C_1 na okamžitou hodnotu obálky tohoto napětí. Kvůli nízké vybíjecí hodnotě R_1 sleduje přitom napětí na kondenzátoru C_1 velikost obálky vstupního signálu. Napětí obálky je dále vyhlazeno filtračním členem R_2C_2 , takže napětí na kondenzátoru C_2 se ustálí na aritmetické střední hodnotě obálky vstupního signálu.



Obr. 16 Detektor střední hodnoty[2]

Na výstupu je měřič vybaven několika výstupními indikátory:

- Zvukovým (po demodulaci AM/FM v demodulátoru D).
- Obrazovým displejem.

- Výstupním elektronickým μV – metrem (indikátor I).

Mezi další patří i výstupy pro připojení vnějšího zapisovače, nahrávacího či jiného záznamového zařízení, číslicový záznam, apod. V měřiči je zabudován i kalibrační generátor G, který poskytuje harmonický a pulzní kalibrační signál s přesnými elektrickými parametry pro přesnou a operativní kalibraci. [2]

Dalším přístrojem pro měření EMI, je **spektrální analyzátor**.

Mezi jeho výhody patří hlavně:

- Rychlé vizuální zobrazení měřeného rušivého spektra na displeji a tedy i získání celkového přehledu o elektromagnetickém rušení v daném kmitočtovém pásmu.
- Nižší cena.

Nevýhody:

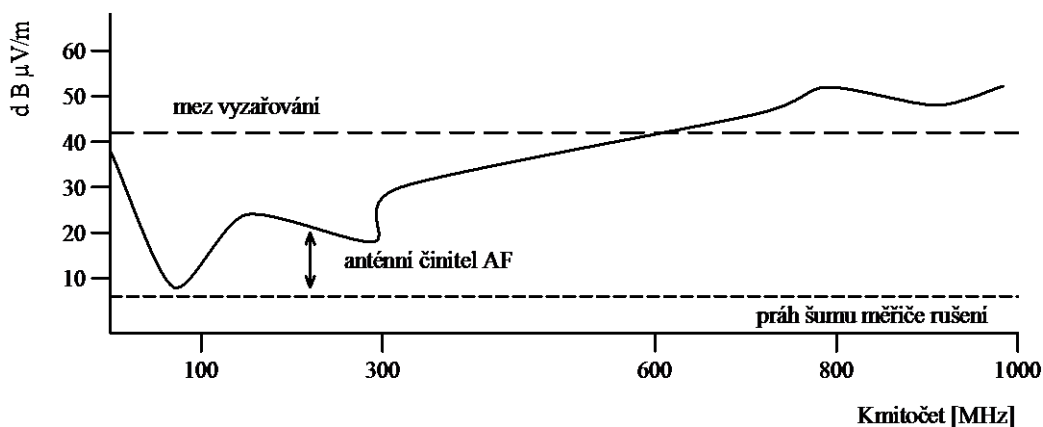
- Obvykle bývají širokopásmové a tak nejsou vybaveny preselektorem a nedosahují tak velkého dynamického rozsahu měření.
- Jejich citlivost bývá menší než citlivost u měřících přijímačů heterodynového typu.
- U impulzního rušení dochází ke zkreslení, nebo dokonce až k znehodnocení výsledů.

Kvalitní spektrální analyzátoři pro měření EMI, musí na rozdíl od běžných analyzátorů splňovat požadavky podle normy ČSN EN 55016-1-1 ed. 2 kladené na měřicí přijímače. Díky kombinaci výhod obou těchto přístrojů, dnes vznikají kvalitní měřicí přijímače se širokopásmovým rozmítáním kmitočtů a přesným zobrazením celého kmitočtového spektra. U spektrálních analyzátorů je zaveden vstupní vysokofrekvenční preselektor, díky němuž je schopen pracovat na diskrétních kmitočtech s vlastnostmi plnohodnotného měřicího přijímače. Tyto přístroje jsou špičkou současné širokopásmové vysokofrekvenční měřicí techniky a zcela využívají číslicového zpracování a počítačové analýzy, archivace a zpracování měřených dat.[2]



Obr. 17. Vnější vzhled a) měřícího přijímače, b) spektrálního analyzátoru pro měření elektromagnetického rušení. [2]

Celková citlivost měření rušivých signálů závisí na citlivosti použitého měřícího přijímače, na použitém snímači a jeho útlumových parametrech (umělá síť, napěťová sonda), přenosové admitanci (proudová sonda) či anténním faktoru (antény). Tyto vlastnosti snímačů jsou ručně či automaticky přepočítávány k měřenému napětí (v logaritmickém vyjádření). Měřič rušení má tak na svém výstupu přímo měřenou veličinu rušivého signálu. Vlastnosti snímačů (např. u měřících antén anténní faktor) limitují minimálně měřitelnou velikost signálu (obr. 18.). Hodnota minimální měřitelné intenzity elektrického pole [$\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$] pro každý kmitočet je určena součtem úrovně minimálního měřitelného napětí [$\text{dB}\mu\text{V}$] (úroveň vlastního šumu měřiče rušení) a anténního faktoru měřící antény [dB/m]. Intenzity rušivých polí pod touto mezí s daným technickým vybavením nelze měřit. Pokud překročí minimální měřitelná úroveň mez vyzařování určenou pro zkoušené zařízení příslušnou normou, není možné vyzařování tohoto zařízení v dané oblasti (pro případ na obr. 18. od 600 MHz) měřit a musí být použito kvalitnější vybavení.



Obr. 18. Vymezení minimální měřitelné intenzity rušivého elektrického pole. [2]

4 Určení nejistoty pro různé typy kombinací měřícího přijímače a snímačů rušivých signálů

4.1 Použité typy snímačů rušivých signálů a měřícího přijímače

Pro všechny přístroje jsou uvedené hodnoty standardních nejistot určeny v souladu s dokumentem EA – 4/02. Uvedené rozšířené nejistoty měření jsou součinem standardní nejistoty měření a koeficientu k , kde $k = 2$ a odpovídá, tak pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95 % pro normální rozdělení.

U těchto přístrojů se udává přesnost a , a nejistota kalibrace u :

Přijímač

- **Přesnost:** a_p je největší odchylka z kalibračního protokolu, nebo nejistota měření z datového listu.
- **Nejistota kalibrace:** u_p je udána v kalibračním protokolu.

Umělá síť

- **Přesnost:** a_s je největší odchylka z kalibračního protokolu.
- **Nejistota kalibrace:** u_s je udána v kalibračním protokolu.

Antény, napět'ové a proudové sondy

- **Přesnost:** a_a odchylka je eliminována zadáním kalibrační charakteristiky do softwaru (SW).
- **Nejistota kalibrace:** u_a je udána v kalibračním protokolu.

Ostatní prvky a zařízení

- **Nespecifikovaná nejistota:** u_0 odhad nejistoty stanoviště a dalších prvků měřícího řetězce.[8]

Částečně bezdrazová komora (SAC)

| Typ snímače | Frekvence [MHz] | Typ měření | Nejistota kalibrace [dB] | Přesnost |
|-------------|-----------------|---------------------|--------------------------|----------|
| BTA – M | 30 – 100 | Standardní měření | 2,2 | SW |
| | 100 – 300 | | 1,5 | |
| | 300 – 1000 | | 1,4 | |
| | 1000 – 18 000 | Nestandardní měření | 2,0 | |

tab. 3. Hodnoty nejistoty kalibrace a přesnost podle použité frekvence.

Umělá síť (AMN)

| Typ snímače | Frekvence [MHz] | Typ měření | Nejistota kalibrace [dB] | Přesnost [dB] |
|-------------|-----------------|-------------------------------|--------------------------|---------------|
| ESH2 – Z5 | 0,009 – 30 | Pro světelnou techniku | 0,1 | 1,0 |
| | 0,15 – 30 | Standardní měření pro průmysl | | |

tab. 4. Hodnoty nejistoty kalibrace a přesnost podle použité frekvence.

Proudová sonda (CP)

| Typ snímače | Frekvence [MHz] | Typ měření | Nejistota kalibrace [dB] | Přesnost [dB] |
|-------------|------------------|---|--------------------------|---------------|
| EZ – 17 | 0,00002 – 0,0005 | Standardní měření pro průmysl od 0,15 – 30 MHz. | 1,0 | SW |
| | 0,001 – 0,05 | | 0,5 | |
| | 0,1 – 120 | 0,2 | | |
| | 130 – 170 | Pro automobilový průmysl až do 108 MHz. | 0,5 | |
| | 180 – 200 | | 1,0 | |

tab. 5. Hodnoty nejistoty kalibrace a přesnost podle použité frekvence.

Plně bezodrazová komora (FAR)

| Typ snímače | Frekvence [MHz] | Typ měření | Nejistota kalibrace [dB] | Přesnost [dB] |
|-----------------|-----------------|--|--------------------------|---------------|
| BBHA 9120 E 308 | 30 – 100 | Pro tyto frekvence nepoužitelné (použitelné až od 400 MHz) | 2,5 | SW |
| | 100 – 300 | | 1,7 | |
| | 300 – 1000 | Standardní měření | 1,7 | |
| | 1000 – 18 000 | od 1 – 6 GHz | 2,2 | |

tab. 6. Hodnoty nejistoty kalibrace a přesnost podle použité frekvence.

Zkušební pracoviště ve venkovním prostoru (OATS)

| Typ snímače | Frekvence [MHz] | Typ měření | Nejistota kalibrace [dB] | Přesnost [dB] |
|-------------|-----------------|-------------------------------------|--------------------------|---------------|
| BC – 01 | 30 – 100 | Standardní měření od 30 – 200 MHz | 2,2 | SW |
| | 100 – 300 | | 1,5 | |
| LP – 02 | 100 – 300 | Standardní měření od 200 – 1000 MHz | 1,7 | |
| | 300 – 1000 | | 1,7 | |
| | 1000 – 1800 | Nestandardní měření | 2,2 | |

tab. 7. Hodnoty nejistoty kalibrace a přesnost podle použité frekvence.

Napěťová sonda (VP)

| Typ snímače | Frekvence [MHz] | Typ měření | Nejistota kalibrace [dB] | Přesnost [dB] |
|----------------|-----------------|------------------------------------|--------------------------|---------------|
| SHC – 1 – 1000 | 0,1 – 30 | Standardní měření 0,15 – 30 MHz | 0,25 | SW |

tab. 8. Hodnoty nejistoty kalibrace a přesnost podle použité frekvence.

Smyčková anténa (OATS)

| Typ snímače | Frekvence [MHz] | Typ měření | Nejistota kalibrace [dB] | Přesnost [dB] |
|-------------|-----------------|-------------------|--------------------------|---------------|
| HFH2 – Z2 | 0,009 - 30 | Standardní měření | 0,3 | SW |

tab. 9. Hodnoty nejistoty kalibrace a přesnost podle použité frekvence.

Měřicí přijímač

| Typ snímače | Frekvence [GHz] | Typ měření | Nejistota měření [dB] |
|-------------|-----------------|-------------------|-----------------------|
| ESR - 7 | 0,000009 – 3,6 | Standardní měření | 0,47 |
| | 3,6 – 7 | | 0,59 |

tab. 10. Hodnoty nejistoty měření podle použité frekvence.

Při nastavení měřicího přijímače do různých pracovních režimů budou nejistoty menší než v tabulce 10., která uvádí maximální hodnoty nejistot měřicího přijímače. Pokud jsou splněny podmínky (podle normy ČSN EN 55016-4-2. Ed. 2.) pro nejistoty z tabulky 10., pak musí být splněny podmínky i pro jiné nastavení pracovních režimů tohoto měřicího přijímače.

Ostatní vlivy

Mezi ně patří například kabely, stanoviště, atenuátory, atd. Ostatní vlivy mají nejistotu $u_0 = 2$ dB (odhad). V tabulce 11. je znázorněný příklad změny útlumu u 8 metrového kabelu v závislosti na frekvenci.

| Frekvence [MHz] | Útlum [dB] |
|-----------------|------------|
| 0,009 | -0,0177 |
| 31,508937 | -0,1929 |
| 103,508793 | -0,3521 |
| 301,508397 | -0,6297 |
| 1003,506993 | -1,2205 |
| 1800,005400 | -1,7300 |
| 3600,001800 | -2,7192 |
| 7000,037500 | -3,695 |

tab. 11. Hodnoty útlumu 8 metrového kabelu v závislosti na frekvenci.

4.2 Kombinace snímačů rušivých signálů a měřícího přijímače

Vždy se musí vzít nejvyšší z nejistot měření jednotlivých přístrojů a z těchto hodnot určit zda vyhovují normě.

Výpočet rozšířené nejistoty obecný vzorec:

Přijímač, anténa, napěťová sonda, proudová sonda

$$U_{lab} = 2 \sqrt{\frac{a_P^2}{3} + \left(\frac{u_P}{2}\right)^2 + \left(\frac{u_A}{2}\right)^2 + \left(\frac{u_0}{2}\right)^2} \quad (4.2.1)$$

Přijímač, umělá síť

$$U_{lab} = 2 \sqrt{\frac{a_P^2}{3} + \left(\frac{u_P}{2}\right)^2 + \frac{a_S^2}{3} + \left(\frac{u_S}{2}\right)^2 + \left(\frac{u_0}{2}\right)^2} \quad (4.2.2)$$

Kombinace 1

| | | |
|---------------------------------------|---|----------------------|
| Přijímač ESR – 7 (0,000009 – 3,6 GHz) | nejistota měření (z datového listu) 0,47 dB | |
| Anténa BTA – M (30 - 200 MHz) | $a_a =$ eliminováno SW | $u_a = 2,2$ dB |
| Anténa BTA – M (200 - 1000 MHz) | $a_a =$ eliminováno SW | $u_a = 1,5$ dB |
| Ostatní vlivy | | $u_0 = 2$ dB |
| Rozšířená nejistota (30 - 200 MHz): | | $U_{lab} = 3,118$ dB |
| Rozšířená nejistota (200 - 1000 MHz): | | $U_{lab} = 2,671$ dB |

$$U_{lab} = 2 \sqrt{0,47^2 + \left(\frac{2,2}{2}\right)^2 + \left(\frac{2}{2}\right)^2} = 3,118 \text{ dB}$$

Kombinace 2

| | | |
|---|---|----------------------|
| Přijímač ESR – 7 (0,000009 – 3,6 GHz) | nejistota měření (z datového listu) 0,47 dB | |
| Umělá síť ESH2 – Z5 (9 – 150 kHz) | $u_s = 1,0$ dB | $u_s = 0,1$ dB |
| Umělá síť ESH2 – Z5 (0,15 – 30 MHz) | $u_s = 1,0$ dB | $u_s = 0,1$ dB |
| Ostatní vlivy | | $u_0 = 2$ dB |
| Rozšířená nejistota (0,009 – 150 kHz), (0,15 – 30 MHz): | | $U_{lab} = 2,495$ dB |

$$U_{lab} = 2 \sqrt{0,47^2 + \frac{1^2}{3} + \left(\frac{0,1}{2}\right)^2 + \left(\frac{2}{2}\right)^2} = 2,495 \text{ dB}$$

Kombinace 3

| | | |
|--|---|----------------------|
| Přijímač ESR – 7 (0,000009 – 3,6 GHz) | nejistota měření (z datového listu) 0,47 dB | |
| Proudová sonda EZ – 17 (0,15 – 30 MHz) | $a_a =$ eliminováno SW | $u_a = 0,2$ dB |
| Ostatní vlivy | | $u_0 = 2$ dB |
| Rozšířená nejistota (0,15 – 30 MHz): | | $U_{lab} = 2,219$ dB |

Kombinace 4

| | | |
|------------------------------------|---|----------------------|
| Přijímač ESR – 7 (3,6 – 7 GHz) | nejistota měření (z datového listu) 0,59 dB | |
| Anténa BBHA 9120 E 308 (1 – 6 GHz) | $a_a =$ eliminováno SW | $u_a = 2,2$ dB |
| Ostatní vlivy | | $u_0 = 3$ dB |
| Rozšířená nejistota (1 – 6 GHz): | | $U_{lab} = 3,903$ dB |

Kombinace 5

| | | |
|---------------------------------------|---|----------------------|
| Přijímač ESR – 7 (0,000009 – 3,6 GHz) | nejistota měření (z datového listu) 0,47 dB | |
| Anténa BC – 01 (30 – 200 MHz) | $a_a =$ eliminováno SW | $u_a = 2,2$ dB |
| Ostatní vlivy | | $u_0 = 2$ dB |
| Rozšířená nejistota (30 – 200 MHz): | | $U_{lab} = 3,118$ dB |

Kombinace 6

| | | |
|---------------------------------------|---|------------------------------|
| Přijímač ESR – 7 (0,000009 – 3,6 GHz) | nejistota měření (z datového listu) 0,47 dB | |
| Anténa LP – 02 (200 – 1000 MHz) | $a_a = \text{eliminováno SW}$ | $u_a = 1,7 \text{ dB}$ |
| Ostatní vlivy | | $u_0 = 2 \text{ dB}$ |
| Rozšířená nejistota (200 – 1000 MHz): | | $U_{lab} = 2,788 \text{ dB}$ |

Kombinace 7

| | | |
|---|---|------------------------------|
| Přijímač ESR – 7 (0,000009 – 3,6 GHz) | nejistota měření (z datového listu) 0,47 dB | |
| Napěťová sonda SHC – 1 – 1000 (0,009 – 30 MHz) | $a_a = \text{eliminováno SW}$ | $u_a = 0,25 \text{ dB}$ |
| Ostatní vlivy | | $u_0 = 2 \text{ dB}$ |
| Rozšířená nejistota (0,009 – 30 MHz): | | $U_{lab} = 2,224 \text{ dB}$ |

Kombinace 8

| | | |
|---------------------------------------|---|------------------------------|
| Přijímač ESR – 7 (0,000009 – 3,6 GHz) | nejistota měření (z datového listu) 0,47 dB | |
| anténa HFH2 – Z2 (0,009 – 30 MHz) | $a_a = \text{eliminováno SW}$ | $u_a = 0,3 \text{ dB}$ |
| Ostatní vlivy | | $u_0 = 2 \text{ dB}$ |
| Rozšířená nejistota (0,009 – 30 MHz): | | $U_{lab} = 2,230 \text{ dB}$ |

4.3 Kritéria vyhovění pro nejistotu měřící kombinace

Rozšířená nejistota měření způsobená přístrojovým vybavením U_{lab} pro zkušební laboratoř se vypočítá:

$$U_{lab} = 2u_c(y) \quad (4.3.1)$$

Koeficient pokrytí $k = 2$ poskytuje jistotu 95 % pro rozdělení blízké normálnímu.[8][12]

Posuzování výsledků:

- 1) Když $U_{lab} \leq U_{cispr}$ výsledky vyhovují, když výsledek měření nepřevyšuje mez rušení.
- 2) Když $U_{lab} > U_{cispr}$ výsledky nevyhovují, když výsledek měření převyšuje mez rušení.

- 3) Když $U_{lab} > U_{cispr}$ výsledky vyhovují, když žádný výsledek měření zvýšený o $U_{lab} - U_{cispr}$ nepřevyšuje mez rušení.
- 4) Když $U_{lab} > U_{cispr}$ výsledky nevyhovují, když jakýkoliv výsledek měření zvýšený o $U_{lab} - U_{cispr}$ převyšuje mez rušení.[8][12]

| Měření | U_{cispr} |
|--|-------------|
| Rušení šířené vedením na vstupu / výstupu napájením s použitím AMN (9 kHz až 150 kHz) | 3,8 dB |
| Rušení šířené vedením na vstupu / výstupu napájením s použitím AMN (150 kHz až 30 MHz) | 3,4 dB |
| Rušení šířené vedením na vstupu / výstupu napájením s použitím VP (9 kHz až 30 MHz) | 2,9 dB |
| Rušení šířené vedením na telekomunikačním vstupu / výstupu s použitím AAN (150 kHz až 30 MHz) | 5,0 dB |
| Rušení šířené vedením na telekomunikačním vstupu / výstupu s použitím CVP (150 kHz až 30 MHz) | 3,9 dB |
| Rušení šířené vedením na telekomunikačním vstupu / výstupu s použitím CP (150 kHz až 30 MHz) | 2,9 dB |
| Rušivý výkon (30 MHz až 300 MHz) | 4,5 dB |
| Rušení šířené zářením (intenzita elektrického pole na OATS nebo v SAC) (30 MHz až 1000 MHz) | 6,3 dB |
| Rušení šířené zářením (intenzita elektrického pole ve FAR) (30 MHz až 1000 MHz) | 5,3 dB |
| Rušení šířené zářením (intenzita elektrického pole ve FAR) (1 GHz až 6 GHz) | 5,2 dB |
| Rušení šířené zářením (intenzita elektrického pole ve FAR) (6 GHz – 18 GHz) | 5,5 dB |

tab. 12. Hodnoty U_{cispr} [12]

4.4 Vyhodnocení měřících kombinací zda splňují kritéria

Kombinace 1 (přijímač ESR 7 + anténa BTA – M + ostatní vlivy)

$$U_{lab} = 3,118 \text{ dB} \quad U_{cispr} (30 - 200 \text{ MHz}) = 6,3 \text{ dB} \quad U_{lab} \leq U_{cispr}$$

$$U_{lab} = 2,671 \text{ dB} \quad U_{cispr} (200 - 1000 \text{ MHz}) = 6,3 \text{ dB} \quad U_{lab} \leq U_{cispr}$$

Podmínky splněny.

Kombinace 2 (přijímač ESR 7 + umělá síť ESH2 – Z2 + ostatní vlivy)

$$U_{lab} = 2,495 \text{ dB} \quad U_{cispr} (9 - 150 \text{ kHz}) = 3,8 \text{ dB} \quad U_{lab} \leq U_{cispr}$$

$$U_{lab} = 2,495 \text{ dB} \quad U_{cispr} (0,15 - 30 \text{ MHz}) = 3,4 \text{ dB} \quad U_{lab} \leq U_{cispr}$$

Podmínky splněny.

Kombinace 3 (přijímač ESR 7 + proudová sonda EZ – 17 + ostatní vlivy)

$$U_{lab} = 2,219 \text{ dB} \quad U_{cispr} (150 \text{ kHz} - 30 \text{ MHz}) = 2,9 \text{ dB} \quad U_{lab} \leq U_{cispr}$$

Podmínka splněna.

Kombinace 4 (přijímač ESR 7 + anténa BBHA 9120 E 308 + ostatní vlivy)

$$U_{lab} = 3,903 \text{ dB} \quad U_{cispr} (1 \text{ GHz} - 6 \text{ GHz}) = 5,2 \text{ dB} \quad U_{lab} \leq U_{cispr}$$

Podmínka splněna.

Kombinace 5 (přijímač ESR 7 + anténa BC – 01 + ostatní vlivy)

$$U_{lab} = 3,118 \text{ dB} \quad U_{cispr} (30 \text{ MHz} - 200 \text{ MHz}) = 6,3 \text{ dB} \quad U_{lab} \leq U_{cispr}$$

Podmínka splněna.

Kombinace 6 (přijímač ESR 7 + anténa LP – 02 + ostatní vlivy)

$$U_{lab} = 2,788 \text{ dB} \quad U_{cispr} (200 \text{ MHz} - 1000 \text{ MHz}) = 6,3 \text{ dB} \quad U_{lab} \leq U_{cispr}$$

Podmínka splněna.

Kombinace 7 (přijímač ESR 7 + napěťová sonda SHC – 1 – 1000 + ostatní vlivy)

$$U_{lab} = 2,224 \text{ dB} \quad U_{cispr} (9 \text{ kHz} - 30 \text{ MHz}) = 2,9 \text{ dB} \quad U_{lab} \leq U_{cispr}$$

Podmínka splněna.

Kombinace 8 (přijímač ESR 7 + anténa HFH2 – Z2 + ostatní vlivy)

$$U_{lab} = 2,230 \text{ dB}$$

Podle normy ČSN EN 55016 – 4 – 2 ed. 2 nelze určit, zda je podmínka splněna, protože norma neudává hodnotu U_{cisp} pro frekvenční pásmo, v kterém je použita tato anténa. U tohoto pásma je většina rušivých jevů způsobena magnetickou složkou pole.

Závěr

V této práci jsem se snažil vysvětlit problematiku vyjadřování standardních nejistot typu A a B včetně kombinované a rozšířené nejistoty. Dále jsem se zabýval možnostmi použití a vlastnostmi snímačů rušivého signálu, které byly použity při výpočtech nejistot. Uvádím zde také definice měření rušivých signálů a jejich způsob šíření.

Do práce jsem zařadil chyby měření a jejich rozdělení, zaokrouhlování a způsob zápisu. Chyby měření jsem zařadil z důvodu jejich dlouhodobého používání a nyní, kdy jsou chyby nahrazovány nejistotou měření, tak i jako předchůdce nejistot.

V práci jsem uvedl výpočet nejistot měření pro různé kombinace měřiče rušení se snímači rušivého signálu jako je umělá síť, proudová a napěťová sonda a antény. Hodnoty nejistot měření pro různá frekvenční pásma jsem získal z kalibračních protokolů jednotlivých typů snímačů rušivých signálů a měřiče rušení. V normě ČSN EN 55016-4-2. ed. 2 jsou pro jednotlivé snímače rušivých signálů uvedena frekvenční pásma, ve kterých se snímače standardně používají a pro každé pásmo je uvedena rozšířená nejistota měření (U_{cispr}), kterou nesmí žádná z testovaných kombinací převýšit. Pro zhodnocení výsledů, zda testované kombinace splňují kritéria normy, jsem vypočítal hodnotu rozšířené nejistoty (U_{lab}) podle vzorce (4.2.1) a (4.2.2). Následně jsem porovnal hodnoty U_{lab} testovaných kombinací s hodnotou U_{cispr} , kterou udává norma. Zjistil jsem, že pro všechny použité kombinace jsou podmínky splněny, až na kombinaci 8, kde je použita smyčková anténa (HFH2 – Z2), která se standardně používá pro frekvenční pásmo od 9 kHz do 30 MHz a norma neuvádí hodnotu U_{cispr} pro toto frekvenční pásmo.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] *Sborníky technické harmonizace 2012: Pokyn pro vyjadřování nejistoty měření (GUM)* [online]. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z:
<http://www.unmz.cz/files/Sborn%C3%ADky%20TH/GUM%20-%20celek%20-DEF.pdf>
- [2] *Encyklopedie elektromagnetické kompatibility* [online]. [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/>
- [3] *Proudové sondy* [online]. [cit. 2016-04-28]. Dostupné z:
<http://www.mbcCalibri.cz/prodej-produkt-3878-proudova-sonda-fluke-i30s.html>
- [4] *Moderní technologie ve studiu aplikované fyziky: Chyby a nejistoty měření* [online]. [cit. 2016-04-28]. Dostupné z:
<https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/pext2-nejistoty.pdf>
- [5] *Chyby měření* [online]. [cit. 2016-04-28]. Dostupné z:
http://www.kfy.zcu.cz/dokumenty/FP1/chyby_mereni.pdf
- [6] *Nejistoty měření* [online]. [cit. 2016-04-28]. Dostupné z:
<http://www1.fs.cvut.cz/cz/u12110/tem/nejistoty/Nejistoty-uvod.pdf>
- [7] *Nejistota měření - postup stanovení* [online]. [cit. 2016-04-28]. Dostupné z:
http://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=nejistota_postup
- [8] *Elektrotechnická laboratoř FEL ZČU: Postupy pro odhad nejistoty měření*. Plzeň, 2012.
- [9] NĚMEČEK, Pavel. *Nejistoty měření*. 1. vyd. Praha: Česká společnost pro jakost, 2008. Kvalita, quality, Qualität. ISBN 9788002020899.
- [10] TŮMOVÁ, Olga. *Metrologie a hodnocení procesů*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2009. ISBN 9788073002497.
- [11] *Elektrotechnická měření*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 8073000229.
- [12] *Specifikace přístrojů a metod pro měření vysokofrekvenčního rušení a odolnosti - Část 4-2: Nejistoty, statistické hodnoty a stanovování mezí - Nejistota měřícího zařízení: ČSN EN 55016-4-2*. Ed. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.