

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Ing. Peter Mikuš

Autoreferát dizertačnej práce

**VPLYV PROSTREDIA NA PRESNOŠŤ A REPRODUKOVATELNOSŤ
MERANÍ VZDIALENOSTI PRI RADAROVÝCH HLADINOMEROCH**

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. Peter Mikuš**
Ústav elektrotechniky
Fakulta elektrotechniky a informatiky, STU
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ: **doc. Ing. René Hart'anský, PhD.**
Ústav elektrotechniky
Fakulta elektrotechniky a informatiky, STU
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

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

Ing. Pavol Ďurina, PhD.
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky
Univerzita Komenského v Bratislave
Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa konáo.....h.

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

prof. Dr. Ing. Miloš Oravec

Obsah

Úvod	5
1 Ciele práce	6
2 Súčasný stav v overovaní radarových hladinomerov	6
2.1 Typy prevedení laboratórií na overovanie radarových hladinomerov 7	
3 Riešenie vplyvu valcového nosníka na rozloženie E poľa	9
4 Riešenie vplyvu hrany na rozloženie E poľa.....	11
5 Matematický model laboratória	13
6 Výsledky matematického modelu	16
7 Odporúčania pre stavbu laboratória na overovanie radarových hladinomerov	18
8 Zhodnotenie dizertačnej práce	23
8.1 Hlavné prínosy	24
Použitá literatúra	26
Publikácie autora	28
Summary.....	30

Zoznam použitých symbolov

$\vec{a}_x, \vec{a}_y, \vec{a}_z$	jednotkové vektory v smere osi x, y, z
c	rýchlosť svetla vo vákuu $299\,792\,458\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
\vec{E}	komplexná amplitúda vektora intenzity elektrického poľa
f	frekvencia
ε	Neumannov symbol
j	predstavuje komplexnú jednotku
k	vlnové číslo vo vákuu
kr	vlnová vzdialenosť
α	veľkosť uhla hrany
Φ	veľkosť uhla bodu pozorovania
Φ'	veľkosť uhla, pod ktorým dopadá primárne EM vlnenie
a	polomer nosníka
ρ	vzdialenosť bodu pozorovania
ρ'	vzdialenosť zdroja primárneho EM vlnenia
Γ^b	koeficient odrazu
T^b	koeficient prenosu
$\varepsilon, \varepsilon_0, \varepsilon_r$	permitivita, permitivita vákuu ($\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}\text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$), relatívna permitivita
μ, μ_0, μ_r	permeabilita, permeabilita vákuu ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\text{ Hm}^{-1}$)
λ	vlnová dĺžka
b	polomer Fresnelovej zóny
l_1	vzdialenosť vysielača od prekážky
l_2	vzdialenosť prijímača od prekážky

Úvod

V priemyselnej praxi sa často vyskytujú požiadavky výrobných podnikov na meranie výšky hladiny média - tekutého alebo sypkého materiálu v nádržiach. Používajú sa dva spôsoby merania výšky hladiny: kontaktný a bezkontaktný. Pri bezkontaktnom spôsobe sa využíva vysielanie a prijímanie signálu napríklad v pásme mikrovln, sú to tzv. radarové hladinomer.

Typickou aplikáciou radarových hladinomerov je meranie výšky hladiny v nádržiach na skladovanie kvapalných uhľovodíkov. Popri spoľahlivosti merania je veľmi dôležitá i presnosť meradla. Lahko sa dá vypočítať, že napr. výškový rozdiel hladiny 1 mm vo vertikálnej valcovej nádrži s priemerom 10 m spôsobí rozdiel v objeme 78,5 l. Ak je nádrž určená na skladovanie benzínu Natural 95, pri dnešných cenách pohonných hmôt (cca 1,5 €/l) činí rozdiel spolu 120 €. Vzhľadom na to, že hladinomer sa často používajú ako určené meradlá podľa zákona o metrológii (zákon č.142/2000 Z. z.), je treba nájsť vhodný spôsob a vyhovujúcu metodiku na overenie bezkontaktných radarových hladinomerov.

Pri riešení úlohy tvorby laboratória na overovanie radarových hladinomerov je potrebné brať do úvahy skutočnosť, že tieto bezkontaktné hladinomer pracujú s elektromagnetickými vlnami v mikrovlnnom pásme. Práca s takto vysokými frekvenciami má svoje špecifiká a preto je potrebné v rámci akreditovaného laboratória vytvoriť pracovné prostredie, ktoré bude spĺňať špeciálne požiadavky. Jedná sa o to, aby nevznikali rušivé vplyvy, ktoré sa môžu vytvoriť hlavne na rôznych vodivých predmetoch. Amplitúda signálov, ktoré vzniknú na základe rušivých vplyvov nemusí byť veľká, avšak pri väčšom množstve rôznych vplyvov môže vzniknúť ich interferenciou signál porovnateľný s hlavným signálom a tým dochádza k skresleniu nameraných údajov.

V našej práci sa venujeme analýze vplyvov konštrukčných prvkov laboratória na šírenie elektromagnetického poľa. Vytvorili sme matematický model, na základe ktorého sme dokážeme percentuálne vyjadriť vplyv jednotlivých prvkov na rozloženie elektromagnetického poľa v priestore laboratória. V závere práce uvádzame aj niekoľko odporúčaní pri stavbe laboratória určeného na overovanie radarových hladinomerov.

1 Ciele práce

Predložená práca sa sústreďuje na splnenie nasledovných bodov:

- Analytický výpočet rozloženia elektromagnetických vln v meracom pracovisku vplyvom difrakcií na valcoch
 - Túto problematiku sme sa rozhodli riešiť na základe stavby laboratória. V laboratóriu sa nachádzajú oceľové nosníky kruhového prierezu. Nakoľko ich priemer je porovnateľný s vlnovou dĺžkou elektromagnetického vlnenia, ktoré vysiela hladinomer, je potrebné kvantifikovať vplyv nosníkov na výsledné elektromagnetické pole. Pre aplikáciu analytického výpočtu sme sa rozhodli na základe toho, že je to rýchlejší spôsob ako sa dopracovať k výsledkom v porovnaní s numerickými simulátormi.
- Analytický výpočet rozloženia elektromagnetických vln v laboratóriu vplyvom difrakcií na hranách
 - Tento bod sme zvolili z podobných dôvodov ako v prvom bode. V laboratóriu sa nachádza odrazová doska, ktorá simuluje výšku hladiny. Je potrebné poznať ako hrany tejto dosky vplyvajú na elektromagnetické pole, aby sme mohli správne navrhnuť účinné riešenia.
- Numerické modelovanie rozloženia elektromagnetických vln v laboratóriu a overenie analytických výpočtov
- Vyjadrenie vplyvu rušivých elementov v laboratóriu na rozloženie elektrického poľa na základe analytických výpočtov
- Návrh opatrení na zníženie chýb pri overovaní vysokofrekvenčných zariadení
- Overenie účinnosti navrhnutých opatrení

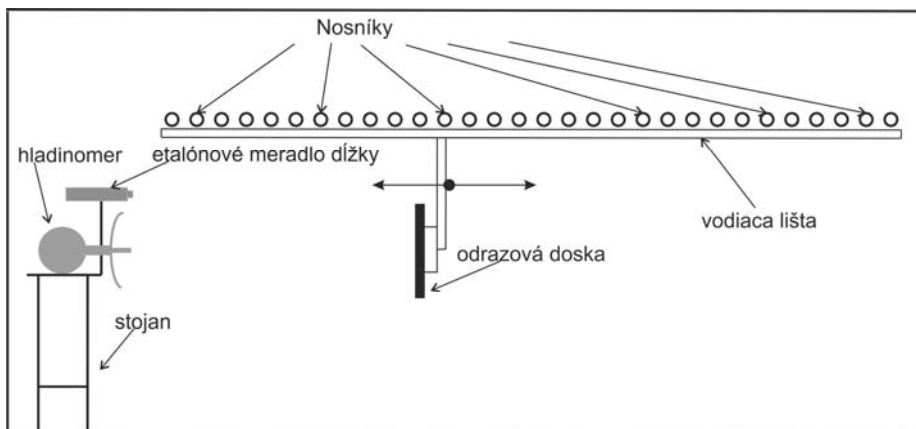
2 Súčasný stav v overovaní radarových hladinomerov

Podľa §8 zákona o metrologii č. 142/2000 Z.z. sú určené meradlá, meradlá určené na povinnú metrologickú kontrolu alebo posúdenie zhody [1]. Radarové hladinomery spadajú do kategórie určených meradiel a preto musia byť pravidelne kontrolované, resp. overované. Na území SR je interval tejto kontroly 1 rok [2]. Overenie podľa §9 zákona o metrologii č. 142/2000 Z.z. môže vykonávať Slovenský metrologický ústav (ďalej len „ústav“), vo vymedzenom rozsahu aj organizácia zriadená Úradom pre normalizáciu, metrologiu a skúšobníctvo a podnikatelia alebo iné právnické osoby, ktoré boli rozhodnutím ÚNMS autorizované [1].

2.1 Typy prevedení laboratórií na overovanie radarových hladinomerov

Aby sme vedeli analyzovať vplyv prostredia laboratória na šírenie EM vlnenia, museli sme zistiť stavbu konkrétneho laboratória. V priebehu štúdia sme navštívili niekoľko laboratórií, a každé bolo inak technicky riešené.

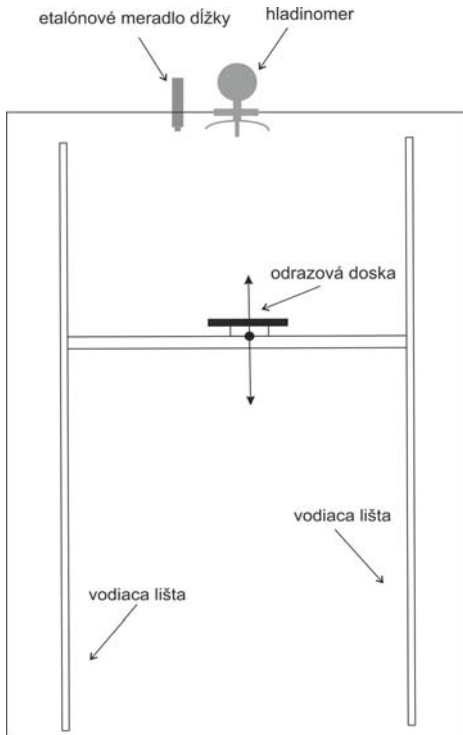
Ako prvé sme mali možnosť vidieť laboratórium na Slovensku, v priestoroch Slovenskej legálnej metrológie, n.o. Jeho konštrukčné vyhotovenie je znázornené na Obr. 2.1.



Obr. 2.1 Laboratórium Slovenskej legálnej metrológie, n.o.

Toto laboratórium má dĺžku asi 20 m, jeho šírka je 1,93 m a výška 2,6 m. Pod stropom vo výške 2,20 m sú upevnené kovové nosníky kruhového prierezu s priemerom 60 mm, ktoré držia vodiacu lištu. Po tejto lište sa pomocou servopohonu posúva odrazová doska. Overovaný hladinomer je upevnený na masívnom oceľovom stojane vo výške asi 1,4 m. Pri výkone overovania potrebujeme merať vzdialenosť medzi hladinomerom a odrazovou doskou aj nejakým presnejším meradlom - etalónom, aby sme dokázali stanoviť chybu hladinomeru. Pre tento účel laboratórium používa laserový interferometer, ktorý meria s presnosťou 0,001 mm a je upevnený na rovnakom stojane ako hladinomer. Celý proces merania je plne automatizovaný, teda jednotlivé členy meracieho reťazca medzi sebou komunikujú a kooperujú podľa inštrukcií riadiaceho softvéru. Rovnaký softvér zabezpečuje tiež zber a ukladanie nameraných údajov.

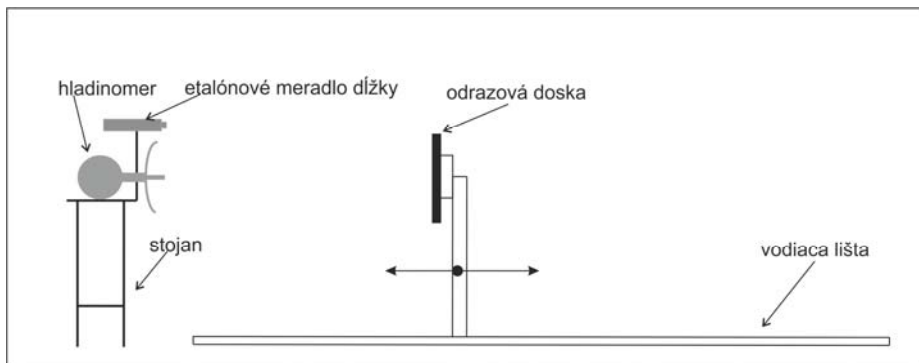
Podobná koncepcia, ale otočená do vertikálnej polohy sa nachádza v Českom metrologickom inštitúte. Vyhotovenie tohto laboratória je na . V tomto laboratóriu je hladinomer spolu s etalónom umiestnený na vrchu vysokej šachty. Odrazová doska sa posúva v tejto šachte vertikálnym smerom a simuluje výšku hladiny.



Nedávno sa nám podarilo dostať aj do priestorov jedného z výrobcov radarovým hladinomerov vo Švédsku, kde sme tiež mohli nahliadnuť do ich laboratórií. Prvé bolo rovnakej koncepcie ako laboratórium na Slovensku. Rozdiel bol len v tom, že použitý priestor bol väčší. Jeho dĺžka bola asi 25 m, šírka asi 10 m a výška asi 4 m. Ako etalón dĺžky nepoužívali inerferometer, ale magnetický pásik. Druhé laboratórium bolo rozmerovo menšie. Dĺžka bola asi 25 m, šírka asi 3m a výška 2,5 m. Jeho technické vyhotovenie je na . Zásadná zmena oproti predošlému laboratóriu bola v tom, že vodiaca lišta odrazovej dosky bola umiestnená na podlahe.

Obr. 2.2 Vyhotovenie laboratória v Českom metrologickom inštitúte

Steny laboratória boli vystlané absorbčným materiálom a ak etalón dĺžky používali laserový interferometer.



Obr. 2.3 Vyhotovenie laboratória vo Švédsku

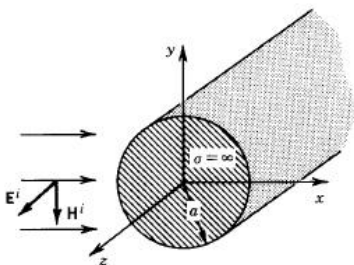
Ako je vidieť, každé laboratórium musí obsahovať systém, ktorý dokáže simulovať výšku hladiny. Vždy je to riešené pomocou vodivej odrazovej dosky, ktorá sa pohybuje priestorom laboratória buď horizontálne alebo vertikálne. Aby sme boli schopní zabezpečiť pohyb tejto dosky, je potrebná ďalšia konštrukcia,

ktorá zabezpečuje vhodné uchytenie a posúvanie. Týmto sme dospeli k záveru, že musíme zistiť, ako vplyvajú tieto konštrukčné prvky na šírenie elektromagnetického vlnenia priestorom laboratória. Toto zisťovanie bolo predmetom našej ďalšej práce.

3 Riešenie vplyvu valcového nosníka na rozloženie E poľa

Dominantnou časťou technického aparátu posuvu odrazovej dosky v laboratóriu je masívna oceľová nosná konštrukcia. Táto konštrukcia je tvorená nosníkmi valcového tvaru (Obr. 2.1). S uvažovaním tejto skutočnosti sme sa rozhodli zistiť ako takýto prvok vplyva na elektrické pole v laboratóriu. Najskôr sme hľadali riešenie tejto problematiky v svetovej literatúre.

Rozloženie EM vlnenia v okolí valca je riešiteľné použitím Besselových a Hankelových funkcií. Teraz si popíšeme riešenie rozptylu rovinatej vlny pri dopade na vodivý valec s priemerom a ako možno vidieť na Obr. 3.1 [6].



Obr. 3.1 Dopad rovinatej vlny na vodivý valec [6]

Incidenčné elektrické pole môžeme vyjadriť v tvare:

$$E^i = \hat{a}_z E_0 (-j)^n \varepsilon_n J_n(k\rho) \cos(n\Phi) \quad (1)$$

Rozptylové (difrakčné) pole, vzhľadom k tomu, že smeruje von z valca, je vyjadrené pomocou valcových vlnových funkcií, a potom E^s je podľa [6]:

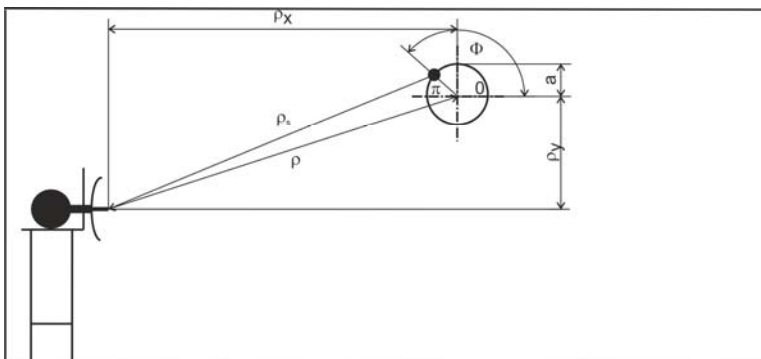
$$E^s = \hat{a}_z E_z^s = \hat{a}_z E_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n H_n^{(2)}(k\rho) \quad (2)$$

Celkové elektrické pole v okolí vodivého valca sa skladá:

$$E^t = E^i + E^s \quad (3)$$

Vyššie uvedené riešenie je korektné, ak uvažujeme, že intenzita incidenčného poľa je v celom priestore rovnaká a jedná sa o rovinnú vlnu. My sme sa v rámci lepšieho priblíženia k realite rozhodli navrhnuť také riešenie daného problému, kde budeme uvažovať s klesajúcou intenzitou incidenčného poľa. Tento stav predpokladá šírenie sa EM vlny, ktorá je vybudená anténou hladinomera a ktorá sa šíri v reálnom prostredí. Pozorovanie vykonávame vo vzdialenom poli, kde platí, že intenzita EM pola je nepriamo úmerná vzdialenosti. Intenzita incidenčného poľa je v prípade klesajúcej intenzity vyjadrená pomocou rovnice (4).

$$E^i = \hat{a}_z E_0 \frac{e^{-jk\rho}}{k\rho} \quad (4)$$



Obr. 3.2 Znáznornenie vzdialenosti nosníka od hladinomera

Keďže sa intenzita incidenčného poľa bude meniť vplyvom zmeny vzdialenosti od hladinomera, je zrejmé, že aj na povrchu nosníka s polomerom a bude mať intenzita premenlivý charakter. V pôvodnom riešení uvažujeme pri incidenčnom poli len vzdialenosť ρ (viď. Obr. 3.2), ktorú sme pôvodne vyjadrili v tvare

$$\rho = \sqrt{\rho_x^2 + \rho_y^2} \quad (5)$$

Naše spresnenie spočíva v tom, že vyjadríme skutočnú vzdialenosť ρ_s (viď. Obr. 3.2) od hladinomera pre každý bod na povrchu nosníka v tvare

$$\rho_s = \rho + a \cdot \cos \Phi \quad (6)$$

Teda je zrejmé, že vzdialenosť ρ_s sa bude meniť v závislosti od polomeru nosníka a a tiež od uhla pozorovania Φ . Vyššie spomenuté predpoklady sme následne aplikovali pri výpočte incidenčného a rozptylového poľa, ktoré majú nasledovný tvar:

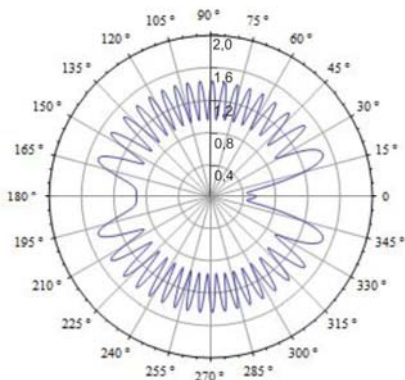
Incidenčné pole:

$$E_z^i = E_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{e^{-jk\rho}}{k\rho} \left[J_n(ka) + \frac{a}{\rho} [J_{n+1}(ka) - J_{n-1}(ka)] \right] \quad (7)$$

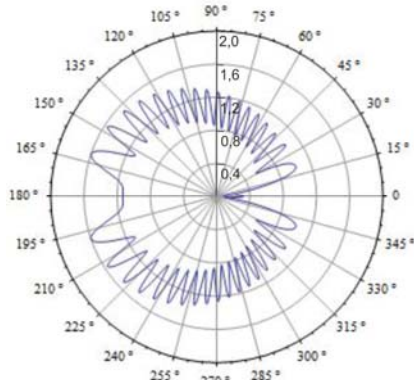
Rozptyľové pole:

$$E_z^s = -E_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} j^{-n} \frac{J_n(ka) + j^{-(n-1)} \frac{a}{\rho} [J_{n+1}(ka) - J_{n-1}(ka)]}{H_n^{(2)}(ka)} H_n^{(2)}(k\rho) e^{jn\Phi} \quad (8)$$

Aby sme si overili ako sa naše zmeny prejavja, vykonali sme skúšobné výpočty. Určovali sme priebeh elektrického poľa v okolí nosníka s priemerom 6 cm vo vzdialenosti 30 cm. Na Obr. 3.3 je priebeh E poľa, ktoré sme získali súčtom incidenčného poľa podľa vzťahu (1) a rozptyľového poľa podľa vzťahu (2). V tomto prípade sa neuvažuje s klesaním intenzity incidenčného poľa. Podobne na Obr. 3.4 je priebeh E poľa, získaného súčtom výsledkov podľa vzťahov (7) a (8), kde uvažujeme klesajúcu intenzitu incidenčného poľa. Už na prvý pohľad je vidieť, že celý priebeh je posunutý v smere pred nosník. Z toho vyplýva, že intenzita E poľa pred nosníkom je v porovnaní s riešením podľa literatúry vyššia. Ak uvážime, že tým smerom je aj prijímacia časť hladinomeru, tak práve tu môžeme získať oveľa vernejší obraz o tom, ako nosníky vplyvajú na prijímané EM vlnenie.



Obr. 3.3 Celkové pole v okolí nosníka bez uvažovania klesajúcej intenzity incidenčného poľa

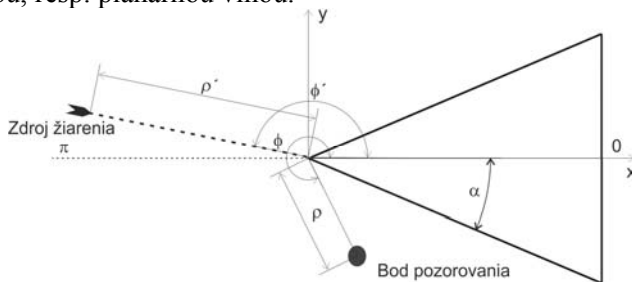


Obr. 3.4 Celkové pole v okolí nosníka s uvažovaním klesajúcej intenzity incidenčného poľa

4 Riešenie vplyvu hrany na rozloženie E poľa

Pri overovaní hladinomerov je veľmi dôležitá simulácia výšky hladiny. Najčastejší spôsob jeho realizácie je použitie vodivej roviny (oceľovej dosky). Hladinomerom vysielané EM vlnenie sa od dosky odráža a postupuje späť k hladinomeru. Avšak na tejto doske sa nachádzajú hrany, na ktorých dochádza k difrakcii, teda ohybu vlnenia. Dnešné radarové hladinomery pracujú s frekvenciami rádovo v desiatkach GHz [5]. To znamená, že vlnová dĺžka EM vlnenia je rádovo v centimetroch. Minimálna vzdialenosť, ktorú tieto hladinomery

dokážu merať je cca 1m [5]. Táto vzdialenosť je oveľa väčšia ako dĺžka EM vlnenia a preto sa vždy nachádzame vo vzdialenej zóne od hladinmera [3]. Vo vzdialenej zóne nadobúda vysielané EM vlnenie rovinný tvar. Preto pri výpočtoch difrakčného poľa vždy uvažujeme s tým, že jednotlivé súčasti laboratória sú ožiarené rovinnou, resp. planárnou vlnou.



Obr. 4.1 Znázornenie difrakcie na hrane

Podme si popísať, aký bude priebeh elektrického poľa v okolí hrany, ktorá je znázornená na Obr. 4.1. V tomto prípade je podľa literatúry [9] celkové elektrické pole v okolí takejto hrany vyjadrené v nasledujúcom tvare:

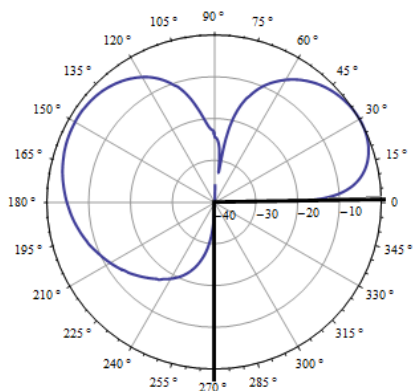
$$E_z^t \cong \frac{2}{v} \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n J_{n/v}(k\rho) \sin\left[\frac{n(\Phi' - \alpha)}{v}\right] \sin\left[\frac{n(\Phi - \alpha)}{v}\right] e^{\frac{1}{2}j\pi n/v} \quad (9)$$

kde

$$v = \frac{2\pi - 2\alpha}{\pi} \quad (10)$$

Φ – uhol bodu pozorovania

Φ' – uhol, pod ktorým dopadá EM vlnenie na hranu



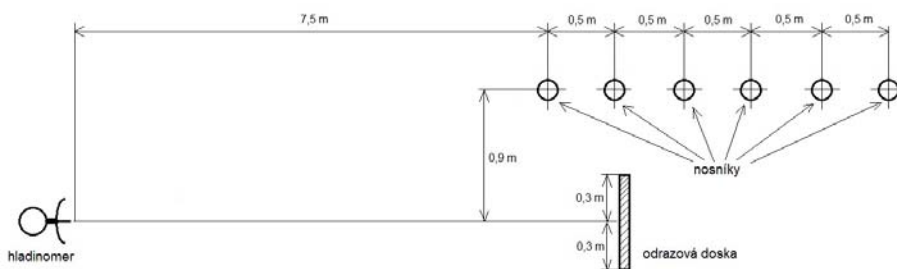
Obr. 4.2 Difrakcia na hrane

Na Obr. 4.2 je krivka, ktorú sme vypočítali pomocou rovnice (9). Táto krivka znázorňuje celkové elektrické pole v okolí hrany, ktorej vnútorný uhol je 90°, teda uhol $\alpha = 45^\circ$. Vzdialenosť bodu pozorovania od povrchu hrany bola rovná vlnovej dĺžke, teda v našom prípade pri frekvenciách 10 GHz to je cca 30 mm. Primárne pole dopadalo na hranu pod uhlom $\Phi' = 30^\circ$.

5 Matematický model laboratória

V predchádzajúcej kapitole sme si podrobne popísali a aj matematicky vyjadrili hlavné vysokofrekvenčné deje, ktoré sa môžu vyskytnúť v laboratóriu pri meraní vzdialenosti pomocou meradiel, ktoré pracujú s vysokými frekvenciami. Je pravdepodobné, že tieto javy nepriaznivo vplyvajú na priebeh merania. Kvalitu merania vieme posúdiť podľa toho, akej chyby sa pri ňom dopúšťame. Vplyvom spomínaných dejov sa môžeme dopustiť väčšej chyby merania. V našej práci chceme zistiť do akej miery tieto nepriaznivé deje ovplyvňujú práve chybu merania. Aby sme to dokázali, je vhodné vytvoriť matematický model prostredia, v ktorom sa nachádzajú všetky zásadné ovplyvňujúce faktory. Sú to najmä oceľové nosníky, ktoré držia posuvný mechanizmus odrazovej dosky a samozrejme odrazová doska. Práve tá je nevyhnutnou súčasťou každého laboratória, pretože pomocou nej dokážeme meniť meranú vzdialenosť. Matematický model je vhodný preto, lebo nám umožní jednoducho oddeliť jednotlivé zdroje, ktoré vplyvajú na šírenie EM poľa prostredím.

Model obsahuje oceľové nosníky, z ktorých prvý je umiestnený vo vzdialenosti 7,5 m od hladinomera. Spravili sme tak na základe výpočtov, kde sme na základe šírky zväzku antény určili, že nosníky budú významne ožiarené najskôr v tejto vzdialenosti. Malá časť energie bude nosníky ožarovať aj v menšej vzdialenosti, ale táto intenzita je v porovnaní s intenzitou poľa hlavného laloka antény zanedbateľná. Ich umiestnenie v menšej vzdialenosti by nemalo význam a náš model by sa tým komplikoval. Vzájomná vzdialenosť jednotlivých nosníkov je 0,5 m. Nosníky majú kruhový prierez s priemerom 60 mm. Ďalej je v modeli umiestnená odrazová doska, ktorá sa nachádza 0,6 m pod nosníkmi a má rozmery 600x600 mm. Na Obr. 5.1 je vyobrazený návrh geometrického modelu laboratória.



Obr. 5.1 Geometrické usporiadanie modelu laboratória

Aby sme zistili ako sa mení priebeh rozloženia EM vlny v laboratóriu, tak sme postupne menili vzdialenosť odrazovej dosky od hladinomera. Posun dosky sme vykonávali s krokom 5 mm. Začiatok bol vo vzdialenosti 9,5 m a vykonali sme 100 posunutí. V každej polohe dosky sme vypočítali veľkosť E poľa v mieste, kde je umiestnený hladinomer. Celkové E pole sa skladá z primárneho pola vysielaného

hladinomerom, odrazeného poľa, ktoré vzniklo odrazom od dosky a ohybového poľa, ktoré vzniká na nosníkoch a hranách odrazovej dosky.

Príspevky od nosníkov nebudú závislé od polohy odrazovej dosky, pretože jej poloha neovplyvňuje veľkosť incidenčného poľa dopadajúceho na jednotlivé nosníky. Ich veľkosť určíme podľa rovnice (8). Parametre, ktoré sa budú meniť sú v tomto prípade uhol pozorovania Φ a vzdialenosť ρ . Tieto určíme podľa (11) a (12).

$$\Phi = \arctan \frac{0,9}{\text{vzdialenosť_nosníka}} \quad (11)$$

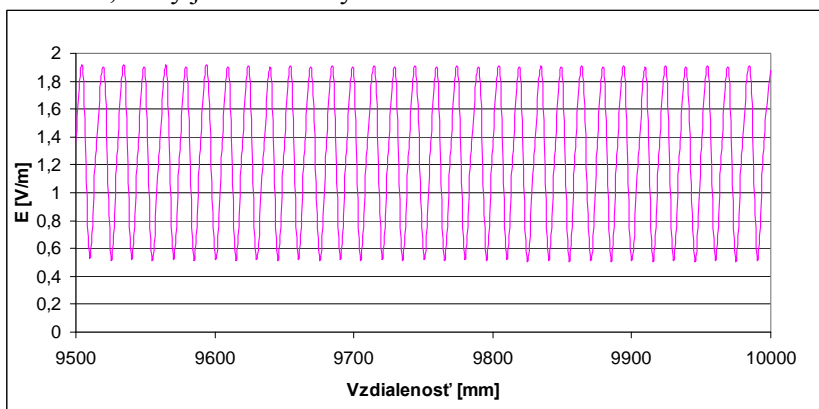
$$\rho = \sqrt{0,9^2 + \text{vzdialenosť_nosníka}^2} \quad (12)$$

Príspevky od hrán budú závislé na zmene polohy dosky. Ich veľkosť určíme podľa rovnice (9). V tomto prípade budú posunom ovplyvnené tieto veličiny: vzdialenosť ρ a tiež uhol pozorovania Φ . Ich veľkosť určíme podľa rovníc (13) a (14).

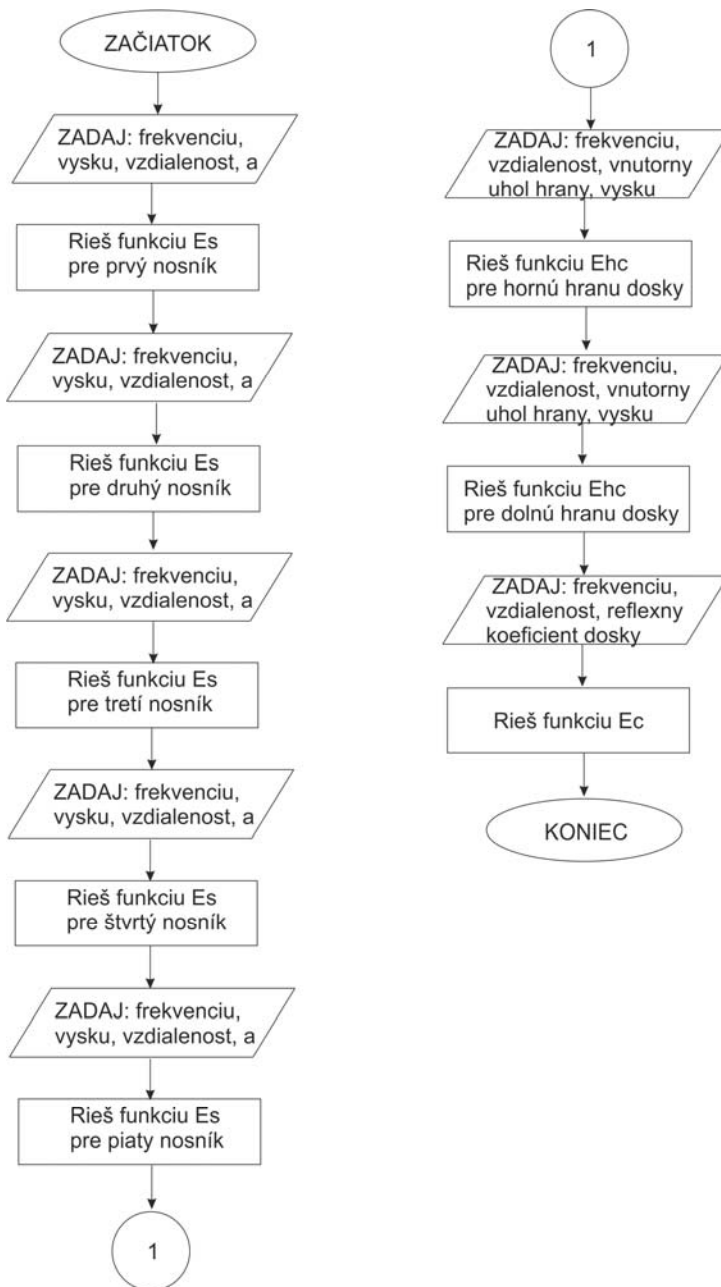
$$\rho = \sqrt{0,3^2 + \text{vzdialenosť_doska}^2} \quad (13)$$

$$\Phi = \arctan \frac{0,3}{\text{vzdialenosť_doska}} \quad (14)$$

Ďalším príspevkom v hodnote celkového elektrického poľa je odrazené pole. Premennivý parameter je v tomto prípade vzdialenosť ρ , ktorá je totožná so vzdialenosťou odrazovej dosky od hladinmera. Z toho vyplýva, že toto pole sa bude meniť v závislosti od polohy dosky. Spojením všetkých vyššie spomenutých príspevkov sme sa dopracovali k výslednému priebehu celkového E poľa v laboratóriu, ktorý je znázornený na Obr. 5.2.



Obr. 5.2 Rozloženie E poľa v laboratóriu



Obr. 5.3 Vývojový diagram komplexného analytického modelu laboratória

Tento priebeh sme získali z matematického modelu. Tento model bol vytvorený v prostredí Wolfram Mathematica 10, kde sme vytvorili niekoľko funkcií. Každá funkcia riešila výpočet čiastkových príspevkov. Logická následnosť jednotlivých operácií v modeli je znázornená na Obr. 5.3.

Funkcia **Es** rieši výpočet sekundárneho poľa v okolí nosníka. Jej vstupné premenné sú frekvencia = 10 GHz, vzdialenosť nosníka od hladinomera = 7,5; 8; 8,5; 9 a 9,5 m, polomer nosníka = 30 mm a výška = 0,9 m, značí výšku umiestnenia nosníkov nad úrovňou hladinomera.

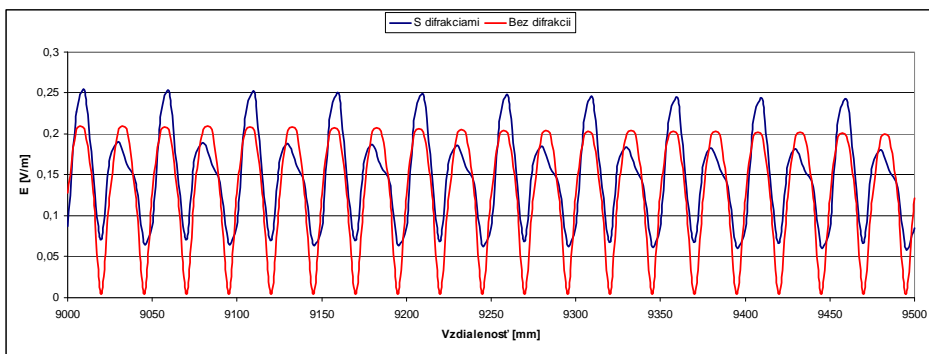
Funkcia **Ehc** rieši výpočet elektrického poľa od hrany odrazovej dosky. Jej vstupné premenné sú frekvencia = 10 GHz, začiatočná vzdialenosť od hladinomera = 9,5 m, výška = 0,3 m, polovičný vnútorný uhol hrany = 45° a uhol dopadu vlnenia = 90° .

Funkcia **Ec** počíta celkové elektrické pole, ktoré pozostáva z vyššie uvedených príspevkov a taktiež z incidenčného poľa a odrazeného poľa. Využíva výsledky predchádzajúcich funkcií, ktoré sú uložené v jednotlivých tabuľkách. Výsledky pre 100 bodov sú uložené tiež vo forme tabuľky. Vstupné premenné tejto funkcie sú frekvencia = 10 GHz, začiatočná vzdialenosť od hladinomera = 9,5 m a reflexný koeficient odrazovej dosky podľa = 0,9595.

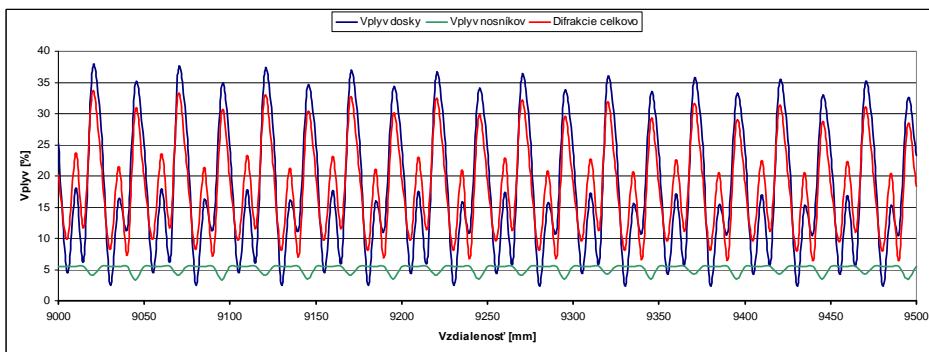
6 Výsledky matematického modelu

Navrhnutý model môžeme použiť na to, aby sme zistili vplyv prostredia laboratória na šírenie EM vlnenia. Výhoda matematického modelu spočíva práve v tom, že dokážeme rýchlo a ľahko vypočítať ako jednotlivé konštrukčné prvky laboratória vplývajú na šírenie EM vlnenia. Komerčné radarové hladinometry najčastejšie využívajú frekvencie 6, 8, 10, 24 a 78 GHz [5]. V našej práci sa preto sústredíme na výpočty práve pri týchto frekvenciách, nakoľko je predpoklad, že v laboratóriu sa bude vykonávať meranie na hladinomeroch, ktoré používajú práve tieto frekvencie. V našom modeli uvažujeme, že pri meraní radarovým hladinomerom sa v laboratóriu vyskytujú tri druhy EM poľa. Ich zdroje sú rôzne, niektoré sú žiaduce, iné zasa nie. Prvý druh je primárne, resp. incidenčné pole, ktoré do priestoru vysiela samotný hladinomer pomocou antény. Ďalej je to odrazené pole, ktoré vzniká pri dopade a následnom odraze EM vlnenia od odrazovej dosky. Tieto dva druhy polí sú žiadané, nakoľko na ich základe hladinomer meria vzdialenosť. Ďalšie pole je ohybové, resp. difrakčné pole, ktorého zdrojom je viacero prvkov v laboratóriu. Vzniká v okolí hrán odrazovej dosky a v okolí oceľových nosníkov. Tento druh poľa je v našom prípade nežiaduci a vzniká pri ožiarení spomínaných častí laboratória EM vlnením. Vplyvom tohto poľa je celkové pole pozmenené, čo sa môže prejaviť vo výsledku merania.

V našej práci sa venujeme analýze ako veľmi vplýva ohybové pole na celkové pole. Výpočty sme vykonali pre všetky vyššie spomínané frekvencie, ktoré používajú komerčné hladinometry. Teraz uvidíme výsledky aspoň pre frekvenciu 6 GHz. Na Obr. 6.1 sú znázornené dva priebehy elektrického poľa v laboratóriu vo vzdialenosti 9 až 9,5 m. Jeden z nich reprezentuje stav, kedy by nevznikali žiadne rušivé javy, resp. difrakcie. Druhý priebeh znázorňuje reálny stav v laboratóriu, teda zahŕňa aj vplyv difrakcií na nosníkoch a hranách dosky. Je vidieť, že tento priebeh je pozmenený. Na Obr. 6.2 možno vidieť percentuálny vplyv jednotlivých rušivých elementov. Je vidieť, že najviac na výsledný priebeh vplývajú difrakcie na hranách odrazovej dosky. Difrakcie na nosníkoch vplývajú oveľa menej (viď. Obr. 6.3). V priemere je pri tejto frekvencii vplyv difrakcií na celkové pole asi 18 %.

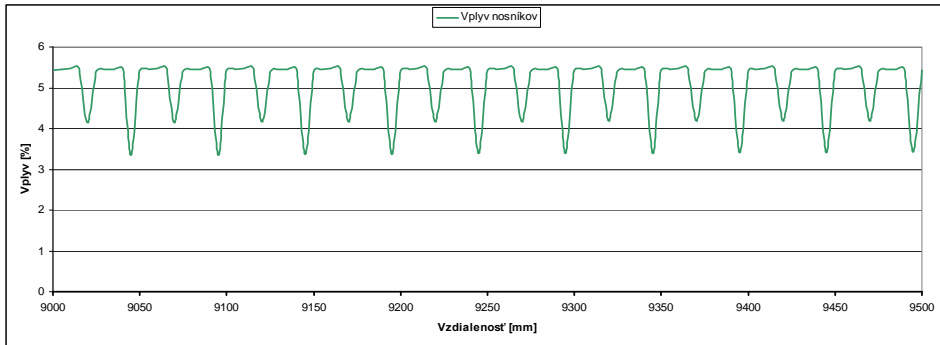


Obr. 6.1 Priebeh elektrického poľa na pracovisku



Obr. 6.2 Percentuálne vyjadrenie vplyvu jednotlivých prvkov na priebeh elektrického poľa

Použitím nášho modelu pre všetky najčastejšie používané frekvencie sme získali veľa zaujímavých informácií. Zistili sme, že pri vyšších frekvenciách 24 a 78 GHz je vplyv rušení oveľa menší. Pri frekvencii 78 GHz to je len asi 5 %. Naproti tomu, pri nižších frekvenciách 8,5 a 10 GHz je elektrické pole ovplyvnené až do úrovne 30 %.



Obr. 6.3 Percentuálne vyjadrenie vplyvu nosníkov na priebeh elektrického poľa

Ďalšou výhodou vyššej frekvencie sú menšie rozmery vysielačej a prijímačej antény a tiež veľmi malé vyžarovacie uhly, len 4° . Pri nižších frekvenciách sú vyžarovacie uhly antén rádovo v desiatkach stupňov. Tým, že je vysielačný signál zaostrý, je menšia pravdepodobnosť ožiarenia rôznych konštrukčných prvkov, na ktorých vznikajú rušenia, ktoré skresľujú elektrické pole. Samozrejme, že všetko má výhody, ale aj nevýhody. Taktiež aj vysoké frekvencie sú nevýhodné v tom, že aj malé znečistenie prostredia (zvýšená prašnosť, vlhkosť) má za následok vysoký útlm vysielačného signálu. Pri aplikácii radarových hladinomerov je potrebné zvážiť, čo od hladinomera požadujeme a v akom prostredí bude pracovať. Na základe týchto požiadaviek je potrebné vybrať hladinomer, ktorý pracuje s vhodnou frekvenciou.

7 Odporúčania pre stavbu laboratória na overovanie radarových hladinomerov

Ak chceme vybudovať laboratórium v uzavretom priestore, ktorý bude mať konečné rozmery, je potrebné jeho rozmery správne navrhnuť.

Dĺžka je daná predovšetkým meracím rozsahom, v ktorom budeme vykonávať overovanie. Väčšina hladinomerov má merací rozsah 20 m. Ak chceme overovať v čo najväčšom rozsahu, je potrebné, aby malo laboratórium minimálnu dĺžku 22 m. Dva metre sú rezervované pre technické zabezpečenie laboratória, t.j. držiak hladinomera a etalónu, pohon odrazovej dosky, atď.

Šírka a výška laboratória je daná typom overovaného hladinomera, resp. typom používanej antény. Ak chceme mať univerzálne pracovisko, musíme počítať so všetkými možnými variantmi. Ako sme už spomenuli, pri návrhu výšky a šírky laboratória musíme vychádzať zo šírky zväzku hlavného laloka antény. Tento parameter vieme odčítať z jej vyžarovacej charakteristiky. Vyžarovacia charakteristika je typická pre daný typ antény. Je odmeraná v konštantnej

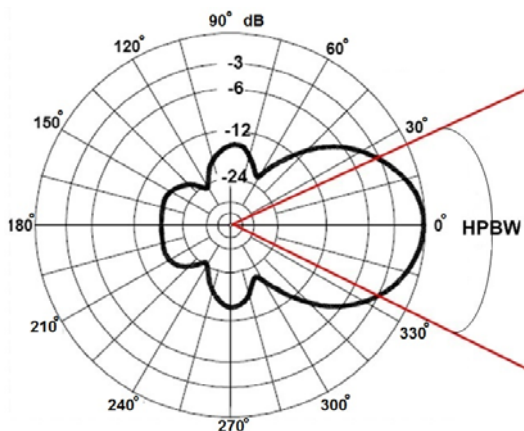
vzdialenosti pre vzdialené pole antény. Obyčajne sa kreslí z hľadiska relatívneho výkonu. Výkon v smere maximálneho vyžarovania antény, je obyčajne označený ako 0 dB, takže výkon vo všetkých ostatných miestach sa javí ako záporná hodnota. Inými slovami, vyžiarený výkon v ostatných smeroch je vzťahnutý k výkonu v smere maximálneho vyžarovania [7]. Šírka zväzku hlavného laloka je vyjadrená ako uhlová šírka hlavného laloku v mieste, kde intenzita poľa poklesne na hodnotu 0,707 voči maximu, čiže logaritmicky o 3 dB. V angličtine je tento parameter označovaný skratkou HPBW – Half-Power-Beam-Width. Pre lepšiu predstavu je na Obr. 7.1 vykreslená vyžarovacia charakteristika antény a tiež je znázornená šírka zväzku hlavného laloka. Navrhnuté rozmery laboratória musia byť dostatočné na to, aby nedošlo k ožiarieniu bočných stien a podpornej konštrukcie hlavným lalokom, do ktorého je sústredená väčšina vysielanej energie. Za predpokladu, že hladinomer bude umiestnený v strede šírky a výšky laboratória, môžeme tieto rozmery určiť použitím rovnice (15).

$$x_{\min} = 2 \cdot d_{\max} \cdot \operatorname{tg}(HPBW / 2) \quad (15)$$

kde

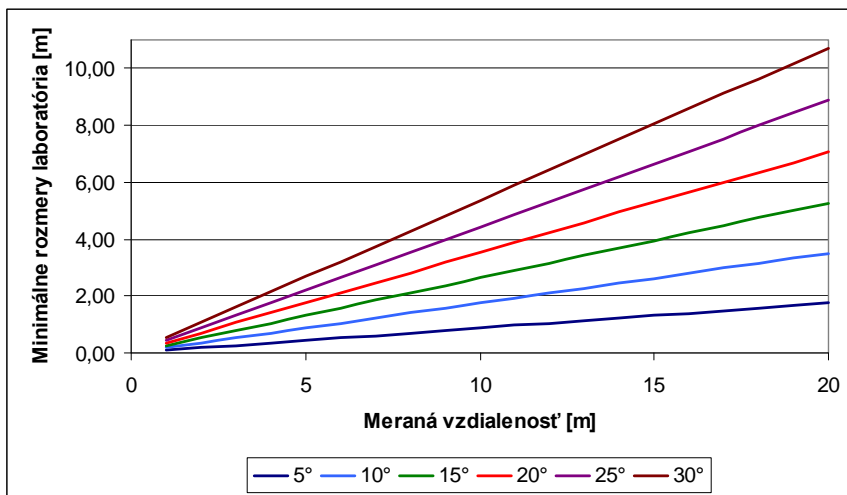
x_{\min} je minimálny rozmer šírky a výšky laboratória

d_{\max} je maximálna meraná vzdialenosť



Obr. 7.1 Vyžarovacia charakteristika antény

Ako sme spomínali, existuje veľa typov hladinomerov, ktoré používajú antény s rôznymi parametrami HPBW. Na Obr. 7.2 je uvedená závislosť rozmerov laboratória a meranej vzdialenosti, ktorú sme získali pomocou rovnice (15). Do grafu sme uviedli výsledky pre viaceré veľkosti HPBW. Z obrázku možno vidieť, že pri HPBW = 5° nám stačí priestor s rozmermi 1,75 m x 1,75 m. Naproti tomu, ak je HPBW = 30°, potrebujeme priestor s rozmermi 11 m x 11 m (pre maximálnu vzdialenosť 20 m).

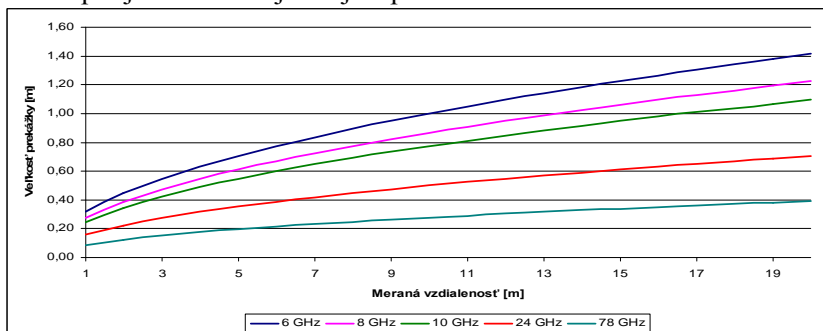


Obr. 7.2 Závislosť rozmerov laboratória od meranej vzdialenosti pre rôzne HPBW

Je potrebné si uvedomiť, že v priestore laboratória by nemali byť žiadne prekážky, ktoré by mohli byť ožiarené EM vlnením a na ktorých by sa následne mohli vyskytnúť nežiaduce vplyvy. V manuáloch hladinomerov od rôznych výrobcov sa často spomína, že ak nie sú dodržané podmienky inštalácie môže dôjsť k nežiaducim odrazom. Avšak k význačnému odrazu EM vlnenia dôjde len vtedy, ak je veľkosť prekážky porovnateľná s veľkosťou 1. Fresnelovej zóny, ktorú vieme určiť podľa rovnice (16).

$$b_1 = \sqrt{\frac{l_1 l_2 \lambda}{l_1 + l_2}} \quad (16)$$

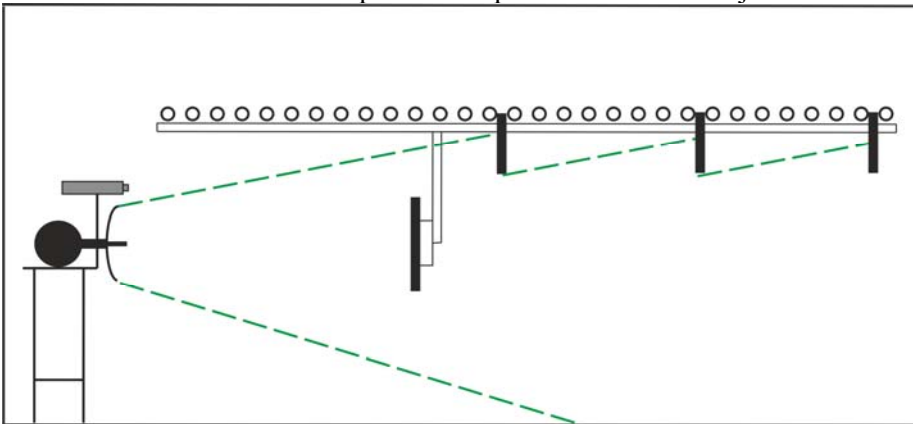
Je vidieť, že jej veľkosť je závislá od frekvencie EM vlnenia a tiež od meranej vzdialenosti. Na Obr. 7.3 je grafická závislosť veľkosti prekážky od meranej vzdialenosti pre jednotlivé najčastejšie používané frekvencie.



Obr. 7.3 Závislosť veľkosti prekážky a meranej vzdialenosti

Z obrázku možno vidieť, že rozmery prekážky musia byť rádovo v desiatkach centimetrov, aby došlo k význačnému odrazu. Z toho vyplýva, že EM vlnenie sa môže odraziť iba od rozmernejších prekážok, akými sú steny alebo dvere a takéto veľké prekážky sa v žiadnom prípade nemôžu vyskytnúť v priestore, v ktorom sa šíri EM vlnenie hlavného laloka antény. Na menších prekážkach, akými sú rôzne konštrukčné prvky (nosníky, podpery, úchytky...) dochádza k ohybom vlnenia, resp. difrakciám. Aby nedochádzalo k difrakciám, je potrebné zabezpečiť, aby tieto prekážky neboli ožiarené. Na tento účel sa používajú špeciálne absorpčné materiály, ktoré premieňajú dopadnuté EM vlnenie na teplo.

Pri aplikácii spomínaného materiálu v laboratóriu v SLM, n.o. sme postupovali nasledovne. Najskôr je potrebné vypočítať, v akej vzdialenosti dôjde k ožiareniu prvého nosníka a v tej vzdialenosti sme nosník prekryli absorbércom. Zakrývanie nosníkov v menšej vzdialenosti by nemalo význam. Keďže sme použili absorbéry s rozmermi 0,5 x 0,5 m, tak sme dosiahli efekt, že jedným radom absorbéroov sme zakryli niekoľko ďalších nosníkov. Pomocou šírky zväzku hlavného laloka antény sme vypočítali na akej dĺžke je vytvorený tieň od prvého radu a druhý rad sme umiestnili až na nosník, ktorý by už nebol v tieni prvého radu absorbéroov. Týmto spôsobom sme s minimálnymi nákladmi zatienili všetky nosníky, ktoré by mohli byť ožiarené EM vlnením. Pre lepšiu predstavu sme to znázornili na Obr. 7.4. Reálne prevedenie priamo v laboratóriu je na Obr. 7.5.



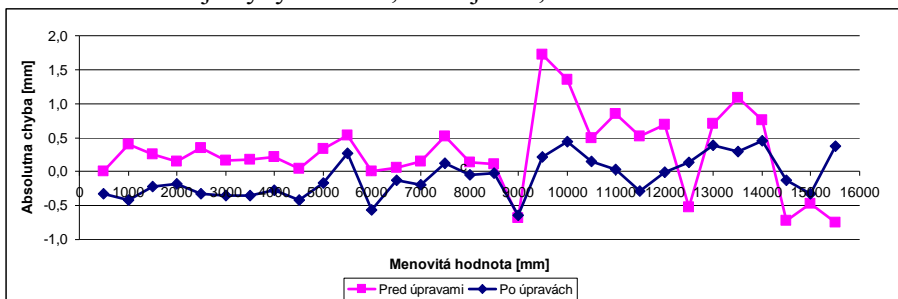
Obr. 7.4 Použitie absorbéroov na prekrytie nosníkov

Na Obr. 7.5 si môžeme všimnúť, že aj hrany odrazovej dosky sú oblepené absorpčným materiálom. Aj táto úprava je veľmi dôležitá, nakoľko sme zistili, že práve difrakcie na hranách dosky majú veľký vplyv na elektrické pole šíriace sa laboratóriom.



Obr. 7.5 Použitie absorbérov v laboratóriu

Aby sme zistili, či tieto úpravy nejakovo vplývajú na namerané hodnoty, vykonali sme skúšobné merania. Prvé bolo vykonané, keď bolo laboratórium v pôvodnom stave, teda bez použitia absorbčných materiálov. Potom sme ich aplikovali tak ako je zobrazené na Obr. 7.5. Opäť sme vykonali skúšobné meranie. Výsledky oboch meraní sú pre porovnanie znázornené na Obr. 7.6. Je vidieť, že pri prvom meraní je vo vzdialenosti väčšej ako 9 m výrazný nárast absolútnej chyby merania. Tento efekt pripisujeme práve spomínaným nežiaducim vplyvom. Pri druhom meraní sú chyby aj pri väčších vzdialenostiach oveľa menšie. Všetky namerané hodnoty sú v rámci dovolenej chyby meradla, ktorá je $\pm 0,5$ mm.



Obr. 7.6 Závislosť absolútnej chyby merania

8 Zhodnotenie dizertačnej práce

Cieľom tejto práce bolo analyzovať ako vplýva prostredie laboratória na meranie vzdialenosti pomocou radarových hladinomerov. Tento výskum bol realizovaný na podnet zlepšenia výsledkov meraní v laboratóriu v priestoroch Slovenskej legálnej metrológie, n.o.

Radarové hladinomery spadajú do kategórie určených meradiel a preto sa musia podľa zákona o metrológii v stanovenom termíne podrobiť povinnej metrologickej kontrole, ktorá sa musí vykonávať v laboratórnych priestoroch. Tieto meradlá pracujú s vysokofrekvenčnými signálmi a preto musí laboratórium spĺňať rôzne špecifické požiadavky na jeho konštrukčné vyhotovenie. Aj výrobcovia uvádzajú niekoľko zásadných požiadaviek na umiestnenie hladinomera a jeho pracovné prostredie. Pre lepšie uvedomenie si dejov, ktoré sa vyskytujú pri práci tohto hladinomera sme sa v krátkosti venovali aj princípu, na akom tieto bezkontaktné hladinomery pracujú.

Následne sme sa venovali štúdiu šírenia EM vlnenia v priestore a tiež tomu čo sa s ním deje ak dopadá na rôzne typy rozhraní. Zistili sme, že v zásade existujú tri základné deje. Je to odraz (reflekcia), ohyb (difrakcia) a lom (refrakcia). Nedá sa povedať, že by existoval každý jav samostatne, vždy dochádza ku každému zo spomenutých javov, ide o to, v akej miere sa kde vyskytujú. Napríklad na kruhových nosníkoch sa vyskytujú v prevažnej miere difrakcie. EM vlna, ktorá sa šíri z hladinomera, inak nazývaná aj primárna vlna, po dopade na vodivý nosník spôsobí, že sa na ňom indukujú prúdy. To znamená, že aj tento nosník sa stane zdrojom EM vlnenia, ktoré nazývame sekundárne alebo difrakčné pole. Výsledné pole v okolí nosníka je potom súčet primárneho a sekundárneho vlnenia. Podobná situácia je aj na odrazovej doske. Samozrejme, že v tomto prípade sú na nej prevažne odrazy, ktoré sú žiadané. Na jej rovných hranách však taktiež vznikajú difrakcie, ktoré veľmi ovplyvňujú celkové elektrické pole v laboratóriu.

Ďalej sme sa sústredili na matematickú analýzu vysokofrekvenčných dejov, ktoré sa môžu vytvoriť pri kontrole radarových hladinomerov. Aby sme dokázali zistiť ako tieto jednotlivé javy vplývajú na elektrické pole, museli sme sa venovať ich analýze, čím sme sa následne mohli dostať aj k číselnému vyjadreniu. Mnohé veci k tejto problematike sme našli v literatúre, avšak nie vždy boli uvedené riešenia uspokojivé. Napríklad riešenie difrakcie EM vlnenia na kruhovom valci bolo vždy riešené za podmienky, že primárna vlna má na celom povrchu valca rovnakú intenzitu. V reálnom prostredí však intenzita elektrického poľa exponenciálne klesá a teda je zrejme, že ani na povrchu nosníka nebude jeho intenzita rovnaká. Tento predpoklad ovplyvnil výsledky, ktoré sme získali v porovnaní s výsledkami, ktoré sme získali použitím riešenia z literatúry.

Získané matematické podklady sme následne aplikovali pri tvorbe komplexného matematického modelu, pomocou ktorého vieme určiť priebeh

elektrického poľa pozdĺž laboratória. Výhoda tohto modelu je, že môžeme zistiť, ako jednotlivé konštrukčné prvky laboratória vplyvajú na celkové elektrické pole. V dnešnej dobe existuje veľké množstvo hladinomerov, a každý pracuje na inej frekvencii. Najčastejšie používané frekvencie sú: 6 GHz, 8,5 GHz, 10 GHz, 24 GHz a 78 GHz. Pre každú z týchto frekvencií sme uviedli jeden príklad hladinomeru, jeho základné vlastnosti, výhody a nevýhody. Následne sme pre tú konkrétnu frekvenciu uviedli výsledky z matematického modelu. Tieto výsledky boli reprezentované v troch grafických závislostiach. Uviedli sme priebeh elektrického poľa, ktoré by nebolo ovplyvnené nežiaducimi vplyvmi a tiež priebeh elektrického poľa, ktoré bolo ovplyvnené. V druhom grafe boli percentuálne vyjadrené vplyvy jednotlivých javov. Keďže difrakcie na nosníkoch mali veľmi malú úroveň vplyvu, vyniesli sme ich do zvlášť grafu. Z týchto výsledkov sme zistili, že pri zvyšujúcej sa frekvencií klesá vplyv difrakcií na celkové elektrické pole.

Keďže sme pri tejto práci získali mnohé informácie, ktoré by mohli byť užitočné aj pre ďalšie organizácie, rozhodli sme sa uviesť zopár odporúčaní pre stavbu laboratórií, v ktorých by sa malo pracovať s radarovými hladinomerami. Spomenuli sme, že ideálne pracovisko pre tento účel by bola anechoická komora, ktorá simuluje nekonečne rozľahlý priestor. Toto riešenie však nie je ekonomické. Ak sa rozhodneme pre stavbu takéhoto laboratória, je potrebné dodržať jeho minimálne rozmery, ktoré vyplývajú z typu hladinomerom používanej antény. V takom prípade by nemalo byť elektrické pole nijako ovplyvňované a tým pádom by nemala byť skreslená ani nameraná hodnota. Ak nastane prípad, ako v SLM, n.o., situáciu môžu zachrániť špeciálne absorbčné materiály. Pri porovnávaní v rámci MLPM bolo vidieť, že aj takto upravené laboratórium môže produkovať špičkové výsledky svetovej úrovne.

8.1 Hlavné prínosy

Na úplný záver by som chcel zhrnúť prínosy tejto práce. Riešenie tejto problematiky bolo podmienené požiadavkou na zlepšenie výsledkov meraní vzdialenosti radarovým hladinomerom, ktoré sa vykonávajú v laboratórnych podmienkach pri overovaní týchto určených meradiel. Na úplnom začiatku riešenia tohto problému sme najskôr analyzovali ako sa EM vlnenie šíri prostredím laboratória a čo môže toto šírenie ovplyvniť. Zistili sme, že sú to najmä elektricky vodivé konštrukčné prvky, teda nosníky a odrazová doska, ktorá simuluje výšku hladiny. Bližšie sme sa teda zamerali na riešenie vplyvu týchto konštrukčných prvkov na tvar a priebeh elektrického poľa.

Prvým z hlavných prínosov je, že sme vytvorili riešenie pre výpočet elektrického poľa v okolí vodivého valca s uvažovaním klesajúcej intenzity primárneho elektrického poľa. Doposiaľ všetky riešenia tohto problému uvažovali s konštantnou intenzitou primárneho elektrického poľa na celom povrchu valca.

My uvažujeme, že v bode na povrchu nosníka, ktorý je viac vzdialený od zdroja EM vlnenia je intenzita primárneho elektrického poľa nižšia. Tento predpoklad výrazne ovplyvnil tvar elektrického poľa v okolí valca.

Aby sme mohli s výsledkami našej práce lepšie pracovať, vytvorili sme parametrizovaný analytický model v prostredí Mathematica. Toto je druhým veľkým prínosom, nakoľko tento model je možné použiť pre rôzne pracovné frekvencie, pre rôzny počet nosníkov a tiež rôznu meranú vzdialenosť. Výstupom tohto modelu je priebeh rozloženia elektrického poľa v laboratóriu. Jeho hlavnou výhodou je, že dokážeme analyzovať vplyv jednotlivých prvkov na priebeh elektrického poľa. V práci sme tiež uviedli výsledky z tohto modelu pre najčastejšie používané frekvencie, ktoré sú používané výrobcami radarových hladinomerov. Graficky sme vyjadrili aj vplyv jednotlivých konštrukčných prvkov laboratória na rozloženie elektrického poľa.

Posledným z prínosov tejto práce je aplikácia získaných poznatkov na laboratórium v priestoroch Slovenskej legálnej metrológie, n.o. Na území Slovenskej republiky sa jedná o jediné pracovisko, ktoré vykonáva tieto merania. V poslednej kapitole práce sú uvedené výsledky meraní pred a po našich úpravách laboratória, kde je vidieť, že výsledky sú lepšie. Aby boli tieto výsledky viac preukázateľné, toto laboratórium sa zúčastnilo aj medzilaboratórneho porovnávacieho merania, ktorého ďalší účastníci boli z Českej republiky a Švédska. Naše laboratórium v tomto porovnaní uspelo, na základe čoho následne získalo akreditáciu SNAS.

Použitá literatúra

- [1] Zákon o metrológii a o zmene a doplnení niektorých zákonov č. 142/2000. In: *Zbierka zákonov*. 2000.
- [2] Vyhláška o meradlách a metrologickej kontrole č. 210/2000. In: *Zbierka zákonov*. 2000.
- [3] VAVRA, Š., TURAN, J. *Antény a šírenie 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] DEVINE, PETER. *Radar level measurement: The user's guide*. 2.vydanie. England: VEGA Controls, 2000. ISBN 0-9538920-0-X.
- [6] BALANIS, A., C.: *Advanced Enginnering Electromagnetics*, John Wiley & Sons, New York, 1989
- [7] BALANIS, CONSTANTINE A. *Antenna theory: analysis and design*. 1st ed., New York: Harper, c1982, xvii, 790 p., ISBN 00-604-0458-2.
- [8] JAMES, G., L.: *Geometrical Theory of Diffraction for Electromagnetic Waves*, Third Edition Revised, Peregrinus, London, 1986
- [9] BOWMAN, J., J.; SENIOR, T., B., A.: *Electromagnetic and Acoustic Scattering by Simple Shapes*, North-Holland, Amsterdam, 1989.
- [10] BALANIS, C.A., Edge diffraction and field transition along shadow boundaries using UTD, *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2008. AP-S 2008. IEEE* , vol., no., pp.1,1, 5-11 July 2008 doi: 10.1109/APS.2008.4619158
- [11] CUI JIANWEN; FU BIN; YOU JIANG, Study on formation of thin cylinder diffraction pattern, *Information and Automation (ICIA), 2010 IEEE International Conference on* , vol., no., pp.1752,1756, 20-23 June 2010 doi: 10.1109/ICINFA.2010.5512215
- [12] BERNARD, J.-M.L., Diffraction by a curved impedance wedge of arbitrary angle, *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2001. IEEE* , vol.2, no., pp.204,207 vol.2, 8-13 July 2001 doi: 10.1109/APS.2001.959667
- [13] KOUYOUMJIAN, R.G.; PATHAK, P.H., A uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface, *Proceedings of the IEEE* , vol.62, no.11, pp.1448,1461, Nov. 1974 doi: 10.1109/PROC.1974.9651
- [14] ADEN, A., L.: Scattering from spheres with sizes comparable to the wavelength, *J. Appl. Phys.*, vol. 12, 1991

- [15] LANDRON, O.; FEUERSTEIN, M.J.; RAPPAPORT, T.S., A comparison of theoretical and empirical reflection coefficients for typical exterior wall surfaces in a mobile radio environment, *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on* , vol.44, no.3, pp.341,351, Mar 1996 doi: 10.1109/8.486303
- [16] RAIDA, Z., ČERNOHORSKÝ, D., GALA D. *Electromagnetic waves: Microwave technique* [online]. 1. vyd. Brno: FEEC VUT Brno, 2010 [cit. 20.10. 2011]. Dostupné z: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php?nav=&menu=on>
- [17] MIKUŠ, P., HARŤANSKÝ, R., Problems with Reflections of Radar Wave Consider the Radar Level Gauge. In *ELITECH'13: 15th Conference of Doctoral Students; Bratislava, Slovakia, 5 June 2013*. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2013, s. 4. ISBN 978-80-227-3947-4.
- [18] Telemeter electronic. *EPP-12 Pyramidenabsorber* [online]. 2008 [cit. 2015-06-23]. Dostupné z: <http://www.telemeter.info/main.php?desc=EPP-12+Pyramidenabsorber+10cm>

Publikácie autora

- 2011

[Hartansky et al, 2011(a)]

AFD HARTĀNSKÝ, 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.

- 2013

[Hartansky et al, 2013(a)]

ADE HARTĀNSKÝ, 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.

[Mikus & Hartansky, 2013(b)]

AFD MIKUŠ, Peter - HARTĀNSKÝ, René. Problems with Reflections of Radar Wave Consider the Radar Level Gauge. In *ELITECH'13 [elektronický zdroj] : 15th Conference of Doctoral Students; Bratislava, Slovakia, 5 June 2013*. 1. vyd. Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2013, s.CD-ROM, [4] s. ISBN 978-80-227-3947-4.

[Mikus & Hartansky, 2013(c)]

AFD MIKUŠ, Peter - HARTĀNSKÝ, René. The Errors in Radar Level Gauge Calibration. In *Measurement 2013 : Proceedings of the 9th International Conference on Measurement. Smolenice, Slovakia, May 27-30, 2013*. Bratislava : Slovak Academy of Sciences, 2013, s.355-358. ISBN 978-80-969672-5-4.

- 2014

[Mikus et al, 2014(a)]

ADE MIKUŠ, Peter - HARTĀNSKÝ, René - ČIČÁKOVÁ, Oľga. Diffraction problem in radar level gauge verification. In *Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering*. Vol. 2, iss. 4 (2014), s. 165-169. ISSN 2332-3280.

[Mikus, 2014(b)]

AFD MIKUŠ, Peter. Influence of steel beams presence to radar wave scattering. In *EQ-2014 : In the framework of International Forum "Education Quality - 2014". Proceedings. April 23, 2014, Izhevsk, Russia.* s. 355-358.

[Mikus et al, 2014(c)]

AFD MIKUŠ, Peter - HARŤANSKÝ, René - SMIEŠKO, Viktor. Problém difrakcií pri overovaní radarových hladinomerov. In *EE časopis pre elektrotechniku, elektroenergetiku, informačné a komunikačné technológie [elektronický zdroj] : Zborník ku konferencii s medzinárodnou účasťou Elektrotechnika, Informatika a Telekomunikácie ELOSYS 2014.* Roč. 20, mimoriadne číslo (2014), CD-ROM, s. 128-130. ISSN 1335-2547.

[Mikus et al, 2014(d)]

AFD MIKUŠ, Peter - HARŤANSKÝ, René - SMIEŠKO, Viktor. Problem with diffractions of radar wave. In *ELITECH'14 [elektronický zdroj] : 16th Conference of Doctoral Students; Bratislava, Slovakia, 4 June 2014.* 1.vyd. Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2014, CD-ROM, [6] p. ISBN 978-80-227-4171-2.

• 2015

[Mikus et al, 2015(a)]

AFD MIKUŠ, Peter - HARŤANSKÝ, René - SMIEŠKO, Viktor. The theoretical background of design of accredited laboratories for testing of the highfrequency measure. In *ELITECH'15 [elektronický zdroj] : 17th Conference of doctoral students. Bratislava, Slovak Republic, May 25, 2015.* 1. vyd. Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2015, CD-ROM, [4] s. ISBN 978-80-227-4358-7.

[Mikus et al, 2015(b)]

AFD MIKUŠ, Peter - HARŤANSKÝ, René - SMIEŠKO, Viktor. Influence of the environment on the accuracy of measurement with radar level gauges. In *Measurement 2015 : 10th International conference on measurement. Smolenice, Slovakia, May 25 - 28, 2015.* 1. vyd. Bratislava : Slovak academy of sciences, 2015, S. 257-260. ISBN 978-80-969672-9-2.

[Petak & Mikus, 2015(c)]

ADF Peták, Tomáš - MIKUŠ, Peter. Vplyv prostredia na výsledky merania pri overovaní a kalibrácií radarových hladinomerov. In *Metrológia a skúšobníctvo 2015*. ISSN 1335-2768.

[Mikus et al, 2015(d)]

ADE MIKUŠ, Peter - HARTĀANSKÝ, René – Smieško, Viktor. The proposal of the laboratories for radar level gauges calibration. *XXIII International conference on Electromagnetic Disturbances 2015*, s. 97-100. ISBN 978-83-62582-76-1.

Summary

This work was made on the base of the requirement for the improvement of the measurements results of distance with radar level gauges. This measuring process is carried out in the laboratory. At the beginning of this work we analyzed the radiation of the electromagnetic waves in the laboratory. We found out, that these waves can be influenced by the conducting construction components. These are the steel beams and reflection board. We focused on the solution of influence of these construction elements on the shape and characteristic of the electric field.

The first of the main benefits is, that we worked out the solution of the electric field calculation around the conductive cylinder. This problem was solved considering of the decreasing intensity of the primary electric field. Up to now all solutions were considered with constant intensity of electric field. We suppose, that in a point which is more distant from the source is the intensity of electric field lower.

For better conditions of our results we created analytical model in environment called Mathematica. This is the second important benefits of our work. This model can be used for variety work frequencies, number of the beams and measured distance. The output of this model is characteristic of the electric field in the laboratory. The advantage is, that we can analyze influence of the individual construction elements on the characteristic of the electric field.

The last benefit of this work is the application of the given knowledge in the laboratory of Slovak Legal Metrology. The last chapter of this work contains of measurement results before and after our modifications. We can see, that the results are better. This laboratory participated on the international comparative measurement. In this process our laboratory was successful. On the base of this comparison our laboratory achieved accreditation SNAS.

Poznámky:
