

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE**  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Ing. Jozef Slížik

**Autoreferát dizertačnej práce**

**AUTONÓMNE MERAČE  
ELEKTROMAGNETICKÉHO POĽA**

Na získanie titulu doktor (philosophiae doctor, PhD.)

**v doktorandskom študijnom programe: 5.2.54 meracia technika**

**Bratislava, január 2016**

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Ústave Elektrotechniky, Fakulty elektrotechniky a informatiky, Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

**Predkladateľ:**                   **Ing. Jozef Slížik**  
Ústav elektrotechniky  
Fakulta elektrotechniky a informatiky, STU  
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

**Školiteľ:**                         **doc. Ing. Vladimír Jančárik, PhD.**  
Ústav elektrotechniky  
Fakulta elektrotechniky a informatiky, STU  
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

**Oponenti:**                       **prof. Ing. Ivan Kneppo, DrSc.**  
951 24 Nové Sady 240

**doc. Ing. Vladimír Slobodník, CSc.**  
Orange Slovensko, a.s.  
Metodova 6, 821 09 Bratislava

**Autoreferát bol rozoslaný dňa:** .....

**Obhajoba dizertačnej práce sa koná** .....o.....h.

**na**       Fakulte elektrotechniky a informatiky, Slovenskej technickej univerzity, adresa: Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

prof. Dr. Ing. Miloš Orave

## Obsah

Obsah.....	3
Zoznam použitých symbolov.....	4
Úvod.....	5
1 Ciele práce.....	6
2 Vplyv dĺžky snímača EM poľa na meranie.....	6
2.1 Špecifiká merania zložiek intenzity elektrického poľa pri stojatom vlnení.....	6
2.2 Špecifiká merania polí v blízkosti zdroja elektromagnetického poľa.....	8
3 Interferencia medzi snímačmi EM poľa.....	9
3.1 Vzájomná impedancia dvoch snímačov EM poľa uložených v jednej rovine.....	9
3.2 Výpočet zložiek intenzity elektrického poľa v karteziánskej súradnicovej sústave.....	11
4 Riešenie napájania sondy EM poľa.....	14
5 Hardvérový návrh sondy EM poľa.....	16
5.1 Meranie intenzity elektrického poľa navrhnutou sondou EM poľa.....	17
5.2 Numerický model merania zložiek intenzity elektrického poľa v blízkej zóne.....	20
6 Zhodnotenie dizertačnej práce.....	23

## Zoznam použitých symbolov

$d$	vzdialenosť snímačov EM poľa [m]
$\vec{E}$	vektor intenzity elektrického poľa [ V/m ]
$E_r, E_\theta, E_\phi$	komplexné amplitúdy intenzity elektrického poľa[V/m]
$f$	frekvencia [ Hz ]
$h$	polovica dĺžky dipólu [ m ]
$\vec{H}$	vektor intenzity magnetického poľa [A/m]
$i$	fázor elektrického prúdu pretekajúceho dipólom [ A ]
$L$	dĺžka dipólu $L = 2h$ [ m ]
$L_{\lambda/2}$	dĺžka polvlnového dipólu
$m$	šírka dipólu [ m ]
$M(x, y, z)$	bod pozorovania
$r$	veľkosť polohového vektora (súradnice $x, y, z$ ) [ m ]
$t$	čas [ s ]
$T$	perióda [s]
$U$	efektívna hodnota napätia [ V ]
$U_{max}$	maximálna hodnota napätia $U_{max} = \sqrt{2}U$ [ V ]
$U_{iSONDA}$	jednosmerné výstupné napätie zo sondy; index $i$ reprezentuje os ( $x, y, z$ )
$x, y, z$	súradnice v karteziánskej súradnicovej sústave
$Z$	impedancia [ $\Omega$ ]
$Z_0$	vlnová impedancia [ $\Omega$ ]
$\lambda$	vlnová dĺžka [ m ]
$\delta E_{AVG}$	relatívna chyba priemerovania navrhnutého snímača EM poľa, numerický model
$\delta E_{zdroj}$	relatívna chyba ovplyvnenia merania navrhnutým zdrojom, numerický model
$\omega$	uhlová rýchlosť $\omega = 2\pi f$ [ rad/s ]

## Úvod

V dnešnej dobe sa čoraz viac používa pojem vyžarovanie elektromagnetického (ďalej len EM) poľa nie len medzi odbornou verejnosťou, ale aj medzi laikmi. V mnohých prípadoch verejnosť zaujíma charakter prostredia, v ktorom žijú. V súčasnosti počet elektrických, resp. elektronických zariadení, ktoré využívame (od ktorých sme závislí), narastá. Vplyvom neustáleho vývoja narastá množstvo EM vyžarovania. Takéto EM žiarenie pôsobí na rôznych frekvenciách s rôznou intenzitou, či už elektrického alebo magnetického poľa. Pre meranie EM poľa v našom prípade bude najviac dôležitou veličinou vektor intenzity elektrického poľa.

Na meranie EM poľa sa používajú rôzne typy sond EM poľa. Môžeme ich rozdeliť do skupín podľa určitých špecifik. Na základe zložky EM poľa, ktorú merajú, hovoríme o sondách merajúcich intenzitu elektrického poľa a o sondách merajúcich intenzitu magnetického poľa. Na základe pracovnej vzdialenosti sondy EM poľa od zdroja EM poľa môžeme rozdeliť sondy na tie, ktoré merajú intenzitu v blízkosti zdroja EM poľa a na sondy merajúce intenzitu vo väčších vzdialenostiach od zdroja EM poľa.

V dizertačná práca sa venuje návrhu sondy EM poľa, ktorá meria intenzitu elektrického poľa v tesnej blízkosti zdroja EM poľa. Takúto sondu bude možné využiť napr. pre vyčíslenie ovplyvnenia zariadenia citlivého na EM pole, blízkym zdrojom EM poľa. Rovnako je možné pomocou navrhovanej sondy merať úroveň ožiarenia EM poľom v priestoroch, kde sa ľudia pohybujú v blízkosti rôznych zdrojov EM poľa.

Hlavnou časťou sondy je snímač EM poľa, preto bolo nevyhnutné navrhnuť snímač a analyzovať jeho vplyv na samotné meranie. Vytvorili sme analytické a numerické modely, ktoré je možné aplikovať aj na ďalšie snímače EM poľa. Ďalším dôležitým bodom, ktorému sa venuje dizertačná práca je overenie možnosti napájania sondy EM poľa priamo z meranej veličiny, vytvorenie autonómnej sondy EM poľa. Tento pojem tu vystihuje nezávislosť sondy EM poľa od externého napájania. To znamená, že sonda nesmie obsahovať napájanie vo forme batérie alebo prívodných vodičov externého zdroja, ale tento blok musí pozostávať z elektroniky, ktorá zabezpečí premenu energie EM poľa (meraného EM poľa) na napájacie napätie. Rovnako musíme zabezpečiť, aby navrhovaný zdroj dodával pre sondu napätie požadovanej úrovne a dostatočný prúd pre chod sondy. Pri použití takéhoto typu zdroja napájania bolo nevyhnutne teoreticky analyzovať vplyv napájania – odčerpávanie energie z meraného EM poľa na presnosť samotného merania.

# 1 Ciele práce

Predložená práca sa sústreďuje na splnenie nasledovných bodov:

- Analýza chýb merania poľa, ktoré sú spôsobené fyzikálnymi rozmermi sondy (snímača) elektromagnetického poľa.
- Analýza chýb merania poľa, spôsobených pridaním elementu.
- Overenie možnosti napájania sondy EM poľa priamo z meranej veličiny.
- Návrh a realizácia sondy EM poľa s minimalizovaným negatívnym vplyvom na merané elektromagnetické pole.

## 2 Vplyv dĺžky snímača EM poľa na meranie

Pri návrhu snímača EM poľa je veľmi dôležité poznať vplyv snímača na samotné meranie. Snímač EM poľa je z technologického hľadiska anténa. V našom prípade ide o krátky dipól, ktorého dĺžka je podstatne menšia ako vlnová dĺžka  $L \ll \lambda$  [6]. Na svorkách dipólov snímača dochádza vplyvom pôsobenia EM poľa k indukovaniu napätia. Veľkosť naindukovaného napätia je závislá od dĺžky použitého snímača EM poľa [1]. Zároveň dĺžka použitého snímača vnáša do merania chybu. Nastávajú dve protichodné požiadavky: čo najväčšia dĺžka snímača, aby sme dosiahli čo najväčšieho indukovaného napätia; čo najmenšia dĺžka snímača, aby sme dosiahli čo najmenšiu chybu. To znamená, že je nevyhnutné poznať závislosť medzi dĺžkou snímača a chybou, ktorej sa dopustíme týmto meraním.

### 2.1 Špecifiká merania zložiek intenzity elektrického poľa pri stojatom vlnení

EM pole sa šíri prostredím s konečnou dĺžkou, dochádza k odrazu EM poľa [1]. Stojaté vlnenie je jav ktorý nastáva, keď sa EM pole odrazí od prekážky (vodivej plochy) a vracia sa späť. Pri tomto deji dochádza k interferencií dvoch proti sebe idúcich vln, vysielanej a odrazenej vlny, rovnakej amplitúdy (v niektorých prípadoch neplatí) a frekvencie [1], [7].

Intenzitu elektrického poľa v ktoromkoľvek mieste a čase dostaneme ako výslednicu čiastkových intenzít elektrického vlnenia. Pre intenzitu elektrického poľa, tvoreného stojatým vlnením môžeme napísať rovnicu [1]:

$$\mathbf{E} = 2E_0 \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \cos \frac{2\pi t}{T} \quad (2.1)$$

Rovnica (2.1) je výslednicou pôvodnej a odrazenej EM vlny. Táto rovnica popisuje osciláciu EM vlny v čase  $t$ , ale rovnako môžeme vidieť, že výsledná intenzita elektrického poľa je závislá aj od polohy  $x$ .

Pre analýzu vplyvu dĺžky snímača na meranie sme si vytvorili dva matematické modely snímača EM poľa.

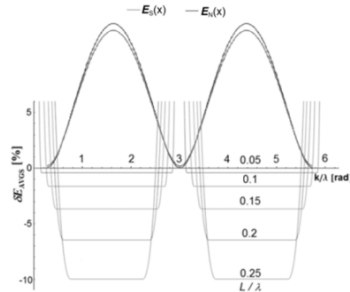
V prvom matematickom modeli sme analyzovali intenzitu elektrického poľa v mieste v ktorom by sa nachádzal bodový snímač EM poľa – skutočné rozloženie. Pri oboch modeloch nás zaujímala intenzita elektrického poľa v ľubovoľnom mieste priestoru. Preto sme pre prvý model upravili vzťah (2.1) na tvar [8]:

$$E_S(x) = 2E_0 \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \tag{2.2}$$

Za polohu bodu pozorovania  $x$  sme dosádzali hodnoty od  $x = 0,14975/2$  až po  $x = c/f$  [9]. Týmto modelom sme získali hodnoty intenzity elektrického poľa v mieste v ktorom by sa nachádzal bodový snímač EM poľa, nezaujímame sa o časovú zmenu. Časová zmena nie je v tomto prípade pre nás zaujímavá. V druhom matematickom modeli sme analyzovali intenzitu elektrického poľa v mieste v ktorom by sa nachádzal bodový snímač EM poľa o dĺžke  $L$  – spriemerované rozloženie. Pri výpočte intenzity elektrického poľa sme pri druhom modeli museli brať do úvahy dĺžku snímača  $L$ . Preto sme museli vzorec pre intenzitu elektrického poľa (2.2) doplniť o integrál po celej dĺžke snímača  $L = h/2$  [9], [8]. Dostali sme vzťah:

$$E_N(x) = 2E_0 \int_{x+h/2}^{x-h/2} \sin \frac{2\pi x}{\lambda} dx \tag{2.3}$$

Z hodnôt intenzít elektrického poľa  $E_S(x)$  a  $E_N(x)$  sme vypočítali relatívnu chybu priemerovania  $\delta E_{AVGS}$ , ktorá vzniká pri použití nami navrhovaného snímača EM poľa. Tento snímač EM poľa priemeruje získané hodnoty intenzity elektrického poľa na svojom objeme. V našom prípade priemeruje na svojej dĺžke  $L$ . Táto relatívna chyba sa správa ako systematická chyba preto ju vieme korigovať. Na obr. 2.2, je vo vrchnej časti zobrazený priebeh stojateho vlnenia pri dĺžke snímača  $L = 0,3m$ . V spodnej časti obr. 2.2 môžeme vidieť zmenu chyby  $\delta E_{AVGS}$  v závislosti od dĺžky snímača  $L$ . Vplyvom zmenšovania dĺžky snímača  $L$  relatívna chyba priemerovania klesá. Na obr. 2.2 je dĺžka snímača previazaná s vlnovou dĺžkou.



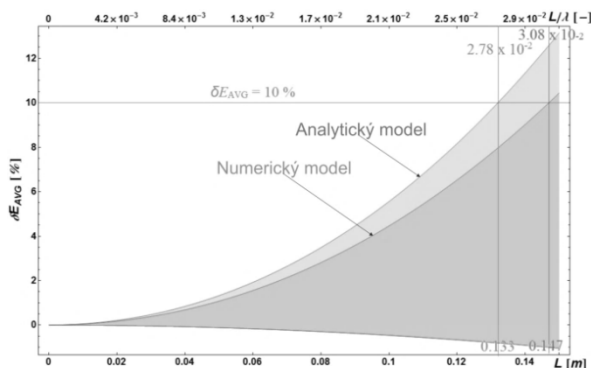
**Obr. 2.1** Relatívna chyba  $\delta E_{AVGS}$  snímača EM poľa

Z analyzovaných dát vyplynulo, že chyba  $\delta E_{AVGS}$  je priamo ovplyvnená dĺžkou snímača EM poľa. A preto, ak chceme merať intenzitu elektrického poľa stojateho vlnenia s čo najväčšou presnosťou, potrebujeme snímač EM poľa, ktorého dĺžka bude vzhľadom na vlnovú dĺžku, podstatne menšia, teda  $L \ll \lambda$ . V ideálnom prípade by mala byť dĺžka snímača EM poľa infinitezimálna, avšak hodnota indukovaného napätia na svorkách takéhoto snímača by bola tak tiež nulová. Preto musíme zvoliť takú dĺžku snímača EM poľa, pre ktorú bude chyba  $\delta E_{AVGS}$  v primeranej úrovni a súčasne sa na tejto dĺžke snímača naindukovalo dostatočné napätie. Ak si stanovíme, že chceme merať s chybou  $\delta E_{AVGS}$  maximálne 4 %, potrebujeme snímač EM poľa, ktorého pomer  $l/\lambda$  bude menší ako 0,15.

## 2.2 Špecifiká merania polí v blízkosti zdroja elektromagnetického poľa

V dizertačnej práci je podrobne opísaný postup vytvorenia analytického a numerického modelu pre výpočet chyby priemerovania snímača v blízkosti EM poľa. Dôvodom na analýzu intenzity zložiek elektrického poľa v blízkej zóne pomocou dvoch rozdielnych metód, bolo vytvorenie modelu, ktorý bude čo najpresnejšie popisovať charakter správania sa relatívnej chyby priemerovania snímača EM poľa. Vytvorené metódy potvrdili závislosť tejto chyby od dĺžky snímača EM poľa. Priebehy na obr. 2.3 sú získané z dát analytického a numerického modelu. Ako môžeme vidieť, charakter relatívnej chyby priemerovania snímača EM poľa je pre obidva modely rovnaký. EM pole malo nasledovné parametre:

- frekvencia zdroja EM poľa bola 100 MHz
- zdroj EM poľa bol elektricky krátky dipól s dĺžkou  $L_Z = 0,1$  m
- zdroj EM poľa bol v strede napájaný prúdom
- vzdialenosť bodu pozorovania od zdroja EM poľa bola  $r$



Obr. 2.2 Závislosť  $\delta E_{AVG}$  od dĺžky snímača EM poľa



Pri analytickom a numerickom modeli sme previazali dĺžku snímača EM poľa s vlnovou dĺžkou. Vďaka takémuto prístupu vieme pomocou vytvoreného modelu zovšeobecniť relatívnu chybu priemerovania snímača EM poľa, ktorá vzniká pri meraní v blízkej zóne, pre rôzne frekvencie. Pri frekvencií 100 MHz potrebujeme navrhnuť snímač EM poľa tak, aby sme získali čo najrelevantnejšiu informáciu o intenzite elektrického poľa. Ak chceme merať s chybou  $\delta E_{AVGA}$  maximálne 10 % pri frekvencií 100 MHz z numerického modelu vychádza dĺžka snímača EM poľa maximálne  $L = 0,0147$  m. Svorkové napätie naprázdno na snímači EM poľa je závislé hlavne od dvoch parametrov, veľkosti zložky intenzity elektrického poľa a od dĺžky snímača EM poľa [3]. Zanedbajme ostatné vplyvy, ktoré ovplyvňujú svorkové napätie naprázdno, ako odpor súčiastok snímača (schottkyho diódy a rezistorov), efektívna dĺžka snímača EM poľa a pod. Veľkosť svorkového napätia naprázdno na snímači o dĺžke  $L = 0,0147$  m pri pôsobení homogénneho EM poľa s intenzitou zložky  $E_r = 10$  V/m by bolo približne 0,147 V. Hodnota naindukovaného napätia dosahuje pomerne nízke hodnoty, preto stojí za zváženie voľba vhodnej dĺžky snímača EM poľa na úkor relatívnej chyby priemerovania snímača EM poľa. Ako sme spomínali už na začiatku kapitoly, previazaním dĺžky snímača s vlnovou dĺžkou (obr. 2.3 horná  $x$ -ová súradnica) vieme vytvorené modely aplikovať pre rôzne frekvencie nie len pre frekvenciu 100 MHz.

### 3 Interferencia medzi snímačmi EM poľa

Sonda EM poľa bude pozostávať zo snímačov EM poľa, ktoré budú merať jednotlivé zložky intenzity elektrického poľa v blízkej zóne. Jeden snímač EM poľa nám meria práve jednu zložku intenzity elektrického poľa. To ktorú zložku intenzity elektrického poľa meriame je závislé od natočenia snímača EM poľa voči zdroju EM poľa. Preto, ak chceme súčasne merať 2 (3) zložky intenzity elektrického poľa, potrebujeme 2 (3) snímače EM poľa. Preto sa musíme venovať aj vzájomnému ovplyvňovaniu snímačov EM poľa.

Pre výpočty pri návrhu sondy je nevyhnutné vyjadriť zložky intenzity elektrického poľa v karteziánskej súradnicovej sústave. V dostupnej svetovej literatúre je nemožné nájsť vyjadrenie týchto zložiek v karteziánskej súradnicovej sústave, preto sme sa rozhodli urobiť toto vyjadrenie sami.

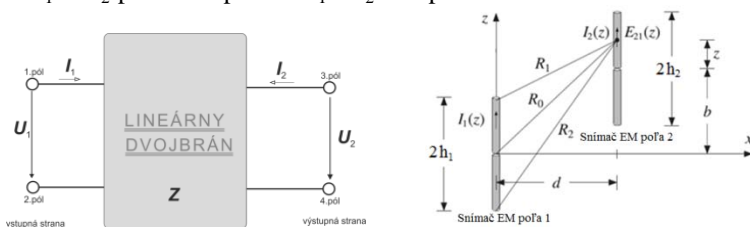
#### 3.1 Vzájomná impedancia dvoch snímačov EM poľa uložených v jednej rovine

Na základe teórie antén vieme o snímači EM poľa povedať, že jeho parametre sú závislé od jeho vlastného prúdového rozloženia a súčasne aj od prúdového rozloženia snímačov EM poľa, ktoré sa nachádzajú v jeho bezprostrednej blízkosti [1], [3]. Ovplyvňovaním snímačov EM poľa, ktoré sa nachádzajú blízko pri sebe, dochádza k zaneseniu chyby do výsledkov

získaných z merania zložiek intenzity elektrického poľa pomocou sondy EM poľa v ktorej sa tieto snímače nachádzajú.

Predstaviteľom vzájomného pôsobenia viacerých dipólov je vzájomná impedancia, ktorá pôsobí na vstupnú impedanciu snímačov. Vstupná impedancia snímača EM poľa v prítomnosti ďalších snímačov EM poľa alebo prekážok, ktoré sa nachádzajú v jeho bezprostrednej blízkosti, je závislá na vlastnej impedancii a vzájomnej impedancii medzi jednotlivými snímačmi EM poľa.

Pre analýzu tohto problému sme urobili zjednodušenie, uvažovali sme systém len s dvoma snímačmi EM poľa. Takýto systém môže byť reprezentovaný pomocou lineárneho dvojbránu, ďalej už len dvojbrán [2], [10]. Na obr. 3.1a môžeme vidieť dvojbrán kde sú vyjadrené jednotlivé napätia  $U_1$  a  $U_2$  pomocou prúdov  $I_1$  a  $I_2$  a impedancie  $Z$ .



**Obr. 3.1** a) Náhrada dvoch snímačov EM poľa lineárnym dvojbránom,  
b) Rozloženie snímačov EM poľa v rovine [11]

Dvojbrán uvedený na obr. 3.1 vieme popísať pomocou impedančnej matice dvojbránu [13]:

$$\begin{aligned} \mathbf{U} &= \mathbf{Z} \cdot \mathbf{I} \\ U_1 &= Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 \\ U_2 &= Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2 \end{aligned} \quad (3.1)$$

Snímač EM poľa mal dĺžku  $L = 2h$ . Vzájomná impedancia na základe vstupného prúdu  $I_1$  z prvého snímača EM poľa použitím vzťahu pre prenosovú impedanciu na výstupe bola [11]:

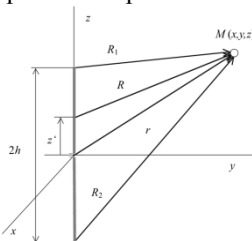
$$Z_{21} = -\frac{1}{I_{1i}I_{2i}} \int_{-h}^h E_{z21}(z') I_2(z') dz' \quad (3.2)$$

Majme snímače EM poľa rozmiestnené v rovine ako je zobrazené na obr. 3.1b. Pre takúto geometriu snímačov EM poľa existuje vzájomná impedancia vždy, avšak jej veľkosť závisí od ich vzájomnej vzdialenosti [11]. Pri dostatočne veľkých vzdialenostiach snímačov EM poľa od seba si môžeme dovoliť vzájomnú impedanciu zanedbať. Zjednodušene môžeme povedať, že vzájomná impedancia existuje vtedy, ak elektrické pole tvorené prvým snímačom EM poľa, pôsobí na druhý snímač EM poľa, teda snímače EM poľa sú v bezprostrednej blízkosti.

Z vytvorených analytických modelov, vieme že ideálny snímač EM poľa je bodový snímač. Teda ak dĺžka snímača EM poľa je nekonečne malá [11]. Preto pri meraní zložiek intenzity elektrického poľa súčasne viacerými snímačmi EM poľa je nevyhnutné umiestniť snímače čo najviac do seba tak, aby celkový rozmer snímačov bol čo najmenší. Tým splníme podmienku čo najmenších rozmerov sondy EM poľa, avšak vplyvom zmenšenia rozmerov sondy EM poľa, dochádza aj k zmenšeniu vzájomných vzdialeností medzi snímačmi EM poľa. Vplyvom zmenšovania vzájomnej vzdialenosti snímačov EM poľa dochádza k zmene vzájomnej impedancie snímačov. Preto je nevyhnutné pri návrhu sondy EM poľa zvoliť vhodný kompromis medzi vzájomnými vzdialenosťami snímačov EM poľa a medzi vzájomnou impedanciou.

### 3.2 Výpočet zložiek intenzity elektrického poľa v karteziánskej súradnicovej sústave

V svetovej odbornej literatúre sa pre výpočet zložiek intenzity elektrického poľa používa *valcová súradnicová sústava*, [1], [3], [4]. Ak chceme zložky  $\vec{E}$  vyjadrené vo valcovej súradnicovej sústave vyjadriť pre súradnicový systém  $xyz$ , teda v *karteziánskej súradnicovej sústave* musíme prepočítať tieto zložky pomocou transformačných vzťahov. Problémom takéhoto riešenia je úplne zlý výsledok. Preto sme sa rozhodli vyjadriť intenzitu zložiek elektrického poľa v karteziánskej súradnicovej sústave sami. Takéto usporiadanie má význam hlavne ak sa zameriame najmä na radiálne zložky EM poľa [12], teda v našom prípade kolmých senzorov. Okrem toho výpočet je možné vykonať bez aproximácie v uzavretej forme. Pre výpočet zložiek intenzity elektrického poľa snímača EM poľa, reprezentovaným elektrickým dipólom, v blízkej zóne od zdroja EM poľa, majme usporiadanie podľa obr. 3.2.



**Obr. 3.2.** Geometria snímačov EM poľa

Bod pozorovania  $M(x,y,z)$  je umiestnený v blízkej zóne od snímača EM poľa. Súradnice bodu pozorovania  $M$  sú  $(x, y$  a  $z)$ . Uvažujeme snímač EM poľa, ktorého polomer je zanedbateľne malý, preto pre súradnice bodov na snímači EM poľa platí  $x' = y' = 0$ . Jediná nenulová súradnica na snímači je  $z'$  [12].

Oproti výpočtom v literatúre [1] a [3] nebudeme robiť žiadne zjednodušenie týkajúce sa geometrie problému. Veľkosti polohových

vektorov, ktoré vyjadrujú vzájomnú polohu medzi bodom pozorovania  $M(x,y,z)$  a jednotlivými miestami na snímači EM poľa obr. 3.2, vyjadríme nasledovne:

$$\begin{aligned}
 r &= \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\
 R &= \sqrt{x^2 + y^2 + (z' - z)^2} \\
 R_1 &= \sqrt{x^2 + y^2 + (h - z)^2} \\
 R_2 &= \sqrt{x^2 + y^2 + (h + z)^2}
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

Pre snímač EM poľa, ktorý je reprezentovaný elektrickým dipólom, ktorý má konečnú dĺžku  $L=2h$ , s použitím komplexného zobrazenia platí sínusové prúdové rozloženie, obr. 3.2. Pre sínusové rozloženie prúdu môžeme napísať rovnice:

$$\begin{aligned}
 I_z(z') &= I_0 \sin(k(h - z')) \text{ ak } z > 0 \\
 I_z(z') &= I_0 \sin(k(h + z')) \text{ ak } z < 0
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

Komplexnú amplitúdu intenzity elektrického poľa vypočítame pomocou intenzity magnetického poľa a použitím Maxwellových rovníc, odkiaľ pre komplexnú amplitúdu intenzity elektrického poľa podľa [1] platí

$$\vec{E} = \frac{1}{j\omega\epsilon} \text{rot } \vec{H} \tag{3.5}$$

V ďalšom kroku si vyjadríme jednotlivé zložky intenzity elektrického poľa v karteziánskej súradnicovej sústave, do rovnice (3.5) dosadíme komplexný vektorový potenciál, dostávame rovnice popisujúce tri komponenty elektrického poľa [12]:

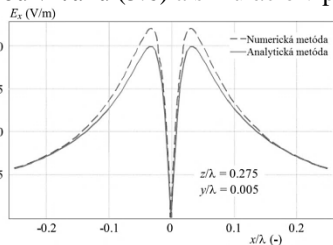
$$\begin{aligned}
 E_x &= \frac{1}{j\omega\epsilon} \left( \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) = j \frac{kI_0}{4\pi\omega\epsilon} \frac{x}{x^2 + y^2} \left\{ (h - z) \frac{e^{-jkR_1}}{R_1} \right. \\
 &\quad \left. - (h + z) \frac{e^{-jkR_2}}{R_2} + 2z \frac{e^{-jkr}}{r} \cos(kh) \right\}
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

$$\begin{aligned}
 E_y &= \frac{1}{j\omega\epsilon} \left( \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) = j \frac{kI_0}{4\pi\omega\epsilon} \frac{y}{x^2 + y^2} \left\{ (h - z) \frac{e^{-jkR_1}}{R_1} \right. \\
 &\quad \left. - (h + z) \frac{e^{-jkR_2}}{R_2} + 2z \frac{e^{-jkr}}{r} \cos(kh) \right\}
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

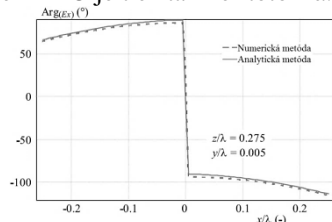
$$\begin{aligned}
 E_z &= \frac{1}{j\omega\epsilon} \left( \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) \\
 &= j \frac{kI_0}{4\pi\omega\epsilon} \left\{ \frac{e^{-jkR_1}}{R_1} + \frac{e^{-jkR_2}}{R_2} \right. \\
 &\quad \left. - 2z \frac{e^{-jkr}}{r} \cos(kh) \right\}
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

Rovnice (3.6), (3.7) a (3.8) vyjadrujú intenzitu zložiek elektrického poľa v blízkej zóne. V týchto rovniciach predpokladáme sínusové rozloženie prúdu na snímači EM poľa. Rovnica (3.8) vyjadrujúca zložku  $E_z$  v karteziánskej súradnicovej sústave má rovnaký tvar ako súradnica  $E_z$  vo valcovej súradnicovej sústave (pravdaže, ak nepozeralme na vyjadrenie polohových vektorov).

Pre verifikáciu uvedených rovníc sme tieto zložky počítali pomocou numerickej metódy, kde sme v programe FEKO vytvorili model, podľa ktorého sme overovali správnosť získaných rovníc. Ako zdroj EM poľa sme použili polvlnový dipól so zanedbateľným polomerom. Na obr. 3.3 vidíme porovnanie amplitúd a fáz zložky  $E_x$  pre blízku zónu, získaných pomocou numerickej metódy a hodnoty  $E_x$  získané pomocou rovnice (3.6). Na obr. 3.3a vidíme, že priebehy zložky  $E_x$  sú takmer totožné čo sa týka tvaru a hodnoty. Rovnako z obr. 3.3b vidno, že tvar a hodnota fázy zložky  $E_x$  získanej pomocou vzťahu (3.6) a simulácie v programe FEKO je tiež takmer totožná.

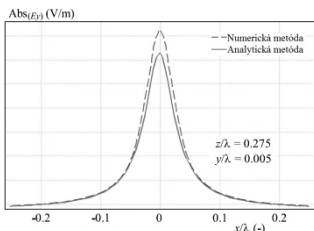


a)

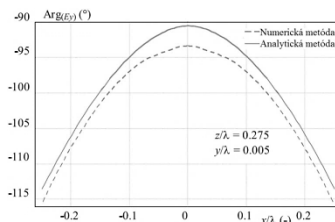


b)

**Obr. 3.3.** a) Porovnanie amplitúd zložky  $E_x$ ; b) Porovnanie fáz zložky  $E_x$  [12]



a)



b)

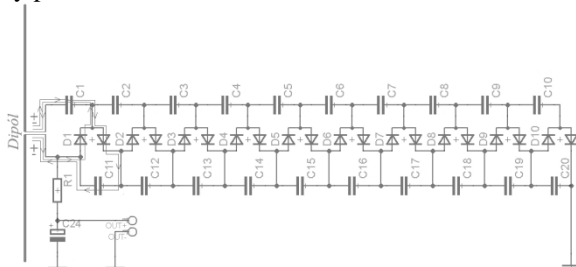
**Obr. 3.4.** a) Porovnanie amplitúd zložky  $E_y$ ; b) Porovnanie fáz zložky  $E_y$  [12]

Rovnako sú podobné aj amplitúdy a fázy zložky  $E_y$ , získané numerickou metódou so zložkami  $E_y$  získanými výpočtom podľa vzťahu (3.7), porovnanie zložky  $E_y$  vidíme na obr. 3.4. Pomocou odvodených vzťahov vieme vyjadriť zložky intenzity elektrického poľa vytvoreného snímačom EM poľa 1, ktoré vznikajú na snímači EM poľa 2 pri malých vzájomných vzdialenostiach snímačov v sonde EM poľa.

#### 4 Riešenie napájania sondy EM poľa

Na základe požiadaviek vyplávajúcich z téz dizertačnej práce sme sa rozhodli navrhnuť taký zdroj napájania pre sondu EM poľa, ktorý bude spĺňať podmienku autonómnosti sondy EM poľa. Preto sme sa venovali návrhu elektroniky pre zdroj, ktorý odoberá energiu z meraného EM poľa pomocou dipólu. Dipól je umiestnený v blízkej zóne od zdroja EM poľa. V tejto oblasti dosahujú zložky intenzity elektrického poľa vysoké hodnoty [1], [3].

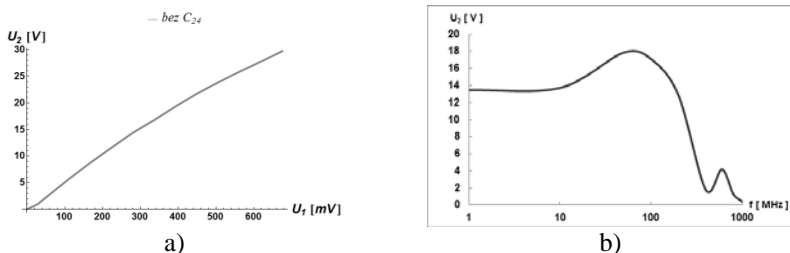
Samotný dipól nie je zdrojom napájania pre sondu EM poľa s vhodnými parametrami, preto sme museli navrhnuť elektronické komponenty, ktoré zabezpečili adekvátne napájanie pre sondu. Na zvýšenie indukovaného napätia na svorkách dipólu sme sa rozhodli pripojiť na výstup z dipólu násobič napätia [16], [17], ktorý pozostával z kombinácie diód a kondenzátorov, obr. 4.1.



Obr. 4.1. Schéma násobiča napätia s dipólom na vstupe

V našom prípade ide o 10 stupňový násobič, výstupné napätie zodpovedá vzťahu:

$$U_{\text{výstup}} = n\sqrt{2}u - nU_{T0} = 10\sqrt{2}u - 10U_{T0} \quad (4.1)$$



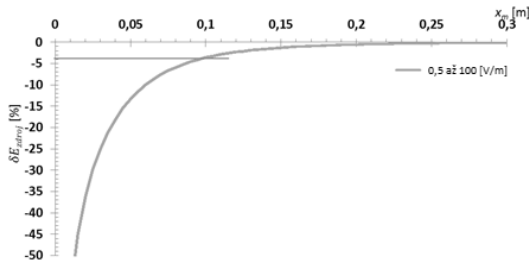
Obr. 4.2. a) Závislosť výstupného napätia  $U_2$  od indukovaného vstupného napätia  $U_1$  bez  $C_{24}$ ;  
b) Závislosť výstupného napätia  $U_2$  od frekvencie vstupného signálu

Na obr. 4.2a je závislosť výstupného napätia od indukovaného vstupného napätia nezaťaženého násobiča napätia. Z grafu obr. 4.2a vidno, že ide takmer o lineárnu závislosť.

Výstupné jednosmerné napätie z násobiča dosahuje hodnoty, ktoré nie sú vhodné na napájanie sondy EM poľa, ale predstavuje dostatočnú zásobu energie pre napájanie senzora EM poľa. Na úpravu veľkosti napätia z násobiča sme museli použiť DC/DC menič, ktorý znížil hodnotu napätia na požadovanú úroveň. Po odskúšaní viacerých DC/DC meničov sme sa rozhodli pre DC/DC menič od firmy *Linear Technology*, konkrétne *LTC3639* [18]. Pre tento typ meniča sme sa rozhodli z dôvodu jeho veľkej účinnosti (efektívnosti). Výrobca udáva účinnosť DC/DC meniča až 70 % čo je jeho veľkou výhodou oproti ostatným skúšaním meničom.

Navrhnutý zdroj odoberá energiu z meraného EM poľa pomocou elektricky krátkeho dipólu, preto je nevyhnutné analyzovať vplyv navrhnutého zdroja napájania na merané EM pole. Dôležitým údajom bude pre nás vzdialenosť od dipólu zdroja napájania (pre prehľadnosť nazveme tento dipól - anténa zdroja) po ktorej dochádza k obnoveniu vlastností meraného EM poľa. Preto si vytvoríme numerickú simuláciu v programe FEKO. Simulované EM pole bolo vytvorené planárnou vlnou. Ktorá má tú vlastnosť, že vo všetkých miestach okolo zdroja EM poľa je intenzita elektrického poľa rovnaká, konštantná. Intenzita elektrického poľa EM poľa vytvoreného planárnou vlnou bola  $E_1 = \{0,5; 1; 3; 5; 10; 20; 40; 60; 80; 100\}$  V/m. Pri planárnej vlne je dôležité správne natočenie zdroja EM poľa v priestore. Vzdialenosť na, ktorej sme sledovali ovplyvnenie EM poľa navrhovaným zdrojom napájania bola  $\lambda / 10$ . Na tejto vzdialenosti sme zisťovali intenzitu elektrického poľa  $E_2$ . Relatívnu chybu ovplyvnenia meraného EM poľa navrhovaným zdrojom napájania sme získali pomocou vzťahu:

$$\delta E_{zdroj} = \frac{E_2 - E_1}{E_1} 100 \text{ [%]} \quad (4.2)$$



**Obr. 4.3.** Relatívna chyba ovplyvnenia meraného EM poľa navrhovaným zdrojom pri  $Z=75 \Omega$

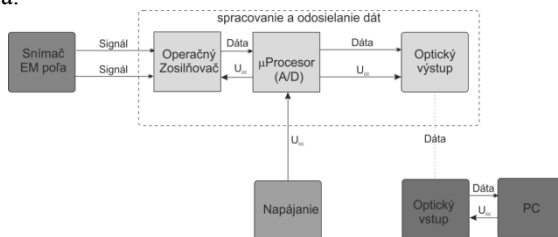
Vykreslením chyby  $\delta E_{zdroj}$  pre zaťažovaciu impedanciu  $Z=75 \Omega$  do grafu, sme získali závislosť chyby  $\delta E_{zdroj}$  od vzdialenosti  $x_m$  od navrhovaného zdroja napájania, obr. 4.3. Z grafu vidno, že rozdiel chyby  $\delta E_{zdroj}$  v závislosti

od vzdialenosti od zdroja napájania bol pre všetky hodnoty intenzity elektrického poľa  $E_1$  zanedbateľný. Je to spôsobené tým, že sme ako zdroj EM poľa použili planárnu vlnu.

Ak si stanovíme, že maximálna prípustná chyba  $\delta E_{zdroj}$  je pre nás napríklad 4 %, tak minimálna vzdialenosť od navrhovaného zdroja napájania musí byť  $x_m = 9,5$  cm. Pri chybe  $\delta E_{zdroj} = 1$  % to je vzdialenosť  $x_m = 16,5$  cm. Bližšia analýza chyby spôsobenej navrhnutým zdrojom napájania je uvedená v dizertačnej práci. Rovnako je v nej vyčíslená táto chyba priamo z reálneho merania.

## 5 Hardvérový návrh sondy EM poľa

Navrhovaná sonda EM poľa sa skladá z blokov, pričom každý blok má svoju špecifickú funkciu. Na obr. 5.1 vidíme blokovú schému nami navrhutej sondy EM poľa.



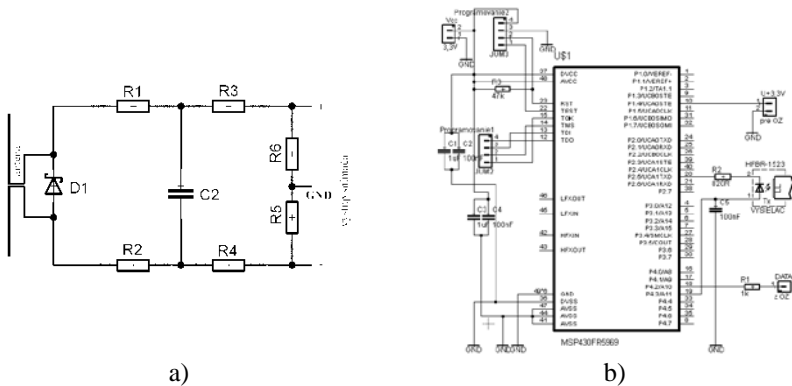
Obr. 5.1. Bloková schéma sondy EM poľa

Sonda EM poľa sa skladá zo 4 hlavných častí: *snímač EM poľa*, časť *spracovania a odosielania dát*, *napájanie* a *optický prijímač*. Každá časť musí zabezpečiť správnu funkciu sondy EM poľa tak, aby boli splnené požiadavky na minimalizáciu chýb merania.

Hlavnými úlohami *snímača EM poľa* je prevod meranej zložky intenzity elektrického poľa na indukované striedavé napätie na svorkách snímača a úprava tohto napätia pre ďalšie spracovanie. Na základe analýzy sme sa rozhodli pre usmernenie napätia použiť paralelný diódový detektor. Na obr. 5.2a je navrhnutý obvod pre snímanie svorkového napätia s paralelným diódovým detektorom. Ako paralelný diódový detektor sme použili schottkyho diódu *HSMS-2851*,  $D_1$ .

Do snímača EM poľa sa môže dostať nízko-frekvenčné rušenie (ďalej už len NF) sieťovej frekvencie, preto sme museli paralelný diódový detektor doplniť o filter [5], [14]. Toto NF rušenie môže vniknúť do schottkyho diódy, ktorá usmerní tento signál a ten by bol pričítaný k meranému signálu. Prvky  $R_3$ ,  $R_4$  a  $C_1$  zabraňujú vniknutiu nízko-frekvenčného a vysoko-frekvenčného rušenia do schottkyho diódy. Tým sme vylúčili detegovanie rušivých napätí a následné ovplyvňovanie výsledku merania. Schottkyho dióda potrebuje pracovať do definovanej záťaže, na to sme použili prvky  $R_1$ ,  $R_2$  a  $C_1$ , [15]. Výstupom zo snímača je symetrické jednosmerné napätie  $U_+$  a  $U_-$ .





Obr. 5.2. a) Schéma zapojenia snímača EM poľa; b) Schéma zapojenia mikontroléra

Úlohou časti *spracovania a odosielania dát* je zabezpečiť zosilnenie signálu zo snímača EM poľa pomocou operačného zosilňovača (ďalej už len OZ) *MAX4208*. Výstup z OZ privádzame na vstup mikontroléra. Ako riadiaci prvok sme si vybrali mikrokontrolér od firmy Texas Instruments *MSP430FR5969*, ktorý dokáže pracovať v rôznych Low Power Módoch (LPM) a tým sme dokázali rôzne upravovať spotrebu. Rada mikontrolérov *MSP430* je špeciálne navrhnutá pre nízky výkon, takže je vhodná pre zariadenia napájané z batérie a z tohto dôvodu je ideálna pre našu sondu EM poľa. Pomocou analógovo digitálneho prevodníka (ďalej už len A/D prevodník) prevádzame analógovú hodnotu na digitálnu hodnotu - kód.

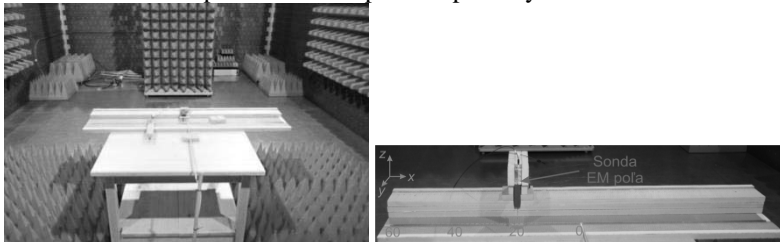
Dáta získané z merania zložiek intenzity elektrického poľa snímačom EM poľa a prevedené pomocou mikontroléra na digitálnu hodnotu prenášame do PC pre ďalšie spracovanie. Ak by sme použili na prenos údajov prípojné vodiče, vnesieme do merania ďalšiu chybu. Prípojné (dátové) vodiče predstavujú ďalšie dipóly, vložené do meraného EM poľa. Na týchto vodičoch by sa vplyvom EM poľa začal indukovať elektrický prúd a tento prúd by následne vytvoril vo svojom okolí EM pole, ktoré by pôsobilo na merané EM pole. Preto sme sa rozhodli na prenos údajov využiť optické vodiče. Nakoľko neobsahujú žiadne kovové časti, nedochádza k ovplyvňovaniu meraného EM pola od prípojných vodičov.

Na opačnej strane prenosového kanála je pripojený *optický prijímač*, ktorý prevádza vstupný optický signál na napätie. Získané údaje sa následne vyhodnocujú pomocou počítača (ďalej už len PC).

### 5.1 Meranie intenzity elektrického poľa navrhnutou sondou EM poľa

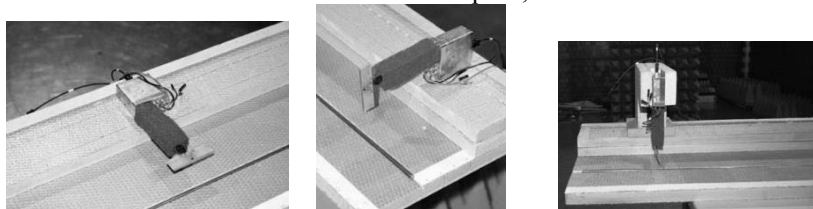
Meranie sme robili v semi-anechoickej kabíne. Dôvod prečo sme meranie vykonávali v kabíne je ten, že sme chceli porovnať výsledky získané z merania s výsledkami zo simulácie. Na obr. 5.3a vidíme meracie prostredie, kde v popredí na stole je umiestnený prípravok, ktorý slúži ako zdroj EM

poľa. Prípravok pozostáva z polvlnného dipólu umiestneného do extrudovaného polystyrénu. Na podlahu sme umiestnili niekoľko absorberov, aby sme zamedzili zrkadleniu polvlnového dipólu od podlahy.



**Obr. 5.3.** a) Semi-anechoická komora v ktorej bolo vykonané meranie intenzity elektrického poľa  
b) Detail prípravku ( s polvlnným dipólom) s polohovaním sondy EM poľa po prípravku

Merali sme intenzitu zložiek elektrického poľa zdroja EM poľa, ktorým bol polvlnový dipól. Intenzitu elektrického poľa sme merali pomocou navrhnutej sondy EM poľa, ktorú sme polohovali v rôznych vzdialenostiach od zdroja EM poľa. Vytvorený prípravok nám dovoľoval pohybovať sondou EM poľa v troch osiach  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , obr. 5.3b. Tým sme získali polohu stredu snímača EM poľa  $[x; y; z]$  v cm. Po zmene polohy sondy EM poľa v osiach  $y$  a  $z$  ostávali tieto hodnoty rovnaké a menili sme už len os  $x$ . Hodnota polohy sondy EM poľa v osi  $x$  sa menila smerom od stredu ku kraju polvlnového dipólu. Intenzitu elektrického poľa sme merali len na jednej polovici polvlnového dipólu (na jednom ramene), pretože pole polvlnového dipólu je symetrické. V strede polvlnového dipólu bola nulová hodnota osi  $x$  a na konci dipólu bola hodnota osi  $x$  60 cm. Sondou EM poľa sme merali samostatne 3 zložky intenzity elektrického poľa  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$ . Ako si môžeme všimnúť zložky intenzity elektrického poľa pre ľahšie spracovanie a porovnanie uvádzame v karteziánskej súradnicovej sústave. Pre každú zložku intenzity elektrického poľa sme museli vhodne natočiť snímač EM poľa, obr. 5.5.

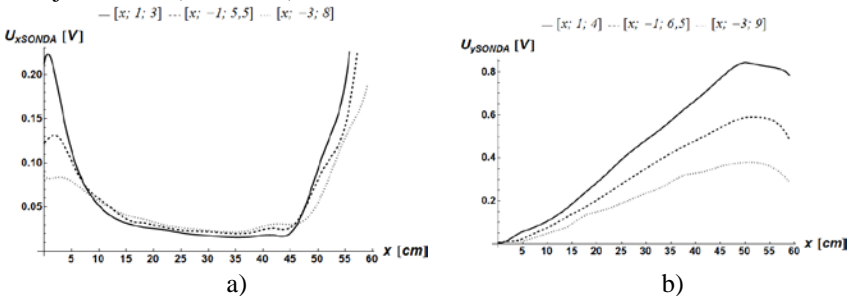


a) meranie zložky  $E_x$       b) meranie zložky  $E_y$       c) meranie zložky  $E_z$   
**Obr. 5.4.** Poloha sondy EM poľa pri meraní jednotlivých zložiek intenzity elektrického poľa

Na svorkách dipólu snímača EM poľa sa vplyvom pôsobenia intenzity elektrického poľa indukuje napätie. Dĺžka dipólu snímača EM poľa bola  $L = 0,06$  m. Výstupom zo snímača sú symetrické jednosmerné napätia, ktoré sú cez diferenciálny zesilňovač zosilnené so zosilnením  $A_U = 2$ . Táto hodnota napätia je prevedená na digitálnu hodnotu (kód) a posielať do PC cez optický

kábel, kde sa spracuje a zobrazí. Túto hodnotu napätia sme si označili ako  $U_{\text{SONDA}}$ .

Najprv sme merali zložky intenzity elektrického poľa  $E_x$ , obr. 5.5a, ktorým zodpovedal výstup zo sondy EM poľa  $U_{x\text{SONDA}}$ . Meranie sme robili pre tri rozdielne polohy snímača EM poľa:  $[x; 1; 3]$ ,  $[x; -1; 5,5]$  a  $[x; -3; 8]$  v cm. Hodnota polohy sondy EM poľa v osi  $x$  sa menila smerom od stredu (0 cm) ku kraju polvlnového dipólu (60 cm). Z obr. 5.6a je vidno, že zmenou vzdialenosti sondy EM poľa od zdroja EM poľa, polvlnovým dipólom, sa mení hodnota výstupného napätia sondy  $U_{x\text{SONDA}}$ . Čím sme ďalej od zdroja EM poľa tým je napätie  $U_{x\text{SONDA}}$  menšie. Na grafe obr. 5.6a si môžeme všimnúť, že pri meraní zložky intenzity elektrického poľa  $E_x$ , boli najvyššie hodnoty napätia, obr. 5.6a, namerané pri strede polvlnového dipólu ( $x = 0$  cm) a na jeho konci ( $x = 60$  cm).

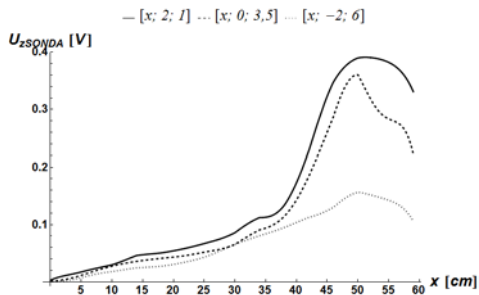


Obr. 5.5. a) Meranie zložky  $E_x$  b) Meranie zložky  $E_y$

V ďalšom kroku sme si zmerali zložky intenzity elektrického poľa  $E_y$ , obr. 5.5b, ktorým zodpovedal výstup zo sondy EM poľa  $U_{y\text{SONDA}}$ . Meranie sme znova robili pre tri rozdielne polohy snímača EM poľa:  $[x; 1; 4]$ ,  $[x; -1; 6,5]$  a  $[x; -3; 9]$  v cm. Hodnota polohy sondy EM poľa v osi  $x$  sa menila znova smerom od stredu (0 cm) ku kraju polvlnového dipólu (60 cm). Pri meraní intenzity elektrického poľa  $E_y$  sa hodnota napätia  $U_{y\text{SONDA}}$  menila inak ako pri meraní  $E_x$ . Čím sme boli ďalej od stredu polvlnového dipólu tým bola hodnota napätia  $U_{y\text{SONDA}}$  väčšia, obr. 5.6b. Pri konci dipólu začalo napätie  $U_{y\text{SONDA}}$  mierne klesať, najväčšie bolo v strede polvlnového dipólu a smerom ku koncu dipólu klesalo. Na grafe obr. 5.6b si môžeme všimnúť, že pri meraní zložky intenzity elektrického poľa  $E_y$ , boli najvyššie hodnoty napätia obr. 5.6b namerané pri vzdialenosti od stredu polvlnového dipólu  $x = 50$  cm. Táto vzdialenosť bola pri všetkých polohách snímača EM poľa rovnaká.

V poslednom kroku sme merali zložku intenzity elektrického poľa  $E_z$ , obr. 5.5c. Výstup zo sondy EM poľa bol  $U_{z\text{SONDA}}$ . Poloha snímača EM poľa bola:  $[x; 2; 1]$ ,  $[x; 0; 3,5]$  a  $[x; -2; 6]$  v cm. Hodnota polohy sondy EM poľa v osi  $x$  bola rovnaká ako pri meraní zložiek  $E_x$  a  $E_y$ . Pri pohľade na obr. 5.6, si môžeme všimnúť, že pri meraní zložky intenzity elektrického poľa  $E_z$  sa hodnota napätia na výstupe sondy  $U_{z\text{SONDA}}$  zvyšovala pomalšie ako pri napätí

$U_{\text{YSONDA}}$ , obr. 5.6b. Na grafe obr. 5.6 môžeme pozorovať, že pri meraní zložky intenzity elektrického poľa  $E_z$ , boli najvyššie hodnoty napätia obr. 5.6, namerané opäť pri vzdialenosti od stredu polvlnového dipólu  $x = 50$  cm. Táto vzdialenosť bola pri všetkých polohách snímača EM poľa voči polvlnovému dipólu rovnaká.



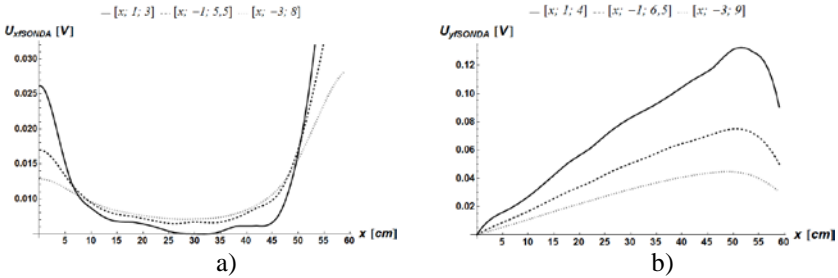
Obr. 5.6. Meranie zložky  $E_z$

## 5.2 Numerický model merania zložiek intenzity elektrického poľa v blízkej zóne

Pre porovnanie výsledkov získaných pomocou merania sme si vytvorili numerický model v programe FEKO.

Základné parametre modelu boli rovnaké ako pri meraní. V programe FEKO sme si vytvorili polvlnový dipól o dĺžke  $L_{\lambda/2}$ , ktorý bol v strede napájaný napäťovým zdrojom 0,1834425 V. Dipól, ktorý reprezentoval snímač EM poľa mal dĺžku  $L$  a v jeho strede bola záťaž  $Z = 150$  k $\Omega$ . Táto hodnota zodpovedá reálnej hodnote impedancie záťaže snímača EM poľa. Pri simulácií bol v numerickom modeli vždy len jeden snímač EM poľa, natočený podľa toho, ktorú zložku intenzity elektrického poľa sme simulovali. Indukované napätie na snímači EM poľa sme simulovali v rovnakých miestach ako tomu bolo pri reálnom meraní.

Najprv sme numerickým modelom simulovali zložky intenzity elektrického poľa  $E_x$ . Výstupom zo snímača EM poľa bolo indukované napätie na snímači  $U_{\text{XSONDA}}$ . Simuláciu sme robili pre polohy snímača EM poľa, ktoré sú zhodné s polohami snímača EM poľa pri reálnom meraní:  $[x; 1; 3]$ ,  $[x; -1; 5,5]$  a  $[x; -3; 8]$  v cm. Hodnota polohy sondy EM poľa v osi  $x$  sa menila smerom od stredu (0 cm) ku kraju polvlnového dipólu (60 cm). Z obr. 5.7a je vidno, že aj pri simulácií platí, čím sme ďalej od stredu zdroja EM poľa tým je napätie  $U_{\text{XSONDA}}$  menšie. Na grafe obr. 5.7a si môžeme všimnúť, že aj pri simulácií zložky intenzity elektrického poľa  $E_x$ , boli najvyššie hodnoty indukovaného napätia na snímači namerané pri strede polvlnového dipólu ( $x = 0$  cm) a pri jeho konci ( $x = 60$  cm).

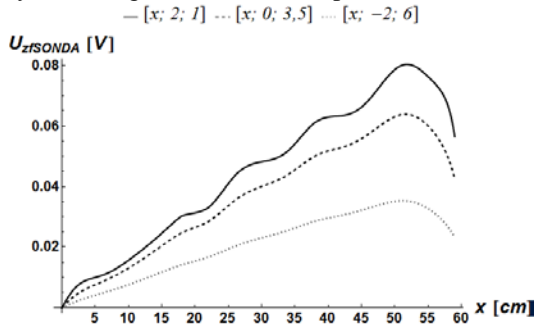


Obr. 5.7. a) Simulácia zložky  $E_x$  b) Simulácia zložky  $E_y$

Ďalšou zložkou intenzity elektrického poľa, ktorú sme simulovali bola zložka  $E_y$ . Na výstupe snímača bolo napätie  $U_{yfSONDA}$ . Polohy snímača EM poľa:  $[x; 1; 4]$ ,  $[x; -1; 6,5]$  a  $[x;-3; 9]$  cm. Hodnota osi  $x$  sa opäť menila od stredy ku kraju polvlnového dipólu.

Pri meraní intenzity elektrického poľa  $E_y$  sa hodnota napätia  $U_{yfSONDA}$  smerom od stredy polvlnového dipólu zväčšuje, obr. 5.7b, rovnako ako tomu bolo pri napätí  $U_{ySONDA}$ .

Posledkou simulovanou zložkou intenzity elektrického poľa bola zložka  $E_z$ . Poloha snímača EM poľa bola:  $[x; 2; 1]$ ,  $[x; 0; 3,5]$  a  $[x;-2; 6]$  cm. Hodnota polohy sondy EM poľa v osi  $x$  bola rovnaká ako pri meraní zložiek  $E_x$  a  $E_y$ . Pri pohľade na obr. 5.8, si môžeme všimnúť, že pri napätí  $U_{zfSONDA}$  získaného simuláciou dochádza k zvlneniu priebehu. Najviac viditeľné to je pri polohe snímača voči zdroju EM poľa  $[x; 2; 1]$  cm. Toto zvlnenie je ešte zvýraznené tým, že sme pre vyhladenie priebehu  $U_{zfSONDA}$  použili funkciu interpolácie.

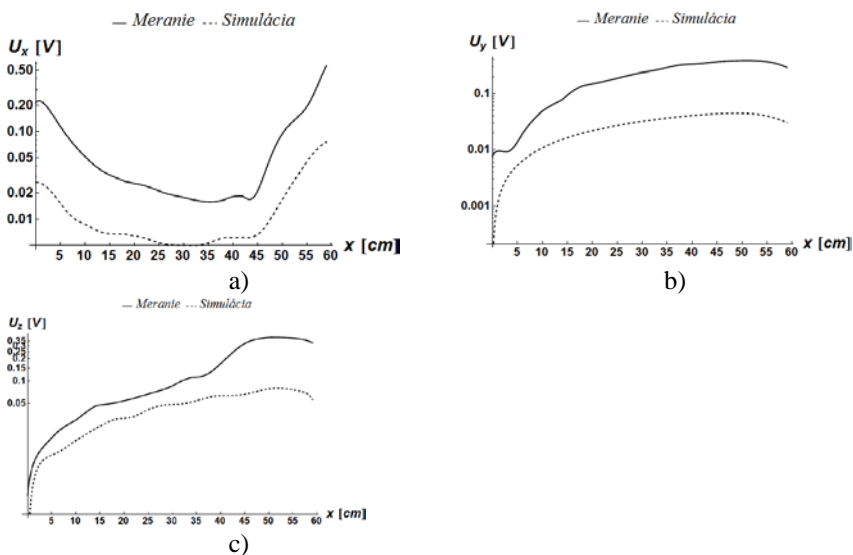


Obr. 5.8. Závislosť  $U_{zSONDA}$  od polohy na osi  $x$  polvlnového dipólu, pri simulácií  $E_z$

Pri porovnaní amplitúd napätí  $U_{xfSONDA}$  (obr. 5.7a),  $U_{ySONDA}$  (obr. 5.7b) a  $U_{zSONDA}$  (obr. 5.8) si môžeme všimnúť, že aj pri simulácii najvyššiu amplitúdu napätia sme dosiahli pri meraní zložky intenzity elektrického poľa  $E_y$ .

- V tejto časti sme sa venovali vytvoreniu a analyzovaniu výsledkov získaných pomocou numerického modelu merania zložiek intenzity

elektrického poľa pomocou navrhutej sondy EM poľa. Teraz je potrebné navzájom porovnať výsledky získané pomocou reálneho merania s výsledkami získanými pomocou numerického modelu. Amplitúdy napätí snímača EM poľa získaných v tom istom bode nie sú rovnaké. Je to spôsobené tým, že v reálnej sonde EM poľa je na dipóle snímača pripojená schottkyho dióda. Prevodová charakteristika použitej schottkyho diódy nie je lineárna na celom rozsahu. Taktiež použitý diferenciálny operačný zosilňovač zosilňuje vstup  $A_U = 2$ . Preto pri porovnávaní výsledkov získaných meraním s výsledkami získanými pomocou numerického modelu, nás zaujíma tvar a priebeh indukovaného napätia na dipóle snímača EM poľa.



**Obr. 5.9.** a) Porovnanie priebehov napätí snímača EM poľa  $U_{xSONDA}$  a  $U_{xISONDA}$   
 b) Porovnanie priebehov napätí snímača EM poľa  $U_{ySONDA}$  a  $U_{yISONDA}$   
 c) Porovnanie priebehov napätí snímača EM poľa  $U_{zSONDA}$  a  $U_{zISONDA}$

Na obr. 5.9 sú navzájom porovnané jednotlivé priebehy indukovaných napätí získaných pomocou merania a numerického modelu. Pre lepšie porovnanie sme  $y$ -ovú os grafu vykreslili v logaritmickej mierke. Z obr. 5.9 je vidno, že jednotlivé priebehy majú veľmi podobný priebeh a tvar. Preto môžeme tvrdiť, že nami navrhnutá sonda EM poľa a numerický model potvrdzujú teoretický predpoklad uvádzaný v práci.

## 6 Zhodnotenie dizertačnej práce

Hlavným cieľom predloženej práce bol návrh a následná realizácia sondy EM poľa, ktorá meria intenzitu elektrického poľa v tesnej blízkosti zdroja EM poľa. Samotnému návrhu predchádzalo viacero analýz, ktoré bolo nevyhnutné vykonať. Prácu si môžeme rozdeliť do troch hlavných etáp:

### 1. etapa – Analýza sondy EM poľa

Prvým krokom bolo vytvorenie analytického a numerického modelu snímača EM poľa, kde sme sledovali vplyv dĺžky snímača na presnosť merania intenzity elektrického poľa. Na základe vytvorených modelov sme potvrdili závislosť relatívnej chyby priemerovania snímača od dĺžky snímača EM poľa. Previazaním dĺžky snímača s vlnovou dĺžkou, sme docielili použiteľnosť modelov pre rôzne frekvencie. Na základe analýzy vykonanej pomocou numerického a analytického modelu, sme rozhodli o konečnej dĺžke snímača EM poľa. Konečne rozhodnutie o dĺžke snímača nebolo jednoduché. Pri návrhu sme museli brať do úvahy nie len závislosť relatívnu chybu priemerovania snímača EM poľa od dĺžky snímača, ale aj závislosť množstva naindukovaného napätia od dĺžky snímača. Preto bolo nevyhnutné, zvoliť kompromis medzi týmito dvoma kritériami. Vzhľadom na výsledky analýzy relatívnej chyby priemerovania snímača EM poľa a vytvorených modelov sme sa rozhodli zrealizovať snímač EM poľa, ktorý bude mať dĺžku  $L = 0,06$  m. Pri tejto dĺžke snímača sa dopustíme relatívnej chyby priemerovania snímača 4,0578 %.

V ďalšom kroku dizertačnej práce sme sa venovali matematickému popisu vzájomného ovplyvňovania snímačov EM poľa. Jedným snímačom vieme v danom čase merať len jednu zložku intenzity elektrického poľa. Preto ak chceme súčasne merať 2 (3) zložky intenzity elektrického poľa, potrebujeme 2 (3) snímače EM poľa. Pri meraní viacerých zložiek intenzity elektrického poľa súčasne je nevyhnutné zvoliť vhodné vzájomné vzdialenosti snímačov. Avšak pri voľbe vhodných vzájomných vzdialeností jednotlivých snímačov EM poľa, nesmieme zanedbať aj celkové rozmery sondy EM poľa. Celkový rozmer sondy nesmel presiahnuť veľkosť vlnovej dĺžky, resp. tento rozmer musel byť menší ako vlnová dĺžka. V prípade, ak by rozmery sondy EM poľa neboli menšie v porovnaní s vlnovou dĺžkou, dochádzalo by k ovplyvňovaniu výsledku merania zložiek intenzity elektrického poľa samotnou sondou. Na základe vytvorených modelov, vieme že ideálny snímač EM poľa má infinitezimálnu dĺžku. Preto pri meraní zložiek intenzity elektrického poľa súčasne viacerými snímačmi EM poľa je nevyhnutné umiestniť snímače čo najviac do seba tak, aby celkový rozmer snímačov bol čo najmenší. Tým splníme podmienku čo najmenších rozmerov sondy EM poľa, avšak vplyvom zmenšenia rozmerov sondy EM poľa, dochádza aj k zmenšeniu vzájomných vzdialeností medzi snímačmi EM poľa. Vplyvom zmenšovania vzájomnej vzdialenosti snímačov EM poľa dochádza k zmene vzájomnej impedancie

snímačov. Tu dochádza k vzájomnému odporovaniu požiadaviek na snímač, preto je nevyhnutné zvoliť kompromis. Z tohto dôvodu sme sa rozhodli, že pri meraní zložiek intenzity elektrického poľa budeme merať v danom čase len jednu zložku. Venovali sme sa aj vyjadreniu zložiek intenzity elektrického poľa v priestore pomocou karteziánskej súradnicovej sústavy. K vlastnému vyjadreniu zložiek intenzity elektrického poľa v karteziánskej súradnicovej sústave, sme museli pristúpiť z dôvodu, že v dostupnej svetovej literatúre je takéto vyjadrenie takmer nemožné nájsť a pre analýzu dát z merania je pre nás táto sústava dôležitá.

## 2. etapa – Návrh sondy EM poľa

Zamerali sme sa už na samotný návrh sondy EM poľa, určenej pre meranie zložiek intenzity elektrického poľa v blízkej zóne. Sondu EM poľa sme si rozdelili na 4 dôležité časti: snímač EM poľa, časť spracovania a odosielania dát, napájanie a optický prijímač. Každá časť musí zabezpečiť správnu funkciu sondy EM poľa. Pri návrhu snímača EM poľa sme museli do snímača zakomponovať elektronické prvky, ktoré zabezpečia odstránenie VF a NF rušenia. Po návrhu elektronickej časti sondy (časť spracovania a odosielania dát), ktorá sa skladá z operačného zosilňovača,  $\mu$ kontroléra a optického vysielača, sme sa zamerali na správne pripojenie snímača EM poľa k sonde EM poľa. Toto pripojenie je realizované pomocou sériovo radených odporov, ktorých celkový odpor je 10 k $\Omega$ . Samostatnou kategóriou bol návrh napájania sondy EM poľa. Keďže predložená práca má v názve „*Autonómne merače elektromagnetického poľa*“, museli sme splniť aj túto požiadavku. Pojem autonómnosť tu vystihuje nezávislosť sondy EM poľa od štandardného typu napájania. To znamená, že sonda nesmela obsahovať napájanie vo forme batérie, ale tento blok musel pozostávať z elektroniky, ktorá zabezpečí premenu energie EM poľa na napätie. Zdroj napájania pozostáva z dipólu, ktorý transformuje energiu elektromagnetického poľa na napätie, násobiča napätia a DC/DC meniča, čím sme zabezpečili požadovanú úroveň napätia pre navrhnutú sondu EM poľa. Po návrhu takéhoto typu napájania (ktorý odoberá energiu z meraného EM poľa) bolo nevyhnutné analyzovať vplyv na samotné meranie. Preto sme vytvorili dva numerické modely. Na základe simulácií podľa týchto modelov sme dospeli k záveru, že navrhnutý zdroj napájania musí byť vo vzdialenosti minimálne 10 cm od sondy EM poľa. Pri dodržaní tejto vzdialenosti je ovplyvňovanie meraného EM poľa navrhnutým zdrojom takmer minimálne.

## 3. etapa – Meranie intenzity elektrického poľa pomocou navrhnutej sondy EM poľa

V poslednej časti dizertačnej práce sme sa zamerali na zhodnotenie výsledkov merania zložiek intenzity elektrického poľa získaných nami navrhnutou autonómnou sondou EM poľa. Výstupné jednosmerné napätia, ktoré zodpovedajú príslušným zložkám intenzity elektrického poľa sme



porovnali s napätiami, ktoré sme získali pomocou numerického modelu sondy EM poľa. Amplitúdy napätí získané meraním a amplitúdy napätí získané numerickým modelom nie sú rovnaké. Je to spôsobené tým, že v reálnej sonde EM poľa je na dipóle snímača pripojená schottkyho dióda. Prevodová charakteristika použitej schottkyho diódy nie je lineárna na celom rozsahu. Taktiež použitý diferenciálny operačný zosilňovač zosilňuje vstup  $A_U = 2$ . Preto pri porovnávaní výsledkov získaných meraním s výsledkami získanými pomocou numerického modelu, nás zaujímal tvar a priebeh indukovaného napätia na dipóle snímača EM poľa. Získané hodnoty majú veľmi podobný priebeh a tvar. Preto môžeme tvrdiť, že nami navrhnutá sonda EM poľa a numerický model potvrdzujú teoretický predpoklad uvádzaný v dizertačnej práci.

Venovali sme sa aj analýze vplyvu navrhnutého zdroja napájania na samotné meranie na základe hodnôt získaných meraním. Na napájanie sondy sme použili najprv navrhnutý zdroj napájania a následne sme zopakovali meranie pričom ako zdroj napájania sme použili nabitý super-kapacitor. Pri meraní sondou EM poľa napájanou navrhnutým zdrojom bola relatívna chyba spôsobená daným typom napájania v absolútnej hodnote do 10 %. Chyba sa zväčšovala len v prípade, ak intenzita elektrického poľa bola veľmi nízka. Vtedy dochádzalo k spotrebovaniu väčšej časti energie EM poľa v navrhovanom zdroji napájania. Pri dostatočných amplitúdach intenzity elektrického poľa bola relatívna chyba spôsobená navrhnutým zdrojom napájania v absolútnej hodnote okolo 5 %, v niektorých prípadoch bola táto chyba aj menšia.

Z uvedených súhrnov vyplývajú hlavné výsledky dizertačnej práce, ktoré môžeme sformulovať do nasledovných bodov:

1. Analýza vplyvu sondy EM poľa na meranie EM poľa. Vytvorenie univerzálneho numerického a analytického modelu pre analyzovanie relatívnej chyby priemerovania snímača EM poľa. Vlastné vyjadrenie zložiek intenzity elektrického poľa v karteziánskej súradnicovej sústave.
2. Návrh a realizácia sondy EM poľa určenej na meranie zložiek intenzity elektrického poľa v blízkosti zdrojov EM poľa v rozsahu normy EN 61000-4-3:2006.
3. Návrh a analýza vplyvu zdroja napájania pre sondu EM poľa, ktorý odoberá energiu z meraného EM poľa. Teda ide o napájanie priamo z meranej veličiny. Vytvorenie numerického modelu podľa, ktorého vieme určiť relatívnu chybu spôsobenú navrhnutým zdrojom. Porovnanie chyby vypočítanej pomocou numerického modelu s chybou vypočítanou pomocou výsledkov získaných z merania.

Myšlienka realizácie takejto sondy vyplýva z potreby rozpoznania negatívnych vplyvov EM poľa na zariadenia používajúce sa v priemysle

(vzájomné ovplyvňovanie zariadení, ktoré sú umiestnené v tesnej blízkosti). Rovnako je možné pomocou navrhovanej sondy merať úroveň ožiarenia EM poľom v priestoroch, kde sa ľudia pohybujú v blízkosti rôznych zdrojov EM poľa (trafostanice, vysokonapäťové vedenia, a podobne). Preto si dovoľíme tvrdiť, že navrhovaná sonda EM poľa má širokú škálu využiteľnosti v rôznych odvetviach. Napríklad v priemysle je často nevyhnutné poznať hodnoty EM poľa v danom priestore, či už z technického alebo hygienického hľadiska. V takomto prostredí sa vyskytuje veľké množstvo zdrojov EM poľa, či už ide o EM pole vyskytujúce sa pri výrobe, distribúcií, spotrebe striedavej energie, alebo ide o EM pole ktoré vzniká ako sprievodný jav pri rôznych technologických procesoch.

Dizertačná práca sa snaží odpovedať na všetky otázky súvisiace s problémom návrhu sondy EM poľa určenej pre meranie zložiek intenzity elektrického poľa. Rovnako ponúka návrh na atypický spôsob napájania zariadení.

## Použitá literatúra

- [1] BALANIS C. A. *Antenna theory: analysis and design*. 2005. 3rd ed. chapter 2 and 4. Hoboken: Wiley-Interscience. ISBN 978-0-471-667282-7.
- [2] RUSŇAK, K. *Fyzika pro aplikované vědy: Elektromagnetické pole* [online]. Západočeská univerzita v Plzni [cit. 2014-06-02].
- [3] VAVRA, Š., TURAN, J. *Antény a šíření elektromagnetických vln*. 1. Bratislava: Alfa, 1989. ISBN 80-05-00131-2.
- [4] TIRPÁK, A. *Elektromagnetizmus*. 1. vyd. Bratislava: Polygrafia SAV, 1999, 710 s. ISBN 80-887-8026-8.
- [5] HARŤANSKÝ, R. *Senzory pre meranie elektromagnetického poľa v oblasti elektromagnetickej kompatibility*. Habilitačná práca. Bratislava STU FEI, 2009.
- [6] YU-WEI, F., HUI-HUANG ZHONG, ZHI-QIANG LI, HENG ZHOU, WEI-HONG ZHOU, JUN ZHU, LING LUO, A short dipole antenna, *High Power Particle Beams (BEAMS)*, 2008 17th International Conference on , vol., no., pp.1,4, 6-11 July 2008.
- [7] LAKSHMANAN, A., CHOON SAE LEE. "A Standing-Wave Microstrip Array Antenna," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on* , vol.59, no.12, pp.4858,4861, Dec. 2011.
- [8] HARŤANSKÝ, R., SLÍŽIK, J. Intensity measurements in the presence of standing waves. In *EQ-2014 : In the framework of International Forum "Education Quality - 2014". Proceedings. April 23, 2014, Izhevsk, Russia*. s. 372-375.
- [9] HARŤANSKÝ, R., SLÍŽIK, J.: Intensity measurements in the presence of standing waves. In: *EQ-2014. Fourth Forum of Young Researchers : In the framework of International Forum "Education Quality 2014". Proceedings. April 23, 2014, Izhevsk, Russia. Izhevsk : Publishing House of Kalashnikov ISTU, 2014. ISBN 978-5-7526-0649-6, s. 372-375.*
- [10] DRAHOŠ, R. *Elektromagnetické polia v priemysle*. 2010 [online]. [cit. 2014-12-01], Dostupné z: < <http://www.d2r.sk/texty/elektromagnetické%20polia%20v%20priemysle.pdf> >.
- [11] GORDON, E. I., KUSRAEV, A. G., KUTATELADZE, S. S. *Infinitesimal Analysis*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2002. ISBN 978-940-1700-634.
- [12] HARŤANSKÝ, R., SLÍŽIK, J., MARŠÁLKA, L. Dipole Near Field Analysis - A ClosedForm Calculation in Cartesian Coordinates. In: *Journal of Electrical Engineering*. - ISSN 1335-3632. - Vol. 64, No. 5 (2013), s. 327-330.
- [13] KRÍŠŤAN, L., VACHALA, V. *Příručka pro navrhování elektronických obvodů*. 1. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury,

- 1982, 393 s. ISBN Průručka pro navrhování elektronických obvodů.
- [14] VOJTÁŠEK, S. A diode detector with filter. *Aplikace matematiky* [online]. vol. 6, issue 6, pp. 415-427 [cit. 2015-03-28]. Dostupné z: < [http://dml.cz/bitstream/handle/10338.1/dmlcz/102776/AplMat\\_06-1961-6\\_1.pdf](http://dml.cz/bitstream/handle/10338.1/dmlcz/102776/AplMat_06-1961-6_1.pdf) >.
- [15] SLÍŽIK, J., HARŤANSKÝ, R., SMIEŠKO, V.: Návrh sondy na meranie intenzity elektrického poľa v blízkej zóne. In: *EE časopis pre elektrotechniku, elektroenergetiku, informačné a komunikačné technológie*. - ISSN 1335-2547. - Roč. 20, mimoriadne č. : Zborník ku konferencii s medzinárodnou účasťou Elektrotechnika, Informatika a Telekomunikácie 2014, ELOSYS (2014), CD-ROM, s. 141-143.
- [16] CHUNG-MING YOUNG, MING-HUI CHEN, TSUN-AN CHANG, CHUN-CHO KO, KUO-KUANG JEN. Cascade Cockcroft–Walton Voltage Multiplier Applied to Transformerless High Step-Up DC–DC Converter, *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , vol.60, no.2, pp.523-537.
- [17] KUO-CHING TSENG, CHI-CHIH HUANG, WEI-YUAN SHIH. A High Step-Up Converter With a Voltage Multiplier Module for a Photovoltaic System. *Power Electronics, IEEE Transactions on*. vol.28. no.6. pp.304-307.
- [18] LINEAR TECHNOLOGY. *LTC3639 - High Efficiency, 150V 100mA Synchronous Step-Down Regulator*. Dostupné z: < <http://www.linear.com/product/LTC3639> >

## Publikácie autora

### • 2011

- AFD** HARŤANSKÝ, R., MIKUŠ, P., SLÍŽIK, J. Meranie presluchov na krátkom vedení. *EE časopis pre elektrotechniku, elektroenergetiku, informačné a komunikačné technológie* : ELOSYS, Trenčín, 11.-14.10.2011. Roč. 17, mimoriadne č (2011), s.122-124. ISSN 1335-2547.

### • 2012

- ADN** HARŤANSKÝ, R., SLÍŽIK, J. Reflector Design for Minimizing Electromagnetic Influence. In *EQ-2012 : Third Forum of Young Researchers "Education Quality"*. Izhevsk, Rossiya, 22.-22.2.2012. Izhevsk: Publishing. House of ISTU, 2012, s. 401- 407. ISBN 978-5-7526-0531-4.

### • 2013

- ADE** HARŤANSKÝ, R., MIKUŠ, P., MARŠÁLKA, L., SLÍŽIK, J., MATEJIČKA, L.: Small Electrical Loop Analytical Calculation. In: *Universal Journal of*

*Electrical and Electronic Engineering*. - ISSN 2332-3280. - Vol. 1, Iss. 2 (2013), s. 52-57.

**ADN** HARŤANSKÝ, R., - SLÍŽIK, J., - MARŠÁLKA, L., Dipole near field analysis – a closed form calculation in cartesian coordinates. In *Journal of ELECTRICAL ENGINEERING* Vol. 64, NO.5 2013. s.327-330. ISSN 1335-3632.

**ADN** SLÍŽIK, J., - HARŤANSKÝ, R. Metrology of Electromagnetic Intensity Measurement in Near Field. *Kvalita Inovácia Prosperita = Quality Innovation Prosperity* Vol. 17, Iss. 1 (2013). s. 57- 66. ISSN 1335-1745.

**AFD** SLÍŽIK, J., HARŤANSKÝ, R. Analysis of Measurement Systematic Error in the Near Field Region. In *Measurement 2013 : Proceedings of the 9th International Conference on Measurement*. Smolenice, Slovakia, May 27-30, 2013. Bratislava: Slovak Academy of Sciences, 2013, s. 359-362. ISBN 978-80-969672-5-4.

**AFD** SLÍŽIK, J., HARŤANSKÝ, R. Sensor Dimensions Depending on The Distance from the Source Dipole as a Function Measurement Error. In *ELITECH'13 [elektronický zdroj] : 15th Conference of Doctoral Students; Bratislava, Slovakia, 5 June 2013*. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2013, s. 4. ISBN 978-80-227-3947-4.

• **2014**

**AFC** HARŤANSKÝ, R., SLÍŽIK, J. Intensity measurements in the presence of standing waves. In *EQ-2014 : In the framework of International Forum "Education Quality - 2014". Proceedings. April 23, 2014, Izhevsk, Russia*. s. 372-375.

**AFD** SLÍŽIK, J., HARŤANSKÝ, R., SMIEŠKO, V. Measurement of standing waves with different length of sensor. In *ELITECH'14 [elektronický zdroj] : 16th Conference of Doctoral Students; Bratislava, Slovakia, 4 June 2014*. 1.vyd. Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2014, CD-ROM, [3] p. ISBN 978-80-227-4171-2.

**AFD** SLÍŽIK, J., HARŤANSKÝ, R., SMIEŠKO, V. Návrh sondy na meranie intenzity elektrického poľa v blízkej zóne. In *EE časopis pre elektrotechniku, elektroenergetiku, informačné a komunikačné technológie : Zborník ku konferencii s medzinárodnou účasťou Elektrotechnika, Informatika a Telekomunikácie 2014, ELOSYS. Roč. 20, mimoriadne číslo (2014), CD-ROM*, s. 141-143. ISSN 1335-2547.

• **2015**

**AFC** SLÍŽIK, J., HARŤANSKÝ, R., SMIEŠKO, V., ŠROBA, L. Measurement of the three vector components of the electric field intensity with proposed electromagnetic field probe measured in the near-field

region. In *EMD 2015: 23th International conference on electromagnetic disturbances. Białystok, Poland. 9 - 11 September 2015*. Białystok : University of Technology, 2015, S. 146-149. ISBN 978-83-62582-76-1.

- AFD** SLÍŽIK, J., HARŤANSKÝ, R. Proposal of power supply module for the electromagnetic field probe. In *Measurement 2015 : Proceedings of the 10th International Conference on Measurement. Smolenice, Slovakia, May 25-28, 2015*. Bratislava: Slovak Academy of Sciences, 2015. ISBN 978-80-969672-9-2.
- AFD** SLÍŽIK, J., HARŤANSKÝ, R., SMIEŠKO, V. Creating and measurement of the the designed power supply for the near field electromagnetic probe. In *ELITECH'15 [elektronický zdroj] : 17th Conference of Doctoral Students; Bratislava, Slovakia, 25 May 2015*. 1.vyd. Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2015, CD-ROM, [3] p. ISBN 978-80-227-4171-2.

## Summary

The main aim of my thesis is proposal and realization of autonomous electromagnetic field probe. This probe measures electric field intensity in the near distance from electromagnetic field source. The autonomous electromagnetic field probe described in my paper could be divided into three basic parts.

First step of first part is about influence of sensor length on the measurement of the electromagnetic field. The whole first chapter is dedicated to this topic. Sensor is short dipole. Magnitude of the induced voltage is depended on the length of the EM field sensor. Length of the sensor inserts error in to the measurement. Set two conflicting requirements: the maximum length of the sensor to achieve the largest induced voltage; the minimum length of the sensor to achieve the least possible error. This means that it is necessary to know the relationship between the length of the sensor and error, which committed these measurements. We created analytical and numerical model of the sensor for analysis the effect of sensor length on accuracy of measuring electric field intensity. Created models confirm the dependence of the relative error of averaging from the length of the sensor. Interlinking length of the sensor with a wavelength, we achieved the applicability models for different frequencies. Base on the result from models we decided proposed sensor with length  $L = 0,06$  m. With this sensor length we have relative error averaging of sensor 4,0578 %.

As another step there was the mathematical analysis of interferences between sensors.

With one sensor we can measure only one component of the electric field intensity at the time. Therefore, if we want to simultaneously measure 2 (3)

components of the electric field intensity we need 2 (3) sensors. The sensors must be positioned so close each other as a possible; overall size of the probe must be as small as a possible. Mutual distance of sensors has impact on the mutual impedance of the sensors. Requirements for sensor are contradictory. For this reason we decided that when we measuring the components of the electric field will be measured only one component of electric field intensity in the same time. We expressed the components of the electric field intensity in the Cartesian coordinate system.

The third step of proposed paper deals with proposal of EM field probe. We divided EM field probe on 4 parts: sensor, part processing and transmission of data, power supply and optical receiver. Each part must ensure the correct function of the EM field probe. In the EM field sensor are insert electronic components which ensure the elimination of HF and AF interference. Processing and transmission of data must ensure conversion of analog values to digital values and send data through the optical transmitter. A separate category was design of the power supply for EM field probe. Power supply consists from dipole, which transform energy from EM field to voltage, cascade multiplier and DC/DC converter. After proposal of power supply was necessary to analyze the impact on the measurement. We created 2 numerical models. Base on the numerical models we concluded that the proposed power supply must be place 10 cm from the EM field probe. While respecting this distance influence on the measurement is minimal.

Dissertation thesis tries to answer on all questions related with proposal of EM field probe. It also offers suggestion for atypical model of power supply.

**Poznámky:**

---

---