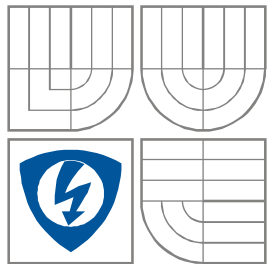


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

Návrh antény ULF – Nízkoúrovňová magnetická měření

Anetnna design for ULF – Low-level magnetic measurements

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Martin Škoda

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. Pavel Fiala, Ph.D.

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**
Ústav radioelektroniky

Student: Martin Škoda

ID: 155244

Ročník: 3

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Návrh antény pro ULF- Nízkoúrovňová magnetická měření

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte základní vlastnosti šíření elektromagnetického pole velmi nízkých frekvencí, v rozsahu 0,1 až 30 Hz. Na teoretickém příkladu modelujte způsoby šíření a změny magnetické složky této vlny. Navrhněte způsob snímání a vyhodnocení elektromagnetické vlny s těmito parametry, způsob snímání změn šíření této vlny. Navrhněte vhodné typy antén a shrňte jejich výhody vzhledem k parametru S/N.

Navrhněte design vybrané antény, návrh analyzujte a anténu realizujte. Navrhněte pracoviště pro snímání elektromagnetické vlny v pásmu ULF. Proveďte laboratorní experimentální měření s navrženou anténou. Experimentální výsledky porovnejte s teoretickými a vyhodnoťte vlastnosti dosažené v experimentech.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] BARCHANSKI, A., CLEMENS, M., DE GERSEM, H. Efficient calculation of current densities in the human body induced by arbitrarily shaped, low-frequency magnetic field sources. *Journal of Computational Physics*. 2006, roč. 214, č. 1, 81–95. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021999105004249>

[2] HANNA, S.A., MOTAI, Y., VARHUE, W., TITCOMB, S. Measurement evaluations of static and low frequency magnetic fields in the near field region. *Measurement*. 2011, roč. 44, č. 8, 1412–1421. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224111001527>

Termín zadání: 8.2.2016

Termín odevzdání: 26.5.2016

Vedoucí práce: prof. Ing. Pavel Fiala, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce:

doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně / Technická 3058/10 / 616 00 / Brno

ABSTRAKT

Předložená práce se zabývá návrhem a studií snímacího prvku (antény) pro účely nízkoúrovňových nízkofrekvenčních měření magnetických polí. Nejprve pojednává o šíření elektromagnetického pole a způsobu šíření elektromagnetické vlny. Poté pomocí programu Ansys Maxwell jsou simulovány tři modely snímacích prvků. Na závěr jsou realizovány dva návrhy antén a provedeno laboratorní měření s nimi.

KLÍČOVÁ SLOVA

Elektromagnetické pole, magnetická indukce, ionosféra, Schumannova frekvence, ULF, anténa.

ABSTRACT

The present work deals with the design and study of the sensing element (antenna) for ultra low level measurements of low frequency magnetic fields. At the first, it considers the propagation of electromagnetic fields and form of propagation of electromagnetic waves. Then, using Ansys Maxwell are simulated by three models sensing elements. At the end of thesis, two antennas are implemented and conducted laboratory measurements with them.

KEYWORDS

Electromagnetic field, magnetic induction, ionosphere, Schumann frequency, ULF, antenna.

ŠKODA, M. *Návrh antény ULF – nízkourovňová magnetická měření*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2016. 11 s., 3 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: prof. Ing. Pavel Fiala, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Návrh antény ULF – nízkourovňová magnetická měření jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Pavlovi Fialovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

OBSAH

Seznam obrázků	vii
Seznam tabulek	ix
Úvod	1
1 Teoretický úvod	2
1.1 Elektromagnetické pole	2
1.1.1 Měření EMG pole	4
1.2 Vznik elektromagnetického vlnění	4
1.2.1 Poyntingův vektor	5
1.3 Ionosféra	5
1.3.1 Plazma.....	6
1.3.2 Ionosférické vrstvy	6
1.4 Schumannova frekvence	7
1.5 ULF – ultra nízká frekvence	9
2 Modely, analýza a simulace ulf antén	11
2.1 Model 1	12
2.2 Model 2	17
2.3 Model 3	22
3 Praktická část – návrh laboratorního měření, experimenty	27
3.1 Laboratorní pracoviště pro test EMG vlny v pásmu ULF	27
3.2 Návrh ULF antén	28
3.3 Laboratorní měření	30
4 Závěr	34
Literatura	35
Seznam symbolů, veličin a zkratk	36

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Magnetická a elektrická složka elektromagnetického pole převzato z [6].....	3
Obrázek 2: Směr šíření elektromagnetické vlny	4
Obrázek 3: Ionosférické vrstvy [16].	7
Obrázek 4: Elektromagnetické vlny šířící se mezi povrchem Země a ionosférou.	8
Obrázek 5: Spektrogram Schumannovy frekvence.....	9
Obrázek 6: Nízkofrekvenční vlny v okolí Zemského povrchu a ionosféry převzato z [9].	10
Obrázek 7: Modely ULF antén pro simulaci v programu Ansys Maxwell.	11
Obrázek 8: 2-D model 1 ULF antény v prostředí Ansys Maxwell.	12
Obrázek 9: Rozložení a velikost magnetické indukce B v oblasti antény při změně amplitudy vnější magnetické indukce $dB = 0,1 \mu\text{T}$	13
Obrázek 10: Velikost a směr šíření vektoru magnetické intenzity H při změně amplitudy $dB = 0,1 \mu\text{T}$	13
Obrázek 11: Průběh indukovaného napětí u modelu 1 při změně amplitudy vnějšího magnetického pole $dB = 0,1 \mu\text{T}$	14
Obrázek 12: Průběh indukovaného proudu i modelu 1 při změně amplitudy vnějšího magnetického pole $dB = 0,1 \mu\text{T}$	14
Obrázek 13: Rozložení a velikost magnetické indukce B v oblasti antény při změně amplitudy vnější magnetické indukce $dB = 1 \mu\text{T}$	15
Obrázek 14: Velikost a směr šíření vektoru magnetické intenzity H modelu 1 při změně amplitudy vnější magnetické indukce $dB = 0,1 \mu\text{T}$	16
Obrázek 15: Průběh indukovaného napětí u modelu 1 při změně amplitudy vnějšího magnetického pole $dB = 1 \mu\text{T}$	16
Obrázek 16: Průběh indukovaného proudu i modelu 1 při změně amplitudy vnějšího magnetického pole $dB = 1 \mu\text{T}$	17
Obrázek 17: 2-D model 2 ULF antény v prostředí Ansys Maxwell.	17
Obrázek 18: Rozložení a velikost magnetické indukce B modelu 2 v oblasti antény při změně amplitudy vnější magnetické indukce $dB = 0,1 \mu\text{T}$	18
Obrázek 19: Velikost a směr šíření vektoru magnetické intenzity H modelu 2 při změně amplitudy vnější magnetické indukce $dB = 0,1 \mu\text{T}$	18
Obrázek 20: Průběh indukovaného napětí u modelu 2 při změně amplitudy vnějšího magnetického pole $dB = 0,1 \mu\text{T}$	19
Obrázek 21: Průběh indukovaného proudu i modelu 2 při změně amplitudy vnějšího magnetického pole $dB = 0,1 \mu\text{T}$	19

Obrázek 22: Rozložení a velikost magnetické indukce B modelu 2 v oblasti antény při změně amplitudy vnější magnetické indukce $dB = 1 \mu\text{T}$	20
Obrázek 23: Velikost a směr šíření vektoru magnetické intenzity H modelu 2 při změně amplitudy vnější magnetické indukce $dB = 1 \mu\text{T}$	21
Obrázek 24: Průběh indukovaného napětí u modelu 2 při změně amplitudy vnějšího magnetického pole $dB = 1 \mu\text{T}$	21
Obrázek 25: Průběh indukovaného proudu i modelu 2 při změně amplitudy vnějšího magnetického pole $dB = 1 \mu\text{T}$	22
Obrázek 26: 2-D model 3 ULF antény v prostředí Ansys Maxwell.....	22
Obrázek 27: Rozložení a velikost magnetické indukce B modelu 3 v oblasti antény při změně amplitudy vnější magnetické indukce $dB = 0,1 \mu\text{T}$	23
Obrázek 28: Velikost a směr šíření vektoru magnetické intenzity H modelu 3 při změně amplitudy vnější magnetické indukce $dB = 0,1 \mu\text{T}$	23
Obrázek 29: Průběh indukovaného napětí u modelu 3 při změně amplitudy vnějšího magnetického pole $dB = 0,1 \mu\text{T}$	24
Obrázek 30: Průběh indukovaného proudu i modelu 3 při změně amplitudy vnějšího magnetického pole $dB = 0,1 \mu\text{T}$	24
Obrázek 31: Rozložení a velikost magnetické indukce B v oblasti antény při změně amplitudy vnější magnetické indukce $dB = 1 \mu\text{T}$	25
Obrázek 32: Velikost a směr šíření vektoru magnetické intenzity H modelu 3 při změně amplitudy vnější magnetické indukce $dB = 1 \mu\text{T}$	25
Obrázek 33: Průběh indukovaného napětí u modelu 3 při změně amplitudy vnějšího magnetického pole $dB = 1 \mu\text{T}$	26
Obrázek 34: Průběh indukovaného proudu i modelu 3 při změně amplitudy vnějšího magnetického pole $dB = 1 \mu\text{T}$	26
Obrázek 35: Pracoviště pro buzení a snímání elektromagnetické vlny v pásmu ULF... ..	27
Obrázek 36: Měřicí přístroje.....	28
Obrázek 37: Model 1 ULF antény.....	29
Obrázek 38: Model 3 ULF antény.....	29
Obrázek 39: Průběh indukovaného napětí u při frekvenci $f = 30\text{Hz}$ odečtený z osciloskopu.....	30
Obrázek 40: Graf amplitudy indukovaného napětí u v závislosti na frekvenci f modelu 1.....	32
Obrázek 41: Graf amplitudy indukovaného napětí u v závislosti na frekvenci f modelu 3.....	33

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Tabulka odečtených hodnot modelu 1 pro $5\mu\text{T}$	31
Tabulka 2: Vypočítané hodnoty nejistoty typu A pro model 1.....	32
Tabulka 3: Tabulka odečtených hodnot modelu 3 pro $B = 5\mu\text{T}$	33
Tabulka 4: Vypočítané hodnoty nejistoty typu A pro model 3.....	33

ÚVOD

Cílem práce je analyzovat a navrhnout anténu pro snímání nízkoúrovňových ultranízkořekvenčních signálů, seznámit se se základním šířením elektromagnetické vlny. Na teoretickém příkladu ukázat a následně modelovat geometrické návrhy antény pro analýzu způsobu šíření magnetické složky této vlny. Z poznatků navrhnout a vybrat vhodné typy antén. V další části se práce zabývá návrhem antény a jejím experimentálním ověřením vlastností a to laboratorním měřením.

V úvodní části této práce jsou popsány vlastnosti elektromagnetického pole a způsob šíření elektromagnetické vlny. Dále jsou v práci popsány základní data a fakta ionosféry a její vliv na šíření elektromagnetické vlny v blízkém prostoru Země. V další části jsou pomocí programu Ansys Maxwell provedeny numerické modely, návrh a simulace uspořádání a tvarů prvků snímače. Z těchto poznatků byly navrženy a sestaveny modely ULF antén. V poslední části bylo navrženo měřicí pracoviště pro snímání a buzení elektromagnetické vlny a provedeno laboratorní měření.

1 TEORETICKÝ ÚVOD

1.1 Elektromagnetické pole

Elektromagnetické (EMG) pole je fyzikální pole, které odpovídá míře působení elektrické a magnetické části EMG vlny ve sledovaném prostoru. Lze popsat dvě složky vázané do EMG pole, složku elektrického pole a složku magnetického pole. Elektromagnetické pole je obecně popsáno Maxwellovými rovnicemi[1], které v redukovaném tvaru lze interpretovat jako:

$$\mathit{rot}\mathbf{E} = \frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\mathit{rot}\mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial\mathbf{D}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\mathit{div}\mathbf{D} = \rho \quad (3)$$

$$\mathit{div}\mathbf{B} = 0 \quad (4)$$

dále tyto rovnice doplňuje rovnice kontinuity, která vyplývá ze vztahů (2) a (3), když $\mathit{div}\mathit{rot}\mathbf{H} = 0$:

$$\mathit{div}\mathbf{J} + \frac{\partial\rho}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

a materiálové vztahy:

$$\mathbf{D} = \varepsilon\mathbf{E} \quad (6)$$

$$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H} \quad (7)$$

$$\mathbf{J} = \gamma\mathbf{E} \quad (8)$$

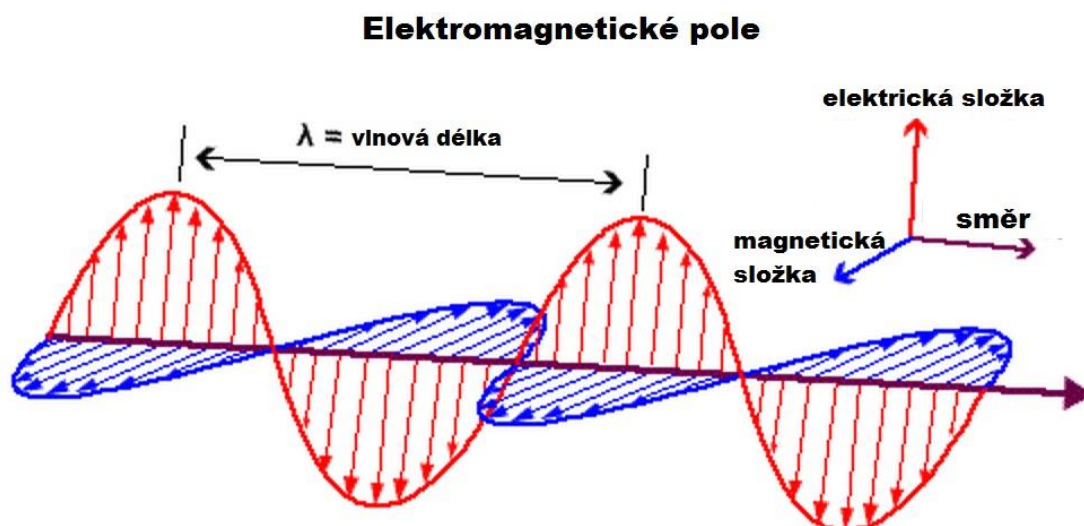
kde E [V/m] ... vektor intenzity elektrického pole
 H [A/m] ... vektor intenzity magnetického pole,
 D [C/m²] ... vektor elektrické indukce,
 B [T] ... vektor magnetické indukce,
 J [A/m²] ... vektor plošné hustoty elektrického proudu (proudová hustota),
 ρ [C/m³] ... objemová hustota elektrického náboje,
 γ [S/m] ... měrná vodivost.

Z rovnice (1) a (2) je patrné, že elektrické pole je propojeno s časovou změnou magnetického pole a magnetické pole je propojeno s elektrickým proudem a časovou změnou elektrického pole. Díky tomu elektromagnetické pole není závislé na proudových zdrojích a je schopné se samostatně šířit pomocí elektromagnetických vln [2].

Elektromagnetické pole jako vlna záření je charakterizováno vlnovou délkou, frekvencí a intenzitou magnetického pole. Má vlnově korpuskulární charakter, lze ji popsat jako vlnu i jako hmotné částice. Vztah mezi frekvencí a vlnovou délkou vychází ze vztahu:

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (9)$$

kde f je frekvence, c je rychlost šíření EMG vlny v prostoru (ve vakuu světla) a λ je vlnová délka. EMG pole jako záření má elektrické a magnetické složky a vektory těchto složek jsou na sebe kolmé. Na Obrázku 1 je znázorněna vlnová délka pole, jeho magnetická a elektrická složka.



Obrázek 1: Magnetická a elektrická složka elektromagnetického pole převzato z [6].

1.1.1 Měření EMG pole

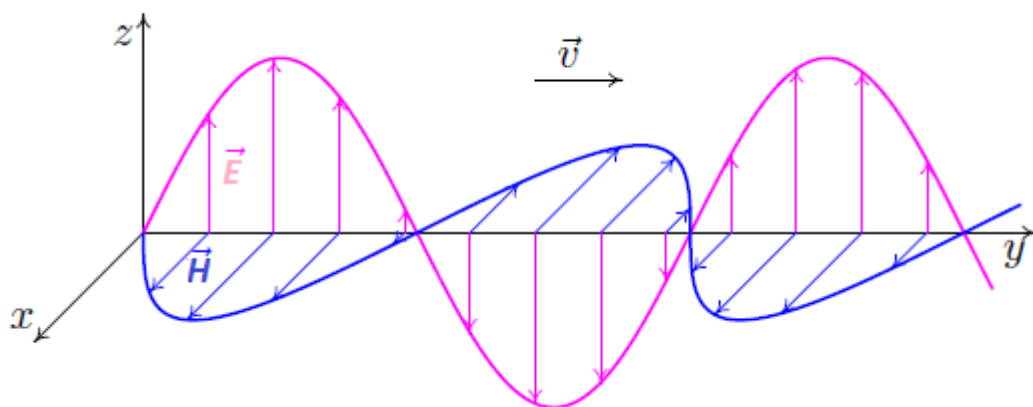
Koercimetr je přístroj pro měření EMG pole a pro měření koercivity feromagnetik. U cívky s feromagnetickým materiálem ($\mu_r \gg 1$) do procesu vstupují vlastnosti materiálů [2]. Jedna z těchto vlastností je Barkhausenův šum. Tento šum souvisí s nespojitostmi v procesu magnetizace feromagnetického materiálu

Feromagnetické materiály mají elementární dipóly uspořádané do tzv. domén. Každá doména se magnetizuje podél krystalograficky vyznačených směrů. Domény jsou přitom navzájem odděleny hranicemi, kterým se říká doménové (Blochovy) stěny. Vnější magnetické pole způsobuje pohyb doménových stěn. Aby se doménová stěna mohla pohnout, doména na jedné straně stěny se musí zvětšit a doména na druhé straně se smrští. Výsledkem je pak změna celkové magnetizace vzorku. Je-li cívka z vodivého drátu umístěna v blízkosti vzorku v době, kdy se doménová stěna pohybuje, související změna magnetizace vzorku indukuje v cívce elektrický puls [3].

1.2 Vznik elektromagnetického vlnění

EMG vlnění představuje děj vzájemných přeměn elektrické a magnetické složky pole. Obě složky, elektrická, kterou představuje vektor intenzity elektrického pole \vec{E} , a magnetická, kterou tvoří vektor intenzity magnetického pole \vec{H} , jsou neoddělitelně spjaty a vytvářejí jediné elektromagnetické pole.

Tyto složky jsou na sebe navzájem kolmé a jsou kolmé na směr šíření vlnění. To znamená, že každé elektromagnetické vlnění je příčné vlnění. Na Obrázku 2 se elektromagnetická vlna šíří v kladném směru osy x , vektor intenzity elektrického pole se promítá do osy y a vektor magnetické indukce do osy z . Navíc platí, že u postupné vlny jsou oba vektory ve fázi – obě veličiny nabývají svých maximálních hodnot ve stejném časovém okamžiku.



Obrázek 2: Směr šíření elektromagnetické vlny.

Rovinnou vlnu postupující ve směru osy x lze popsat harmonickými funkcemi:

$$E = E_m \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) = E_m \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \quad (10)$$

$$B = B_m \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) = B_m \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \quad (11)$$

rychlost šíření elektromagnetického vlnění závisí na prostředí, kterým se vlnění šíří:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (12)$$

kde ϵ je permitivita a μ je permeabilita prostředí. Ve vakuu se tedy elektromagnetické vlnění šíří rychlostí:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1} \quad (13)$$

z toho vyplývá, že rychlost šíření elektromagnetické vlny v dielektriku ($\epsilon_r > 1$) je menší, než rychlost šíření ve vakuu, tj. $v < c$. Podíl šíření vlny ve vakuu a dielektriku je tzv. absolutní index lomu dielektrika:

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (14)$$

1.2.1 Poyntingův vektor

Pomocí Poyntingova $\mathbf{\Pi}$ vektoru [1] lze zapsat výkonovou rovnováhu elektromagnetického pole:

$$\mathbf{\Pi} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (15)$$

Poyntingův vektor (v jednotkách W/m^2) kvantifikuje měrnou hustotu toku elektrického výkonu EMG vlny.

1.3 Ionosféra

Ionosféra je ionizovaná část atmosféry významně ovlivňující šíření elektromagnetických signálů [7]. Je složena z neutrálních plynů, iontů a elektronů. V důsledku ionizace neutrálních plynů slunečním zářením je prostředí elektricky vodivé. Ionosféra má velký význam pro život biosféry planety Země, také je využívána pro šíření krátkých radiových vln, které se od ní mohou odrazet a tím se šíří daleko od

vysílače. Ovlivňuje však i šíření dalších signálů, jako jsou třeba globální navigační systémy GPS. Spodní okraj ionosféry je ve výšce asi 60 km (den), 150 km (noc), v horní části pak ionosféra ve výšce 700-1000 km postupně přechází do plazmasféry.

Nejdůležitější informací o stavu ionosféry je elektronová koncentrace v dané výšce. Ta se zjišťuje pomocí ionosond [7]. Ionosonda funguje na stejném principu jako radar. Z pozemní vysílací antény se vyšle směrem vzhůru krátký impulz a měří se doba návratu do přijímací antény. Elektromagnetická vlna se v ionosféře odrazí právě ve výšce, kde se její frekvence rovná plazmové frekvenci. Vlny s vyšší frekvencí prostředím plazmatu procházejí. Z časového zpoždění návratu odražené vlny lze spočítat výšku odrazu. Maximální frekvence signálu, který se ještě od dané vrstvy odrazí, se nazývá kritická frekvence, signály s vyšší frekvencí vrstvou procházejí.

1.3.1 Plazma

Plazma je seskupena a tvoří směs těžkých iontů a lehkých elektronů a existuje ve vesmíru v různých, často velmi odlišných formách. S plazmatem se ve svém okolí můžeme setkat. Konvenční hvězdy jsou tvořeny plazmatem, dále mlhoviny, ionosféra nebo sluneční vítr. Parametry plazmatu v těchto formách se liší o mnoho řádů [7].

Vlivem elektrického a magnetického pole se plazmatem může šířit široká řada oscilací a vln na akustických, radiových a optických frekvencích. Jedná se o oscilace nízko úrovně magnetických polí na nízkých frekvencích v pásmech, ULF (Ultra Low Frequency), SLF (Super Low Frequency), ELF (Extreme Low Frequency). Tyto nízko úrovně magnetické pole souvisí s oscilacemi iontů. Jde o zvukové vlny ovlivněné přítomností magnetického pole. Označují se jako magnetoakustické vlny. Jejich typickou frekvencí je plazmová frekvence iontů [7]:

$$\omega_{pe} = \frac{e^2 n_e}{m \epsilon_0} \quad (16)$$

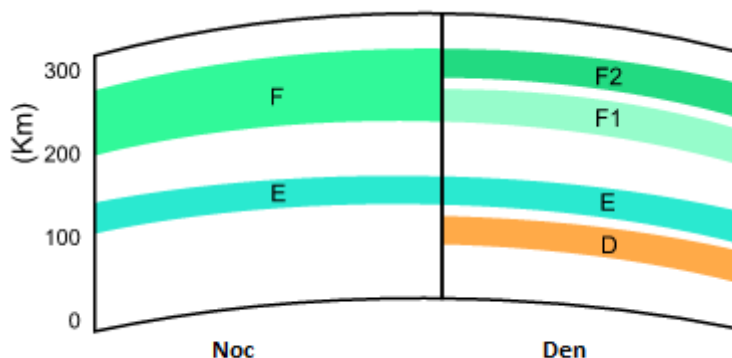
kde ω_{pe} označuje plazmovou frekvenci, n_e značí koncentraci elektronů, m je hmotnost elektronu a ϵ_0 je permitivita vakua.

1.3.2 Ionosférické vrstvy

Sluneční záření je při svém průchodu atmosférou filtrováno, s výškou se mění i chemické složení plynů. Proto dochází k vytvoření několika ionosférických vrstev D, E, F1, F2 a Es (tato jediná vrstva zůstává přes noc, ostatní během několika sekund až minut kvůli rychlé rekombinaci po západu slunce zanikají) [7].

Vzhledem k tomu, že sluneční paprsky ozařující příslušnou část ionosféry, uvolňují určitá množství elektronů a tak způsobují menší či větší elektrickou vodivost jejich vrstev, dochází podle stupně vodivosti k odrazům elektromagnetického vlnění v daném místě. Stupeň ionizace závisí na sluneční činnosti. Obecně vzrůstá stupeň ionizace od nejméně ionizované dolní vrstvy D k nejvíce ionizované vrstvě F2 (Obrázek 3). Dolní vrstva zpravidla odrazí vlny nižšího kmitočtu, zatímco vyšší kmitočty se postupně odraží od vyšších vrstev. Pro velmi vysoké kmitočty však netvoří zábranu ani odrazivost vrstvy F2, a tak pronikají do kosmického prostoru. Odrazivost ionosféry je

tedy různá podle kmitočtu elektromagnetického vlnění.



Obrázek 3: Ionosférické vrstvy [16].

Vrstva D:

Vrstva D je nejnižší ionosférická vrstva, přibližně ve výšce mezi 50-90 km. Odráží především dlouhé vlny, ostatní jsou průchodem touto vrstvou zeslabovány.

V noci tato vrstva okamžitě zaniká, ale v malé míře přetrvává kvůli ionizaci kosmickým zářením. Tato vrstva je zodpovědná za útlum v pásmu HF ve dne.

Vrstva E:

Vzniká ve výšce 90-130 km. Odráží především střední vlny. V noci, po zániku vrstvy D, odráží i dlouhé vlny. Vzhledem k velké nestabilitě vrstvy se k pravidelnému vysílání nedá použít.

Vrstva F (Appeltonova vrstva):

Vzniká ve výškách od 150 do 300 km. Ve dne se štěpí na dvě oblasti F1 a F2. Oblast F1 vzniká ve výšce 130 až 250 km a odráží kmitočty do 5,5MHz. Oblast F2 se nachází ve výšce nad 250 km a odráží kmitočty do 5 MHz.

V období maxima sluneční činnosti může vrstva F odrážet i kmitočty do 30MHz. Tyto vrstvy mají vliv především na šíření krátkých vln. Při vhodném směřování antén lze dosáhnout i vícenásobných odrazů mezi ionosférou a povrchem Země. V takových případech se může vysílané záření šířit okolo celé Země.

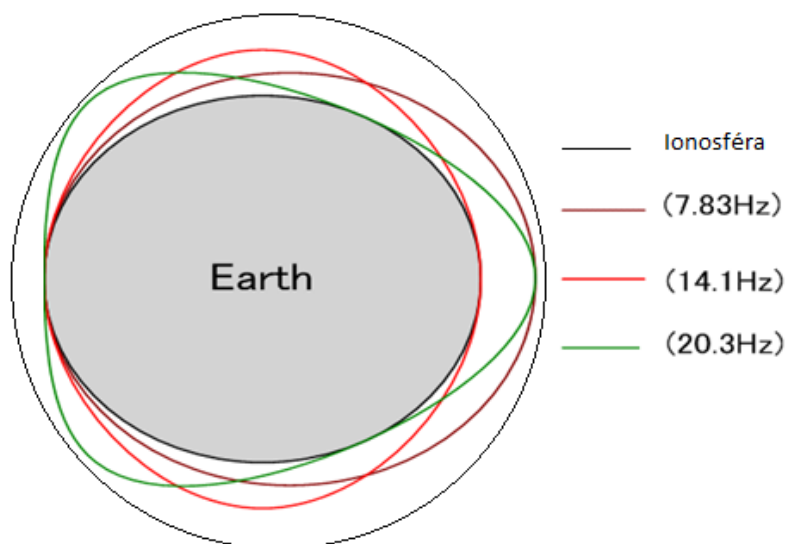
Vrstva Es:

Sporadická vrstva. Vzniká při mimořádných atmosférických situacích ve stejné výšce, jako vrstva E. Díky vysoké hustotě iontů dochází na této vrstvě k odrazu kratších vlnových délek, které se pak šíří na mimořádně velké vzdálenosti.

1.4 Schumannova frekvence

Zemi, z pohledu makroskopického, lze považovat za téměř vodivou kouli zabalenou

v tenké dielektrické atmosféře [14], která sahá až do ionosféry. Atmosférické elektrické výboje generují širokopásmové elektromagnetické vlny, které se šíří mezi povrchem Země a ionosférou (Obrázek 4). Tyto dvě vrstvy definují povrch ionosférické dutiny, která podporuje dva typy elektromagnetických režimů, podélný režim odpovídající globální, kvazi-horizontální vlně šířící se kolem Země a příčný režim odpovídající lokální, kvazi-vertikální vlně šířící se mezi povrchem Země a ionosférou. Podélný režim se nazývá Schumannova rezonance.



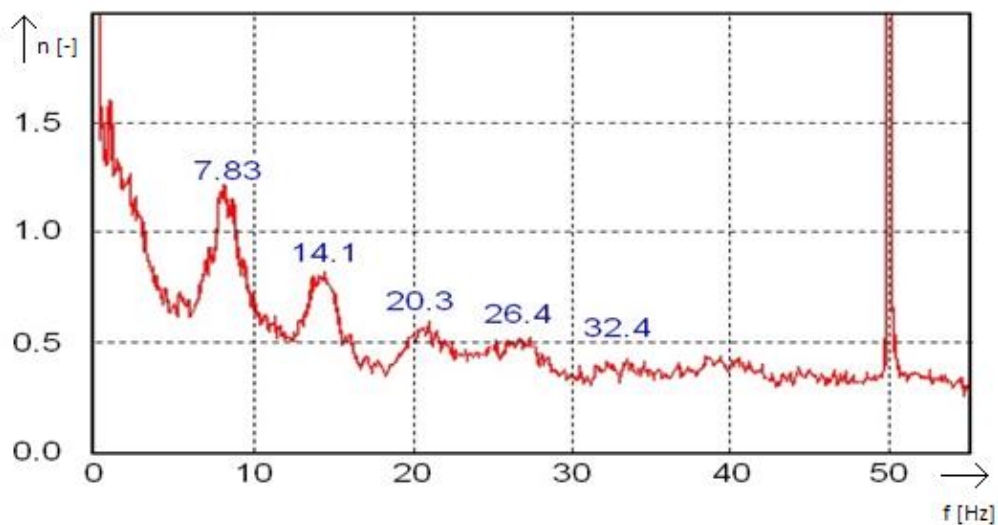
Obrázek 4: Elektromagnetické vlny šířící se mezi povrchem Země a ionosférou.

Schumannova rezonance (SR) je frekvence, ve které kmitá elektromagnetické pole nad zemským povrchem pod ionosférou v rozsahu 3 do 300 Hz. Tento prostor rezonuje a elektromagnetické vlny se v něm šíří podle vztahů popsaných Maxwellovými rovnicemi. Základní hodnota SR je 7,83 Hz.

Pro tenkou bezeztrátovou dutinu je Schumannova frekvence ω_n dána vztahem [14]:

$$\omega_n = \left(\frac{c}{R}\right) * \sqrt{n(n + 1)} \quad (17)$$

kde c je rychlost světla, R poloměr Země a $n = 1, 2, 3$ odpovídá hodnotě jednotlivých frekvencí (vidům). Průměrné frekvence pěti nejnižších hodnot jsou 7.83 Hz, 14.1 Hz, 20.3 Hz, 26.4 Hz a 32.4 Hz (Obrázek 5).



Obrázek 5: Spektrogram Schumannovy frekvence.

Charakteristika Schumannovy frekvence závisí na vlastnostech jejich zdroje, umístění pozorovacího bodu vzhledem ke zdroji a na chování hustoty a vodivosti elektronů v ionosféře. Za předpokladu konstantního rozložení zdroje, lze Schumannovu frekvenci použít pro stanovení průměrné vodivosti ionosféry [14].

Základní hodnota rezonance planety Země odpovídá některým funkčním frekvencím lidského mozku. Ty se nachází mezi frekvencemi na úrovni theta a alfa. Lidský organismus vysílá spektrum nízkourovňových elektromagnetických polí v podobě dvou typů vln, například:

EKG (vlny srdce):

ELF pole srdce 0,04 – 0,26 Hz

EEG (vlny mozku):

delta 0 – 4 Hz

theta 4 – 8 Hz

alfa 8 – 13 Hz

beta 13 – 30 Hz

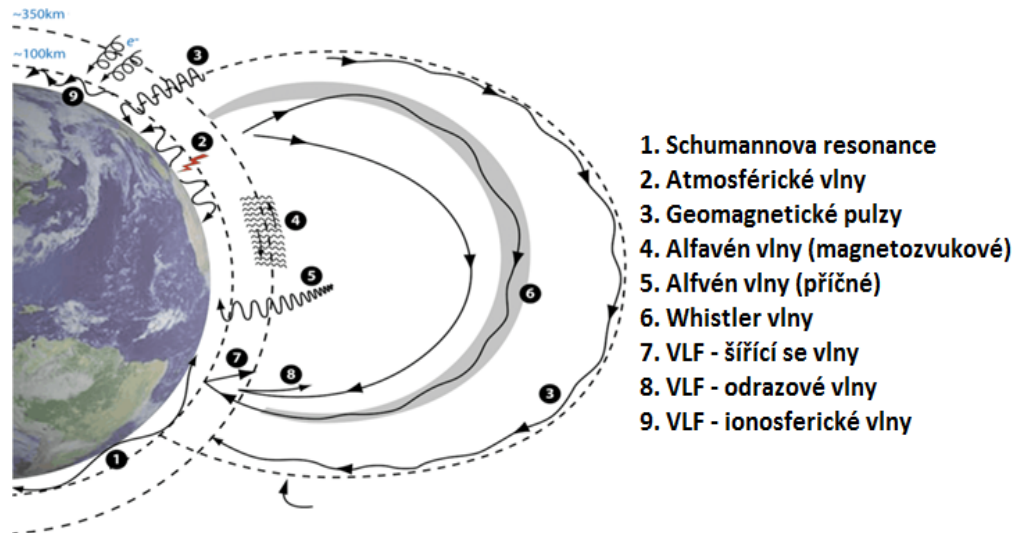
Práce je zaměřena na návrh a sestavení antény pro monitorování velikosti změn zemského magnetického pole, které interferuje ve svém důsledku s EMG polem lidského těla. Doktorská práce [15] se zabývá vyhodnocením vlivu externího magnetického pole a jeho změn na lidský organismus. Předložená práce je součástí výzkumu uvedené doktorské práce [15].

1.5 ULF – ultra nízká frekvence

ULF je označení pro elektromagnetické záření (rádiové vlny) s frekvencí od 3 do 30 Hz. Měření na nízkých frekvencích se provádí za účelem vyhodnocení účinku magnetického

pole na lidský organismus[15].

Mnoho typů EMG vln v kmitočtovém pásmu ULF lze pozorovat v magnetosféře a na zemi. Tyto vlny představují významné fyzikální procesy v blízkosti Země. Na Obrázku 6 jsou znázorněny nízkofrekvenční vlny, které se nacházejí v prostoru mezi zemským povrchem a ionosférou.



Obrázek 6: Nízkofrekvenční vlny v okolí Zemského povrchu a ionosféry převzato z [9].

Alfvénovy vlny jsou anizotropní magnetoakustické vlny. Šíří se v ionizovaném prostředí (plazmatu) za přítomnosti magnetického pole. Rychlost těchto vln je často spojená s rychlostí Alfvén, která závisí na okolní měrné hmotnosti magnetického pole a v plazmě. Při Alfvénově vlně dochází k příčnému rozvolnění magnetických siločárek a k přenosu energie zvukové vlny podél siločárek tzv. Alfvénovou rychlostí:

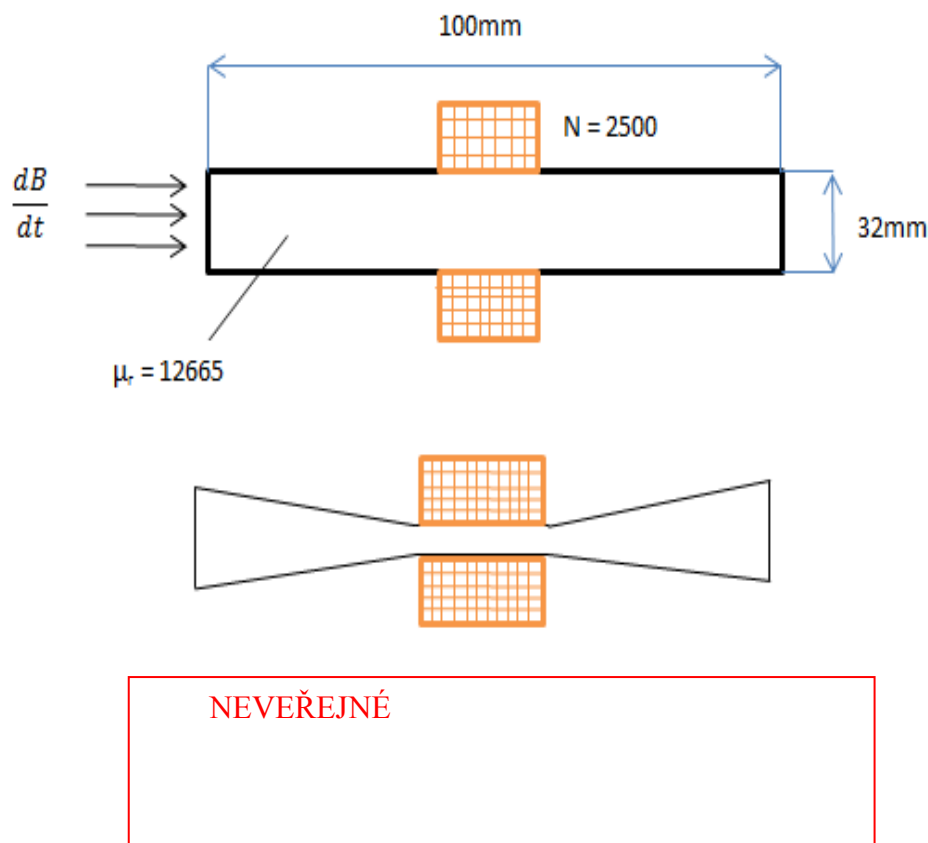
$$v_A = \frac{B}{\sqrt{\mu_0 \rho}} \quad (18)$$

kde B je modul magnetické indukce, ρ hustota plazmatu a μ_0 permeabilita vakua.

Sluneční vítr a geomagnetické pole na sebe vzájemně působí a vytváří zemskou magnetosféru. Díky tomu jsou generovány ULF plazmatické vlny, které mají vlnovou délku srovnatelnou s velikostí magnetosféry. Energie v režimu Alfvén je tvořena magnetickým polem a pro denní období vodivosti ionosféry, která tvoří rezonanční siločáry. Odchylka velikosti magnetického pole a studené plazmy v magnetosféře vede k prostorově závislé charakteristické rychlosti vlny.

2 MODELY, ANALÝZA A SIMULACE ULF ANTÉN

Jádro mojí práce se zabývá návrhem ULF antén a porovnání výsledků jejich analýz v programu Ansys Maxwell. Byly zvoleny tři modely antén (Obrázek 7). Všechny návrhy a simulace byly prováděny ve 2-D modelu.



Obrázek 7: Modely ULF antén pro simulaci v programu Ansys Maxwell.

Okrajové podmínky lze popsat takto. Model antény se nachází v prostředí odpovídající vlastnostem vakua. Simulace byly provedeny na frekvenci $f = 10$ Hz. Magnetické pole bylo buzeno podle $dB = 1 \mu\text{T}$ a $dB = 0,1 \mu\text{T}$. Proto ke každému modelu antény byly provedeny 2 analýzy. U jednotlivých měření byla vyhodnocována magnetická indukce B , magnetická intenzita H , velikost indukovaného napětí u a velikost indukovaného proudu i v zátěži R .

Nejprve byla určena hodnota permeability μ_r materiálu použitého ke stavbě antény z relace:

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (19)$$

kde $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \text{Hm}^{-1}$ je permeabilita vakua, $B = 1,13 \text{ T}$ a $H = 71 \text{ A/m}$ jsou hodnoty odpovídající materiálu z čistého železa. Z toho vyplývá:

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H} \quad (20)$$

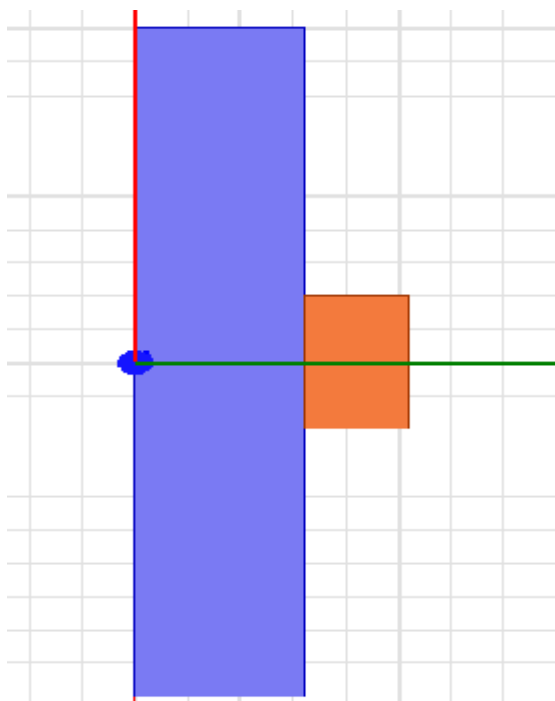
po dosazení hodnot pro daný materiál:

$$\mu_r = \frac{1,13}{4\pi * 10^{-7} * 71} = 12665 \quad (21)$$

Tato hodnota permeability materiálu byla zvolena a používána v modelech ANSYS u všech modelů ULF antén pro možnost srovnání snímacích vlastností.

2.1 Model 1

V programu Ansys Maxwell byl vytvořen 2D model antény (Obrázek 8), který se skládá z materiálu z čistého železa (Pure Fe) a k němu nastavena elektrická cívka z mědi o $N_c=2500$ závitů.

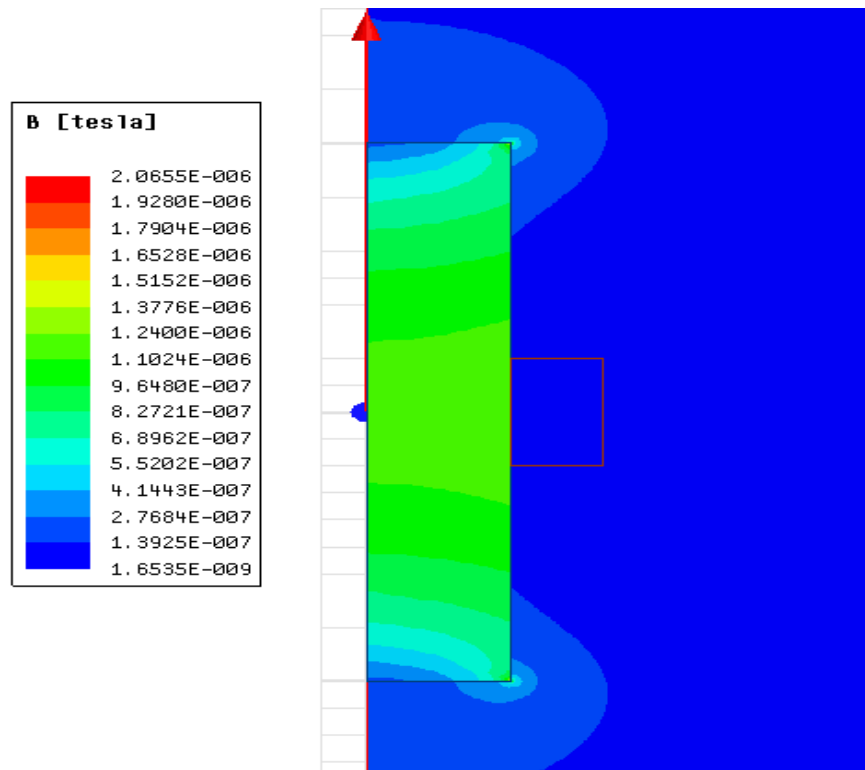


Obrázek 8: 2-D model 1 ULF antény v prostředí Ansys Maxwell.

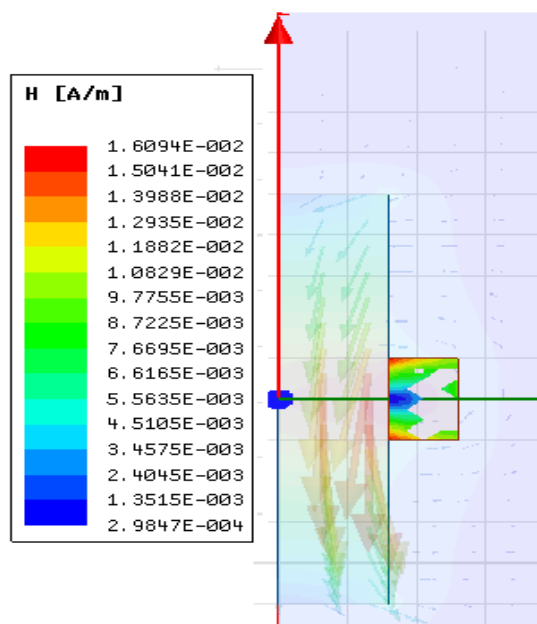
Na Obrázku 9 je znázorněná magnetická indukce po vybuzení $dB = 0,1 \mu\text{T}$. Z obrázku je patrné, že hodnota magnetická indukce B v oblasti cívky se pohybuje

v rozmezí jednotek μT až desetin μT .

Velikost a směr šíření magnetické intenzity je zobrazen na Obrázku 10.



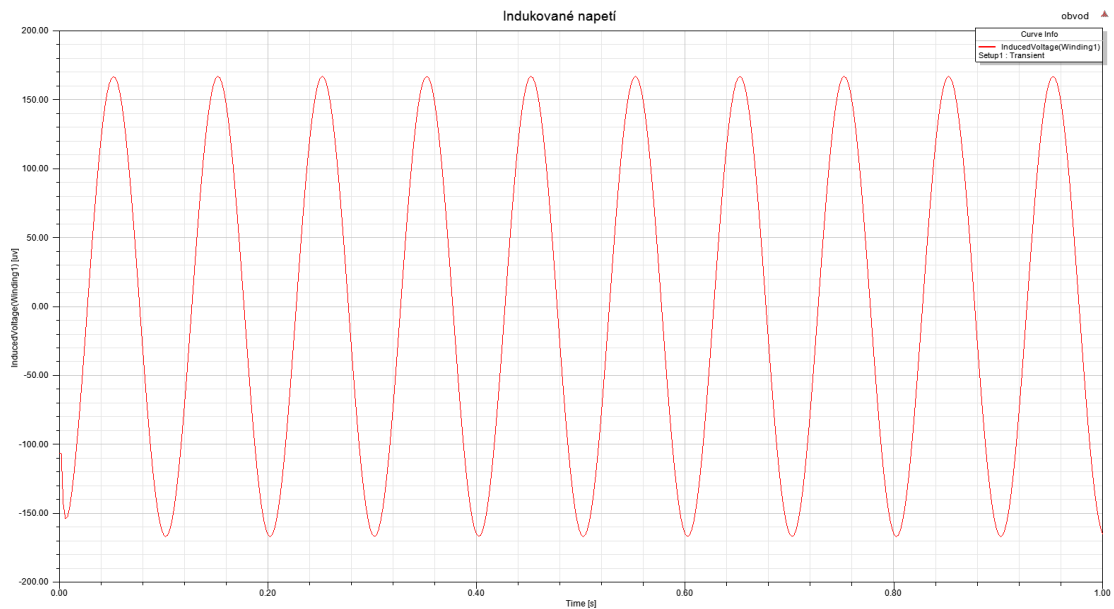
Obrázek 9: Rozložení a velikost magnetické indukce B v oblasti antény při změně amplitudy vnější magnetické indukce $dB = 0,1 \mu\text{T}$.



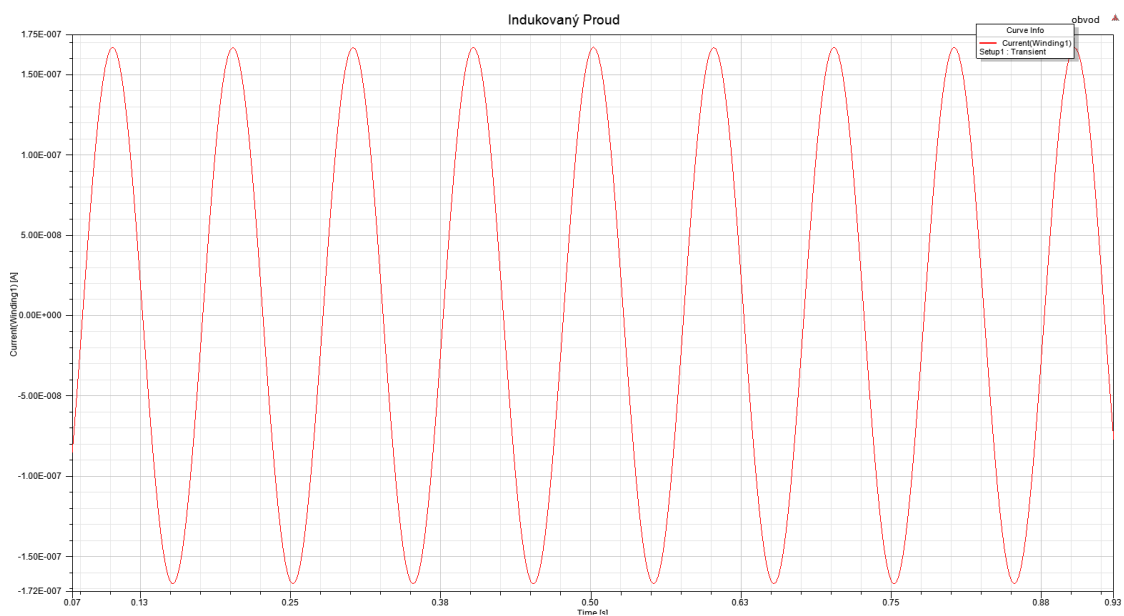
Obrázek 10: Velikost a směr šíření vektoru magnetické intenzity H při změně amplitudy $dB = 0,1 \mu\text{T}$.

Pro měření závislosti indukovaného napětí (Obrázek 11) a proudu (Obrázek 12) byla zvolena analýza po dobu 1s a s krokem 0,02s pro jemné vyhlazení výsledných průběhů.

Ze závislosti indukovaného napětí u na čase lze vidět, že hodnota indukovaného napětí je $U_{ss} = 340 \mu\text{V}$. Velikost indukovaného proudu $I_{ss} = 340 \text{ nA}$.



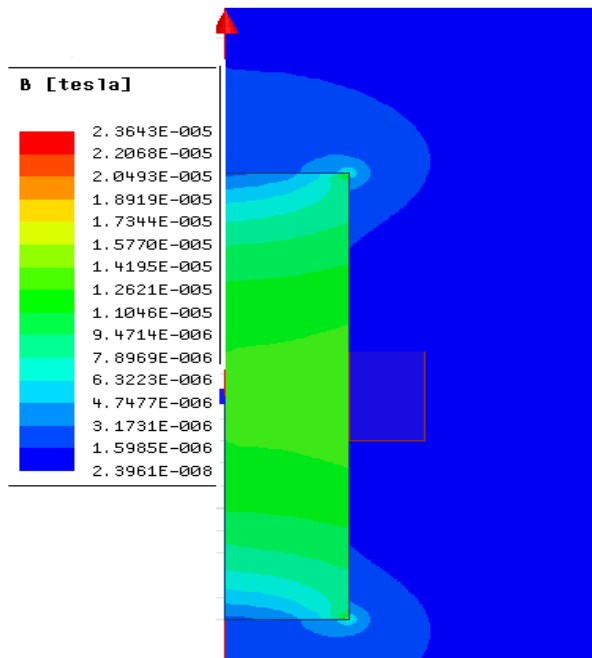
Obrázek 11: Průběh indukovaného napětí u modelu 1 při změně amplitudy vnějšího magnetického pole $dB = 0,1 \mu\text{T}$.



Obrázek 12: Průběh indukovaného proudu i modelu 1 při změně amplitudy vnějšího magnetického pole $dB = 0,1 \mu\text{T}$.

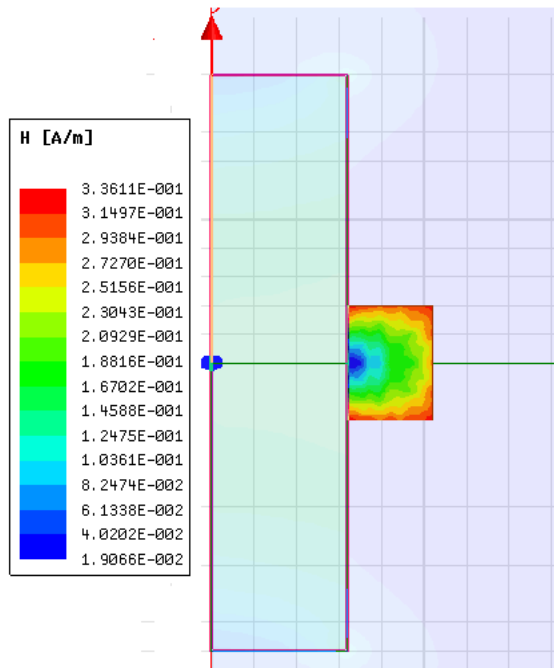
Na stejném modelu antény byly provedeny simulace po vybuzení $dB = 1 \mu\text{T}$.

Z Obrázku 13 je patrné, že velikost magnetické indukce se vzhledem k buzení hodnotou amplitudy $dB = 0,1 \mu\text{T}$ zvýšila a pohybuje se v oblasti $B_a = 10 \mu\text{T}$.



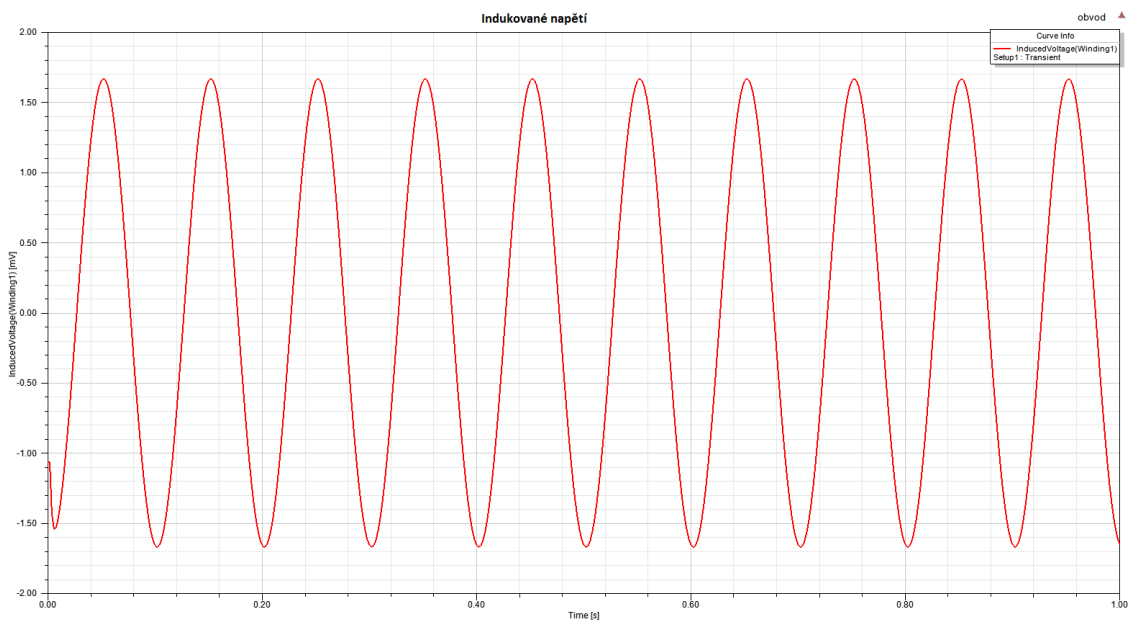
Obrázek 13: Rozložení a velikost magnetické indukce B v oblasti antény při změně amplitudy vnější magnetické indukce $dB = 1 \mu\text{T}$.

Magnetická intenzita H při buzení $dB = 1 \mu\text{T}$ se pohybuje v hodnotách od 80 A/m do 330 A/m (Obrázek 14). Z toho vyplývá, že magnetická intenzita H se řádově zvýšila oproti buzení $dB = 0,1 \mu\text{T}$.

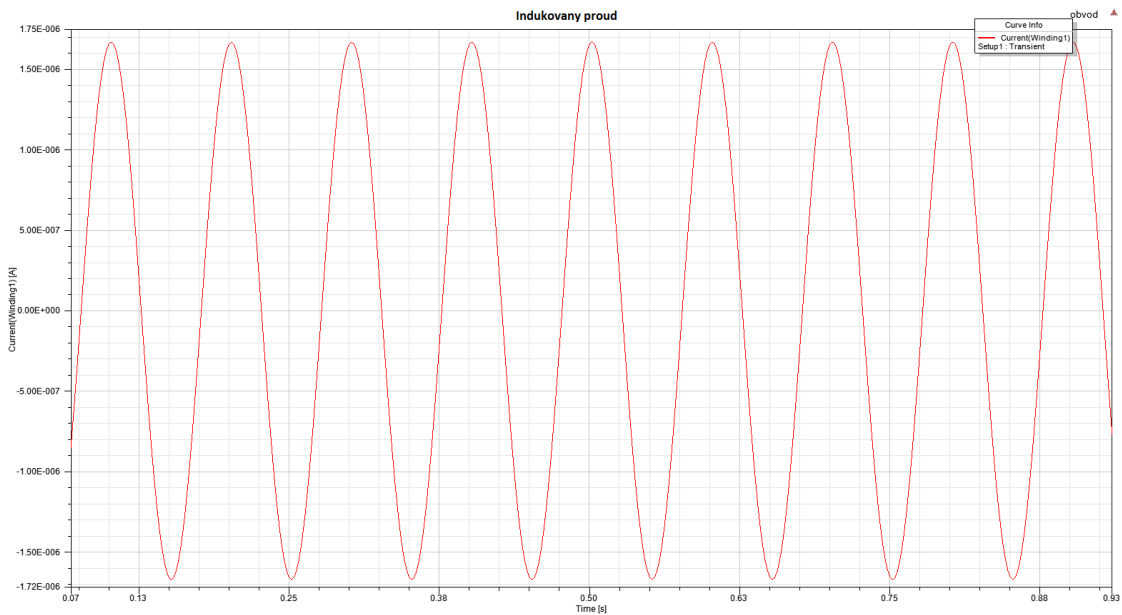


Obrázek 14: Velikost a směr šíření vektoru magnetické intenzity H modelu 1 při změně amplitudy vnější magnetické indukce $dB = 0,1 \mu\text{T}$.

Stejně tak se zvýšilo indukované napětí u (Obrázek 15) amplituda na hodnotu $U_{\text{ss}} = 3,4 \text{ mV}$ a indukovaný proud (Obrázek 16) a jeho amplituda $I_{\text{ss}} = 3,4 \mu\text{A}$.



Obrázek 15: Průběh indukovaného napětí u modelu 1 při změně amplitudy vnějšího magnetického pole $dB = 1 \mu\text{T}$.

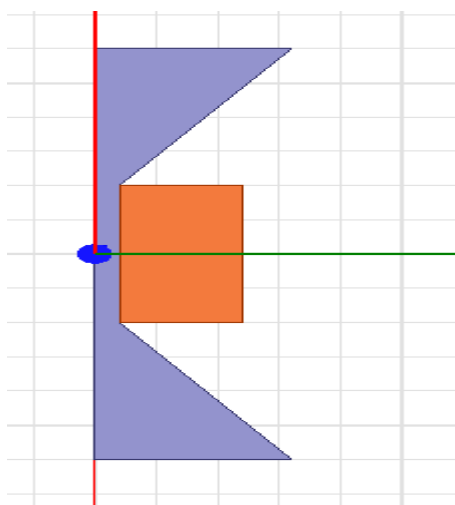


Obrázek 16: Průběh indukovaného proudu i modelu 1 při změně amplitudy vnějšího magnetického pole $dB = 1 \mu\text{T}$.

2.2 Model 2

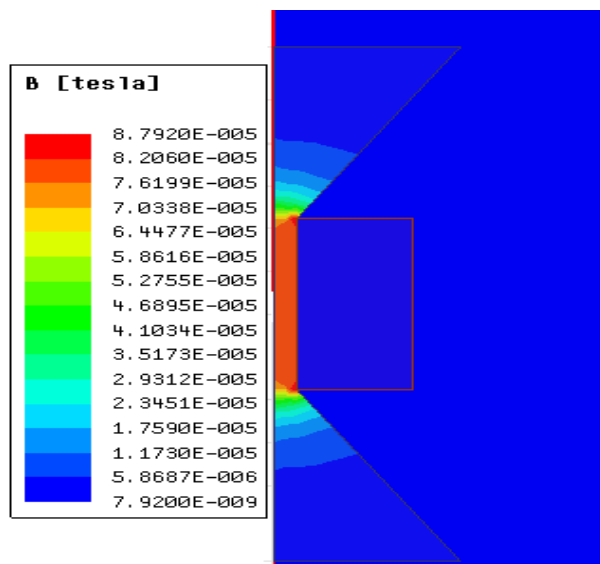
Jako další návrh ULF antény byl zvolen model 2 (Obrázek 17). Stejně jako předchozí návrh (Obrázek 8) se skládá z materiálu o permeabilitě $\mu_r = 12665$ a cívky o $N_c=2500$ závitů. V nejužším místě má šířku 5mm. Okolní prostředí bylo zvoleno vakuum.

Tento design byl navrhnout pro zesílení vnějšího magnetického pole (konusy), aby pro shodný počet závitů bylo vyšší indukované napětí.



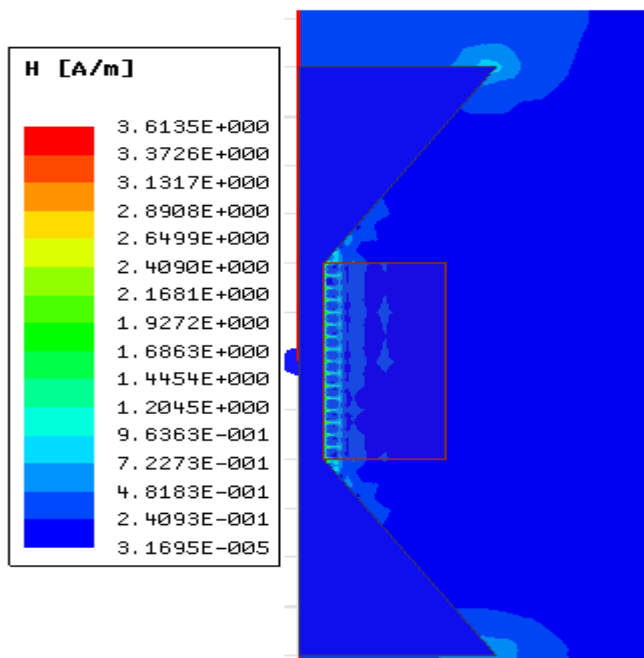
Obrázek 17: 2-D model 2 ULF antény v prostředí Ansys Maxwell.

Na Obrázku 18 je znázorněno rozložení magnetické indukce modelu 2 ULF antény při buzení amplitudou $\text{dB} = 0,1 \mu\text{T}$. Z něho je patrné, že nejvyšší magnetická indukce v oblasti antény ($B_a = 82 \mu\text{T}$) se nachází v nejužším místě.



Obrázek 18: Rozložení a velikost magnetické indukce B modelu 2 v oblasti antény při změně amplitudy vnější magnetické indukce $\text{dB} = 0,1 \mu\text{T}$.

Na dalším Obrázku 19 je znázorněno rozložení modulu magnetické intenzity H .

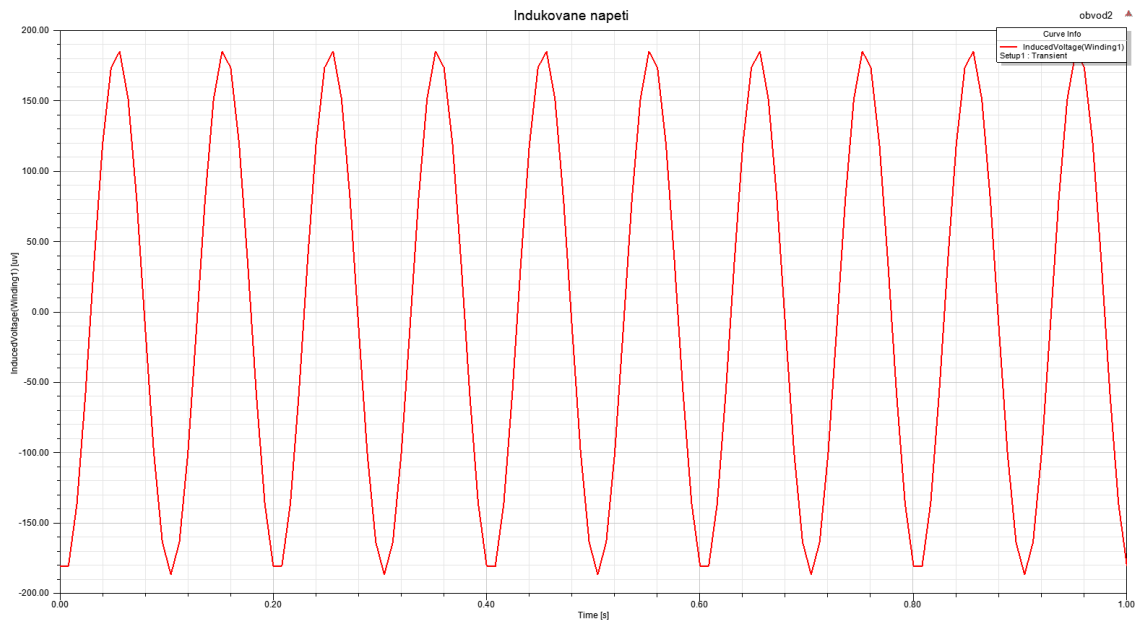


Obrázek 19: Velikost a směr šíření vektoru magnetické intenzity H modelu 2 při změně amplitudy vnější magnetické indukce $\text{dB} = 0,1 \mu\text{T}$.

Analýza pro měření průběhů indukovaného napětí u a proudu i byla zvolena stejně

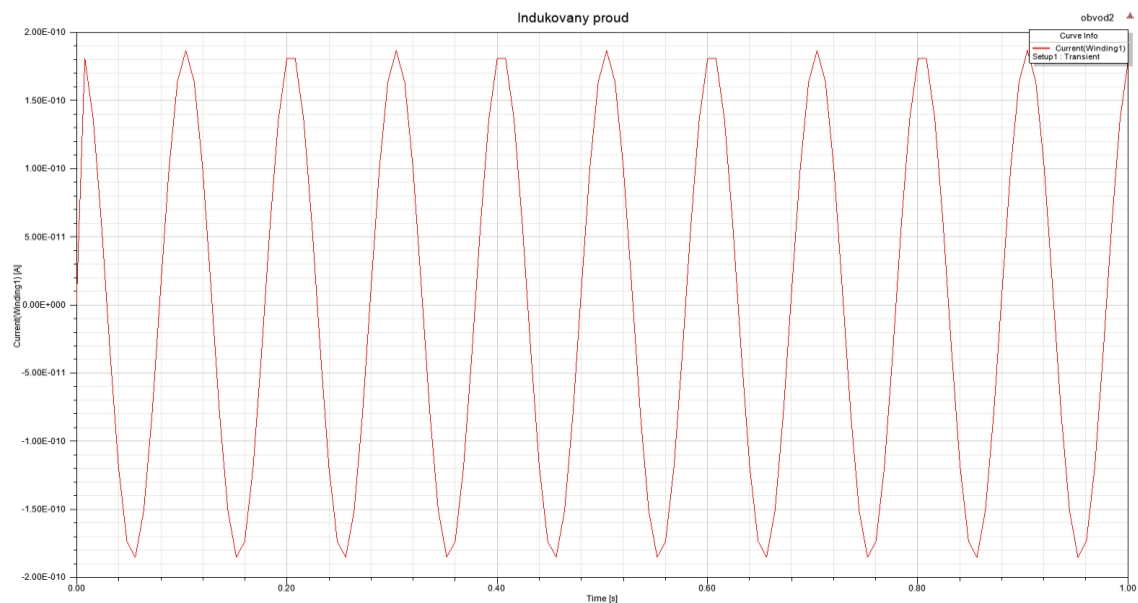
jako u předešlého modelu (doba 1s s krokem 0,02s).

Ze závislosti indukovaného napětí (Obrázek 20) lze odečíst hodnotu amplitudy $U_{\dot{s}s} = 370 \mu\text{V}$. Z toho je patrné, že vzhledem k modelu 1 je hodnota amplitudy o $30 \mu\text{V}$ vyšší.



Obrázek 20: Průběh indukovaného napětí u modelu 2 při změně amplitudy vnějšího magnetického pole $\delta B = 0,1 \mu\text{T}$.

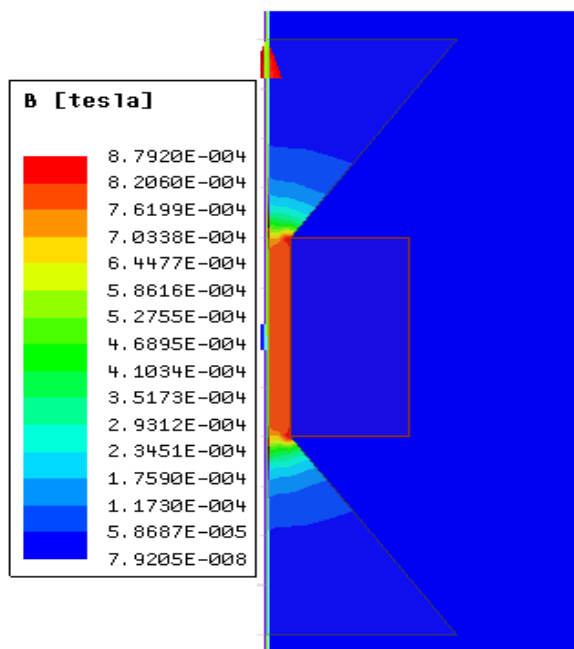
Průběh indukovaného proudu je zobrazen na Obrázku 21. Odečtená velikost amplitudy proudu je $I_{\dot{s}s} = 0,37 \text{ nA}$.



Obrázek 21: Průběh indukovaného proudu i modelu 2 při změně amplitudy vnějšího magnetického pole $\delta B = 0,1 \mu\text{T}$.

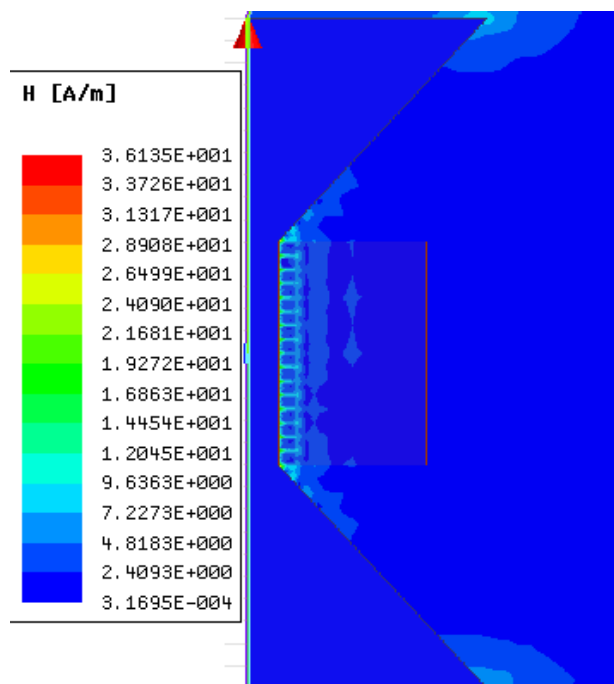
Totožné simulace byly provedeny i pro vybuzení $dB = 1 \mu\text{T}$.

Na Obrázku 22 je zobrazeno rozložení magnetické indukce. Stejně jak u vybuzení amplitudou magnetické indukce $dB = 0,1 \mu\text{T}$ se nejvyšší hodnota magnetické indukce ($B_a = 0,8 \text{ mT}$) nachází v nejužším místě.



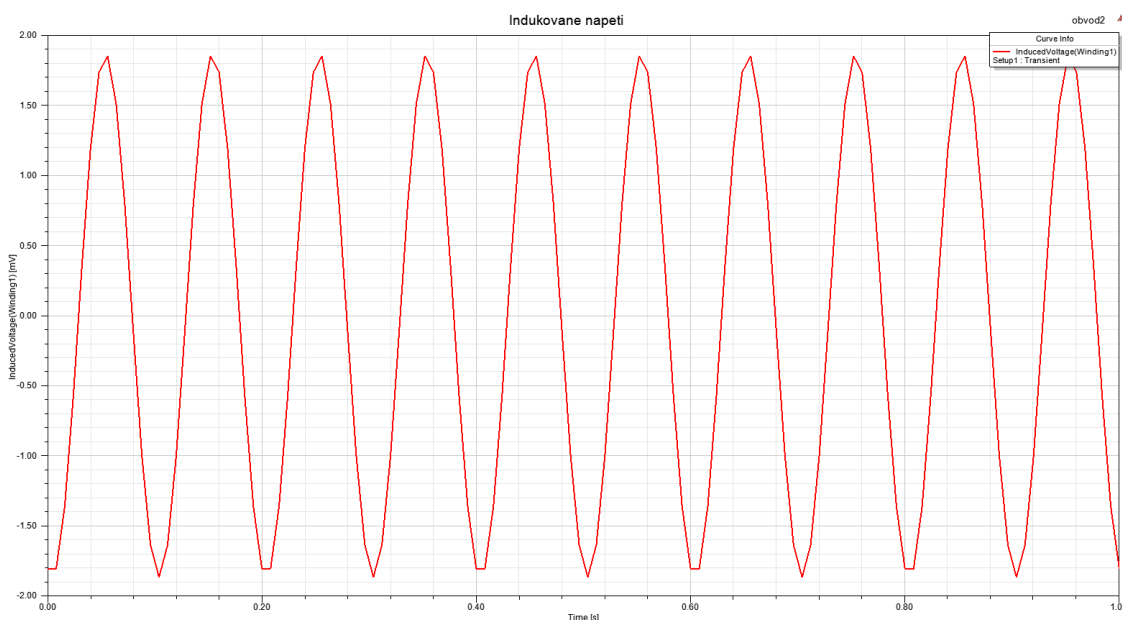
Obrázek 22: Rozložení a velikost magnetické indukce B modelu 2 v oblasti antény při změně amplitudy vnější magnetické indukce $dB = 1 \mu\text{T}$.

Magnetická intenzita (Obrázek 23) se stejně jak u předchozího modelu lineárně zvýšila.



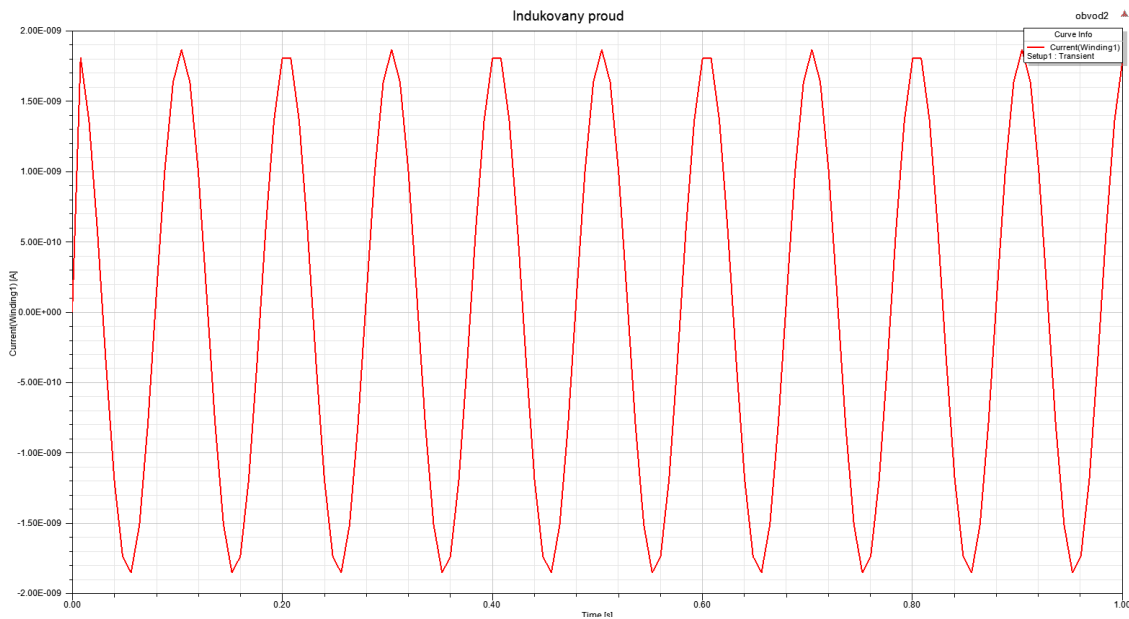
Obrázek 23: Velikost a směr šíření vektoru magnetické intenzity H modelu 2 při změně amplitudy vnější magnetické indukce $dB = 1\mu\text{T}$.

Z průběhu napětí (Obrázek 24) lze vyčíst, že amplituda indukovaného napětí $U_{\dot{s}s} = 3,7 \text{ mV}$. Z toho vyplývá, že hodnota amplitudy indukovaného napětí u u toho modelu 2 antény je o $0,3 \text{ mV}$ vyšší, než u předešlého modelu 1.



Obrázek 24: Průběh indukovaného napětí u modelu 2 při změně amplitudy vnějšího magnetického pole $dB = 1 \mu\text{T}$.

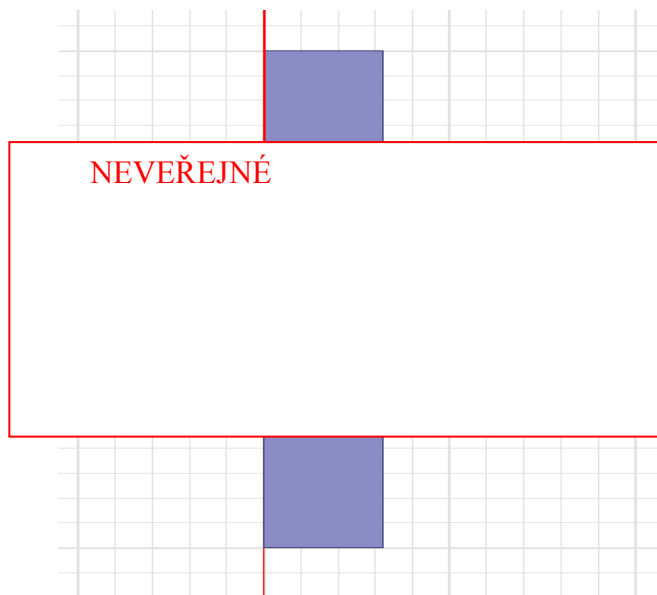
Stejně tak se zvýšila velikost amplitudy elektrického proudu (Obrázek 25) $I_{\dot{s}s} = 3,7 \text{ nA}$.



Obrázek 25: Průběh indukovaného proudu i modelu 2 při změně amplitudy vnějšího magnetického pole $dB = 1 \mu\text{T}$.

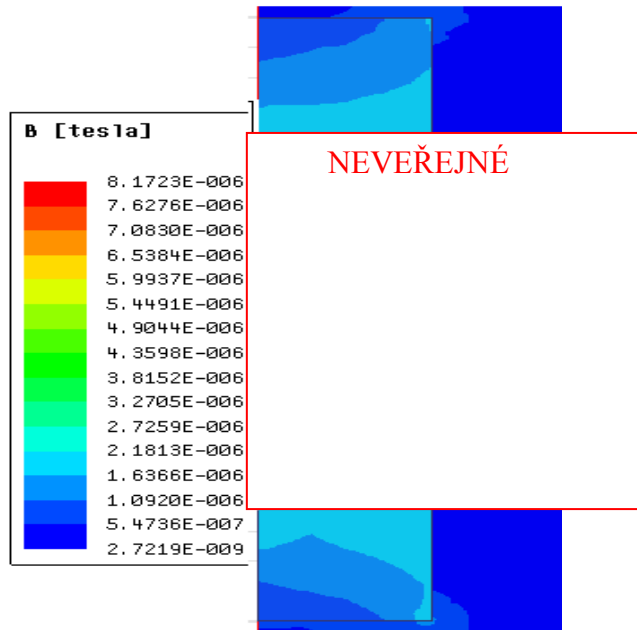
2.3 Model 3

Jako poslední model byl zvolen model 3 (Obrázek 26). Skládá se ze dvou částí z materiálu z čistého železa ($\mu_r = 12665$) a mezi nimi je umístěna cívka o $N_c=2500$ závitů.



Obrázek 26: 2-D model 3 ULF antény v prostředí Ansys Maxwell.

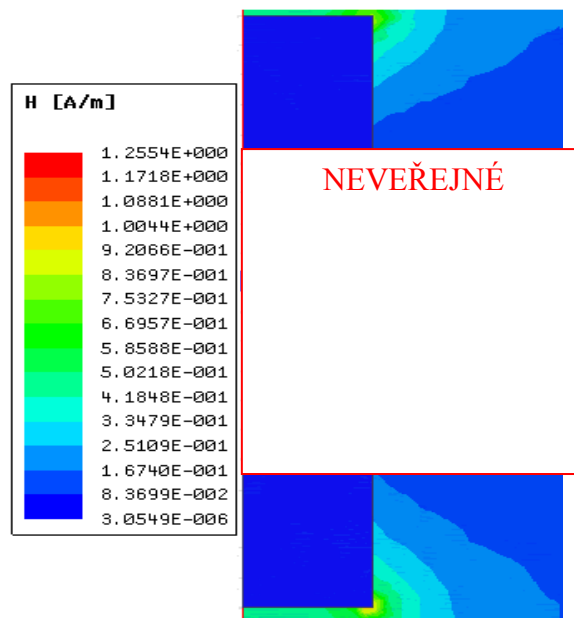
Rozložení magnetická indukce při vybuzení $dB = 0,1\mu\text{T}$ je zobrazena na Obrázku 27.



Obrázek 27: Rozložení a velikost magnetické indukce B modelu 3 v oblasti antény při změně amplitudy vnější magnetické indukce $dB = 0,1 \mu\text{T}$.

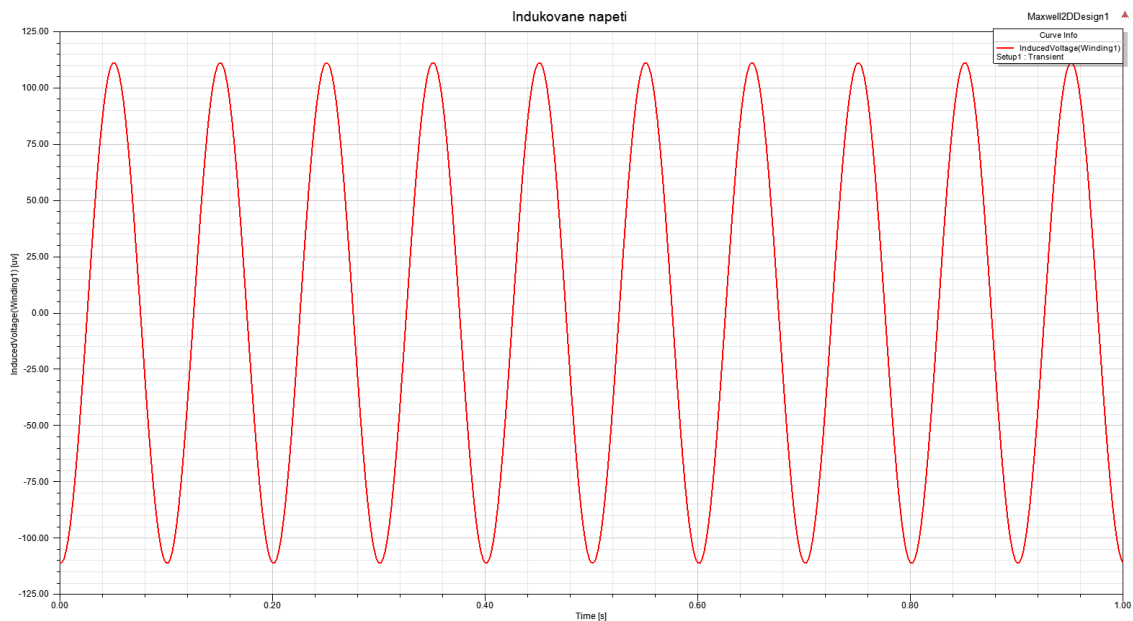
Nejvyšší hodnota magnetické indukce dosahuje $B = 5,99 \mu\text{T}$.

Rozložení Magnetické intenzity při vybuzení $dB = 0,1 \mu\text{T}$ je zobrazeno na Obrázku 28. Nejvyšší hodnoty magnetické intenzity se pohybují kolem $H = 0,67 \text{ A/m}$.



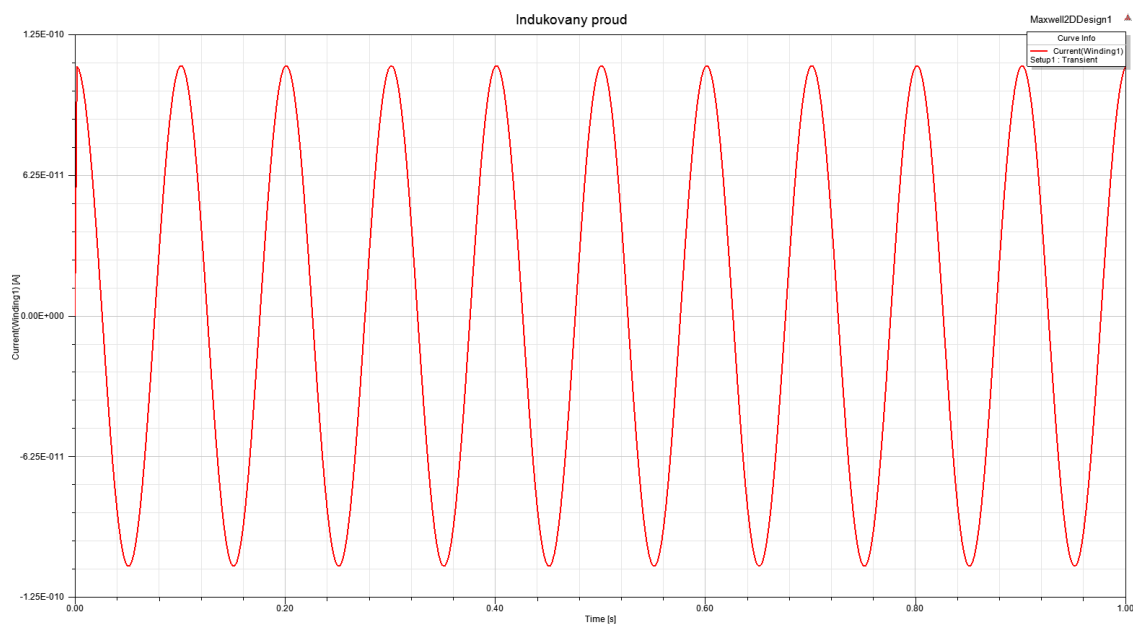
Obrázek 28: Velikost a směr šíření vektoru magnetické intenzity H modelu 3 při změně amplitudy vnější magnetické indukce $dB = 0,1 \mu\text{T}$.

Obrázek 33 znázorňuje průběh indukovaného napětí u . Velikost amplitudy napětí $U_{ss} = 224 \mu\text{V}$.



Obrázek 29: Průběh indukovaného napětí u modelu 3 při změně amplitudy vnějšího magnetického pole $dB = 0,1 \mu\text{T}$.

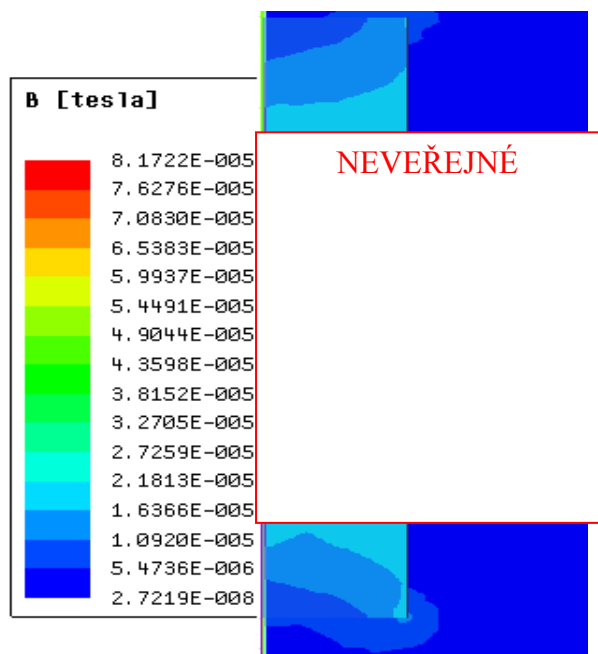
Průběh indukovaného proudu i je zobrazen na Obrázku 30. Velikost $I_{\text{ss}} = 0,2 \text{ nA}$.



Obrázek 30: Průběh indukovaného proudu i modelu 3 při změně amplitudy vnějšího magnetického pole $dB = 0,1 \mu\text{T}$.

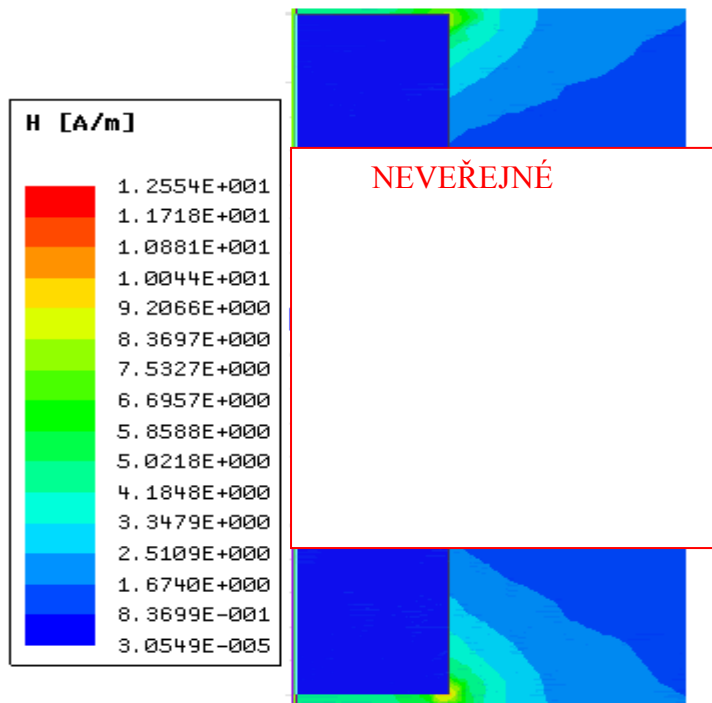
Stejně jako v předchozích případech byly provedeny simulace i pro vybuzení $1\mu\text{T}$.

Rozložení magnetické indukce je zobrazeno na Obrázku 31. Velikost magnetické indukce se vzhledem k vybuzení amplitudy magnetické indukce $dB=0,1\mu\text{T}$ lineárně zvýšila, obdobně jako u předchozích modelů.



Obrázek 31: Rozložení a velikost magnetické indukce B v oblasti antény při změně amplitudy vnější magnetické indukce $dB = 1 \mu\text{T}$.

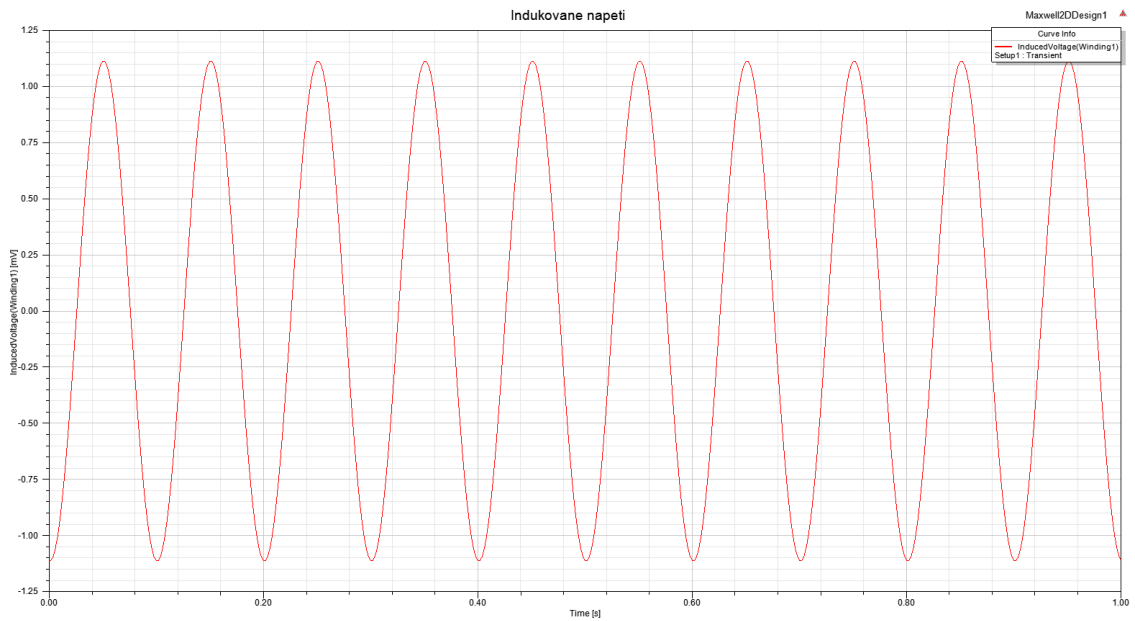
Na Obrázku 32 je znázorněné rozložení magnetické intenzity. Stejně jak u magnetické indukce, tak i magnetická intenzita s buzením $dB=1 \mu\text{T}$ lineárně vzrostla.



Obrázek 32: Velikost a směr šíření vektoru magnetické intenzity H modelu 3 při změně amplitudy vnější magnetické indukce $dB = 1 \mu\text{T}$.

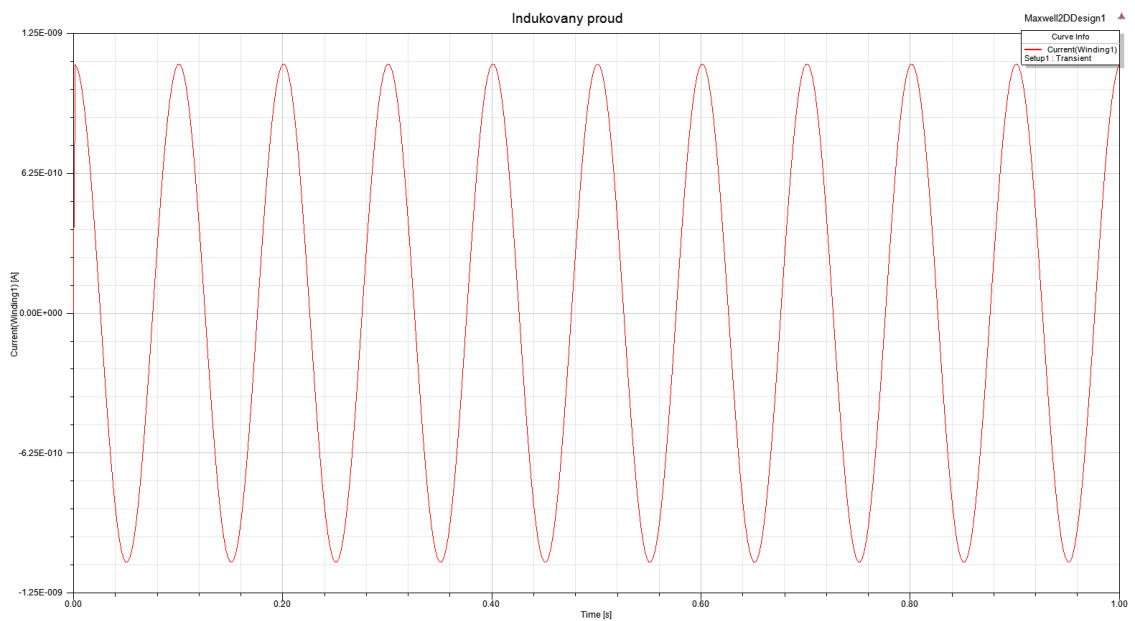
Velikost amplitudy indukovaného napětí $U_{ss} = 2,24 \text{ mV}$ byla odečtena z průběhu

(Obrázek 33).



Obrázek 33: Průběh indukovaného napětí u modelu 3 při změně amplitudy vnějšího magnetického pole $dB = 1 \mu\text{T}$.

Obrázek 34 znázorňuje průběh indukovaného proudu i při vybuzení amplitudou magnetické indukce $dB = 1 \mu\text{T}$, ze kterého byla odečtena hodnota $I_{SS} = 2 \text{ nA}$.



Obrázek 34: Průběh indukovaného proudu i modelu 3 při změně amplitudy vnějšího magnetického pole $dB = 1 \mu\text{T}$.

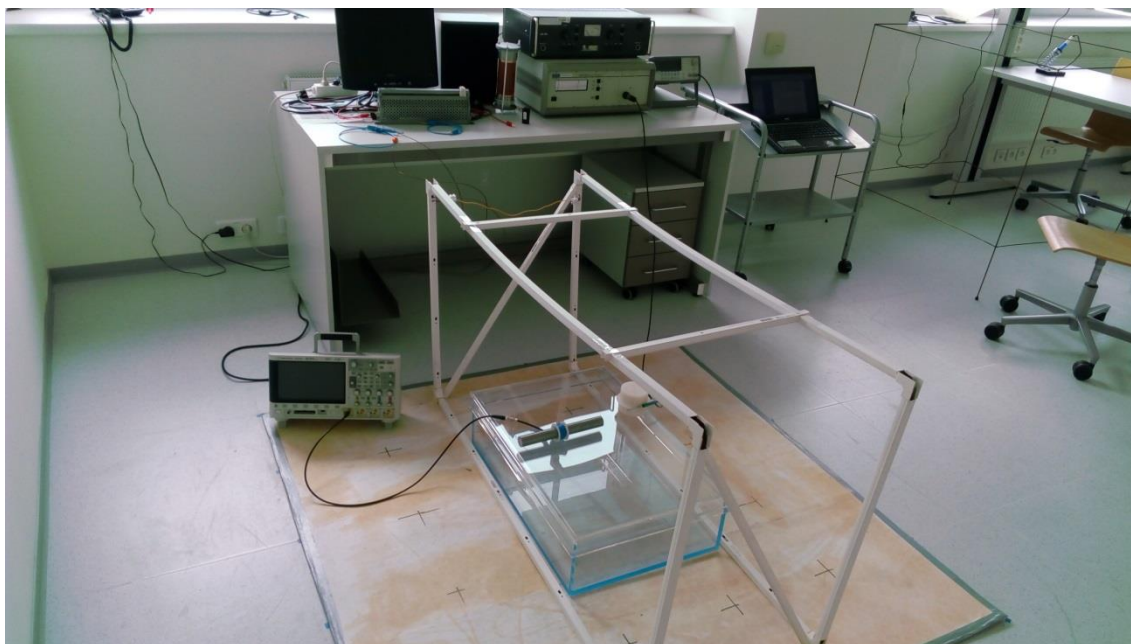
3 NÁVRH LABORATORNÍHO MĚŘENÍ, EXPERIMENTY

Tato kapitola se zabývá návrhem pracoviště pro snímání elektromagnetické vlny v pásmu ULF. Dále návrhem samotné ULF antény a provedení experimentálního měření s ní.

3.1 Laboratorní pracoviště pro test EMG vlny v pásmu ULF

Na Obrázku 35 je znázorněné navržené pracoviště pro snímání a buzení elektromagnetické vlny v pásmu ULF. Budící část je tvořena z cívky, která vytváří 80-90% homogenní pole. V tomto prostoru je umístěna příslušná anténa. Ve stejné výšce axiálně nastavena snímací sonda připojená k teslametru. Indukované napětí v cívce antény je sledováno a zaznamenáno na osciloskopu.

K měření byl použit osciloskop Agilent DSO-X 3014A, generátor Agilent 33250A, Tesla zesilovač AZK 052 a měřicí přístroj F.W.BELL 9950 teslameter. Konfigurace pracoviště a měřících přístrojů je na Obrázku 36.



Obrázek 35: Pracoviště pro buzení a snímání elektromagnetické vlny v pásmu ULF.

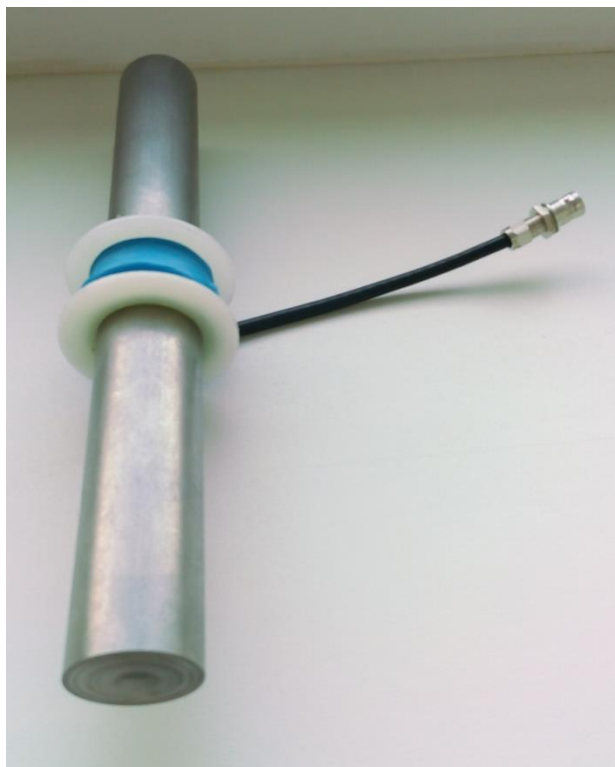


Obrázek 36: Měřicí přístroje.

3.2 Návrh ULF antén

K experimentálnímu měření byly navrženy dva typy antén. Model 1 (Obrázek 37) a model 3 (Obrázek 38).

Model 1 se skládá z jádra z čistého železa (Pure Fe). Na jádro byla nasunuta kostra, na kterou bylo navinuto $N_c=2500$ závitů.



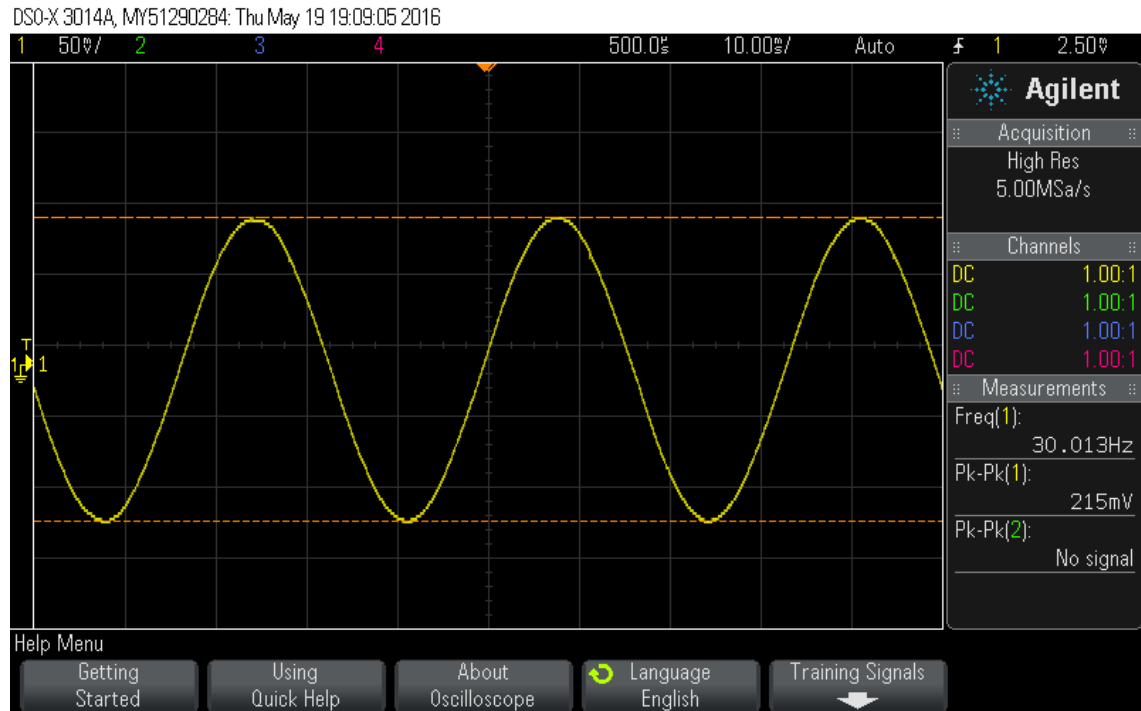
Obrázek 37: Model 1 ULF antény.



Obrázek 38: Model 3 ULF antény.

3.3 Laboratorní měření

Pomocí generátoru Agilent 33250A byly postupně nastavovány příslušné hodnoty frekvence pro jednotlivé velikosti magnetické indukce, které se nastavovaly zvyšováním amplitudy napětí V_{pp} na generátoru Agilent 33250A. Velikost amplitudy indukovaného napětí u byla odečítána z osciloskopu (Obrázek 39).



Obrázek 39: Průběh indukovaného napětí u při frekvenci $f = 30\text{Hz}$ odečtený z osciloskopu.

Měření bylo provedeno pro hodnoty amplitud magnetické indukce $B = 0,1 \mu\text{T}$, $1 \mu\text{T}$, $2 \mu\text{T}$, $5 \mu\text{T}$ a $12 \mu\text{T}$ (viz příloha). Pro nastavení amplitudy magnetické indukce $B = 12 \mu\text{T}$ (nejvyšší dosažená hodnota), bylo nutné nastavit zesilovací stupeň buzení cívky vnějšího magnetického pole. Pro hodnoty amplitudy magnetické indukce $B = 0,1 \mu\text{T}$ a $B = 1 \mu\text{T}$ byly měření na nízkých frekvencích ovlivněny okolním magnetickým polem, šumem a signál na osciloskopu byl zkreslen.

V tabulce 1 jsou uvedeny odečtené hodnoty amplitudy indukovaného napětí u pro jednotlivé frekvence modelu 1 pro amplitudu budící EMG pole $B = 5 \mu\text{T}$.

Tabulka 1: Tabulka odečtených hodnot modelu 1 pro amplitudu budící EMG pole $B = 5\mu\text{T}$.

f [Hz]	Měření 1 [mV]	Měření 2 [mV]	Měření 3 [mV]	Měření 4 [mV]	Měření 5 [mV]	Měření 6 [mV]	Měření 7 [mV]	Měření 8 [mV]	Měření 9 [mV]	Měření 10 [mV]	Měření 11 [mV]
1	2,5	2,7	3	2,9	2,6	2,8	2,7	2,7	2,7	2,5	2,7
5	33,1	33,1	33,2	32,9	33	33,2	33,1	32,8	33,2	33	33,4
7	51,9	52	52	52,1	51,7	51,4	52	52,1	51,9	51,9	51,9
10	78	78	80	79	79	78	79	78	79	79	78
15	119	119	119	119	119	119	119	120	119	119	119
30	215	216	215	216	214	215	215	215	214	215	214

Pro každou hodnotu frekvence z tabulky (Tabulka 1) byly vypočítány nejistoty typu A pomocí vztahu:

$$u_a = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (22)$$

kde u_a je standartní nejistota typu A,
 n je počet naměřených hodnot,
 x jsou naměřené hodnoty,
 \bar{x} je aritmetický průměr naměřených hodnot.

Při použití toho vztahu je nutné provést více měření za stejných podmínek. Tato podmínka byla splněna (11 měření). Aritmetický průměr \bar{x} se vypočítá ze vztahu:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n X_i \quad (23)$$

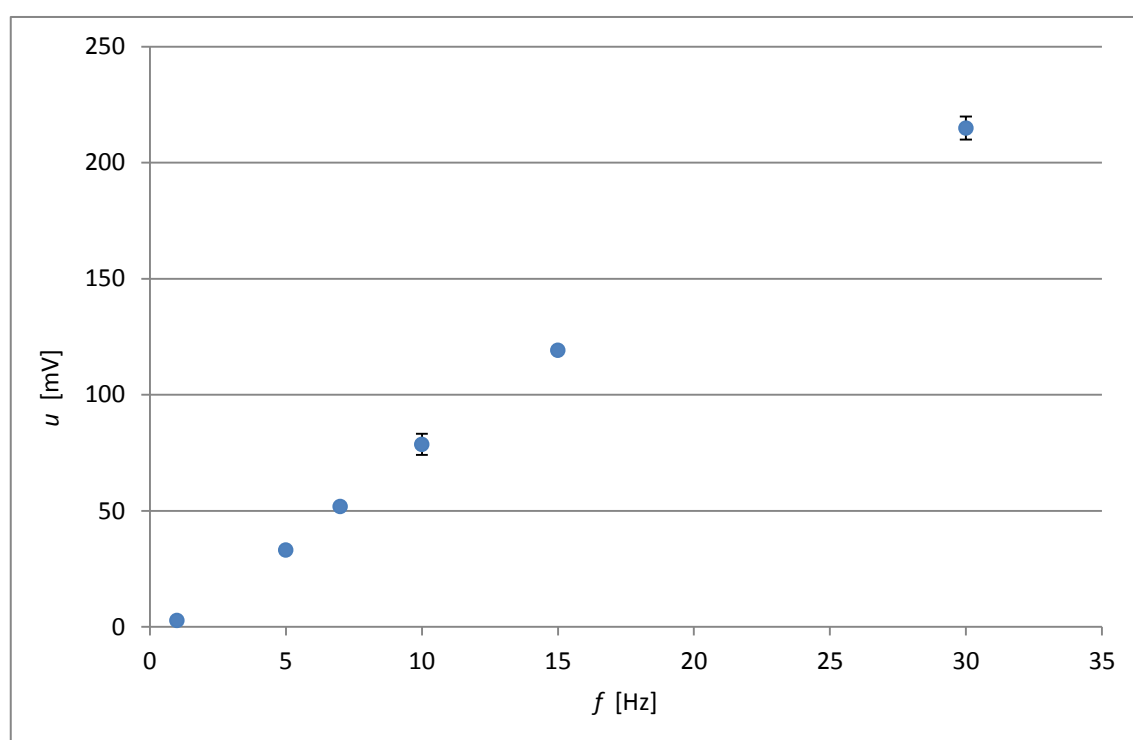
kde n je počet naměřených hodnot,
 X_i jsou jednotlivé naměřené hodnoty.

V tabulce 2 jsou uvedeny hodnoty aritmetických průměrů naměřených hodnot a z nich vypočítané nejistoty typu A z rovnice (22).

Tabulka 2: Vypočítané hodnoty nejistoty typu A pro model 1.

f [Hz]	$\Sigma\bar{x}$	Σx_i	Nejistota typu A
1,0	2,71	0,29	0,05
5,0	33,1	0,27	0,05
7,0	51,9	0,4	0,06
10,0	78,64	4,55	0,2
15,0	119,1	0,91	0,09
30,0	214,9	4,91	0,21

Na Obrázku 40 je zobrazen graf amplitudy indukovaného napětí u v závislosti na frekvenci f se zobrazenými nejistotami modelu 1.



Obrázek 40: Graf amplitudy indukovaného napětí u v závislosti na frekvenci f modelu 1.

Stejně měření byly provedeny i pro model 3 ULF antény. V tabulce 3 jsou uvedeny odečtené hodnoty indukovaného napětí u pro amplitudu budící EMG pole $B = 5 \mu\text{T}$. Také zde bylo provedeno jedenáct měření ke každé frekvenci.

Tabulka 3: Tabulka odečtených hodnot modelu 3 pro amplitudu budící EMG pole $B = 5\mu\text{T}$.

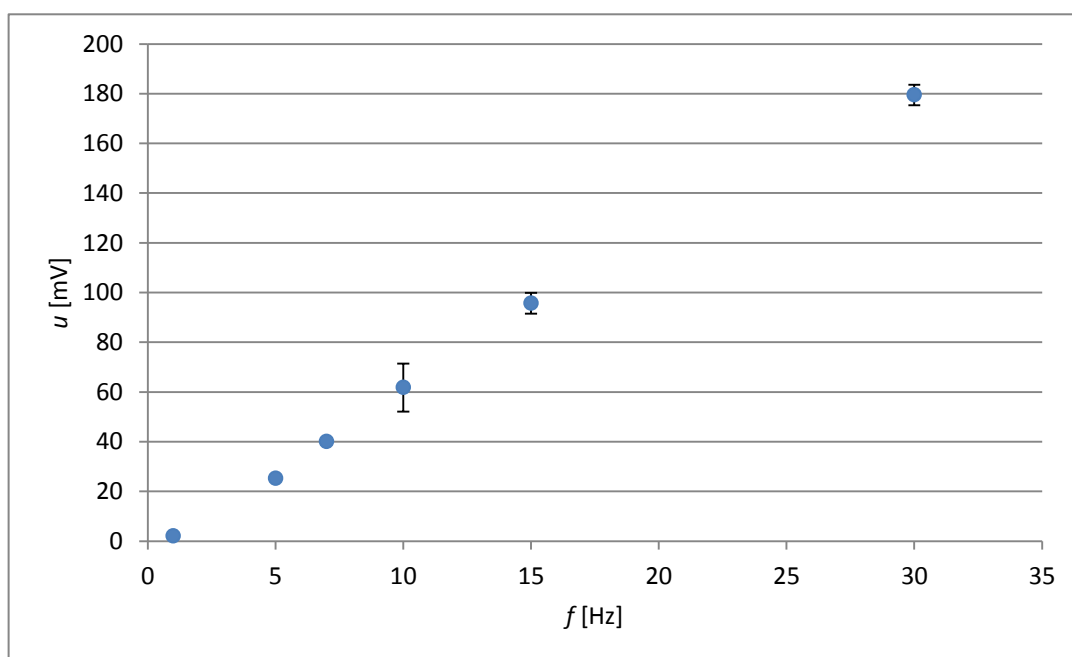
f [Hz]	Měření 1 [mV]	Měření 2 [mV]	Měření 3 [mV]	Měření 4 [mV]	Měření 5 [mV]	Měření 6 [mV]	Měření 7 [mV]	Měření 8 [mV]	Měření 9 [mV]	Měření 10 [mV]	Měření 11 [mV]
1	1,9	2	1,8	2,3	2,3	2,1	2,2	2,1	2,3	2,2	2,1
5	25	25,3	25,2	25,3	25,2	25,3	25,2	25,2	25,5	25,6	25,4
7	40,1	40,2	40,3	40,1	40,1	40,2	40	40,1	40	40,3	40,1
10	61	61	61	61	62	61	63	63	63	63	61
15	98	95	95	95	96	96	96	96	97	96	96
30	181	179	179	180	179	179	179	180	180	179	179

V tabulce 4 jsou uvedeny hodnoty aritmetických průměrů naměřených hodnot a z nich vypočítané nejistoty typu A z rovnice (22).

Tabulka 4: Vypočítané hodnoty nejistoty typu A pro model 3.

f [Hz]	$\Sigma\bar{x}$	Σx_i	Nejistota typu A
1,0	2,12	0,28	0,05
5,0	25,29	0,27	0,05
7,0	40,14	0,11	0,03
10,0	61,82	9,64	0,29
15,0	95,73	4,18	0,19
30,0	179,5	4,12	0,19

Na Obrázku 41 je zobrazen graf amplitudy indukovaného napětí u v závislosti na frekvenci f se zobrazenými nejistotami modelu 3.



Obrázek 41: Graf amplitudy indukovaného napětí u v závislosti na frekvenci f modelu 3.

4 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo navrhnout a sestavit snímací zařízení (anténu) s rozlišením modulu amplitudy magnetické indukce v řádu 1 nT.

V první části práce je popsáno základní šíření elektromagnetické vlny. Na jednoduchém příkladu byl ukázán a modelován geometrický návrh antény a její analýza pro snímání šíření magnetické složky EMG vlny ve frekvenčním pásmu $f = 0,1-30\text{Hz}$.

Byly navrženy a vybrány tři geometrie antén a modelovány, analyzovány nakonec porovnány jejich stěžejní parametry. Pomocí programu Ansys Maxwell byly provedeny návrhy a analýzy numerických modelů, návrh simulace výstupního elektrického napětí u pro uspořádání a tvar prvků každého snímače. Bylo pozorováno rozložení a velikost amplitudy magnetické indukce B , rozložení a velikost amplitudy magnetické intenzity H , velikost amplitudy indukovaného napětí u a velikost amplitudy indukovaného proudu i při zátěži $R_z = 1\text{G}\Omega$. Z provedených simulací bylo při srovnání zjištěno, že u modelů antén zaměřených ke zvýšení hustoty magnetického toku v aktivní části se zvyšováním amplitudy vnějšího magnetického pole dB lineárně zvyšovala hodnota amplitudy indukovaného napětí u . Nejvyšší hodnota magnetické indukce $B_a = 0,8\text{mT}$ a nejvyšší hodnota amplitudy indukovaného napětí $U_{ss} = 3,7\text{mV}$ byla dosažena u modelu 2 při změně amplitudy vnějšího magnetického pole $dB = 1\text{ }\mu\text{T}$.

Dále byla provedena realizace dvou typů antén a byla provedena experimentální měření s těmito vzorky. Na sestaveném pracovišti pro buzení a snímání elektromagnetické vlny v pásmu ULF bylo provedeno základní laboratorní měření. Při měření na nízkých frekvencích pro hodnoty amplitudy $B = 0,1\text{ }\mu\text{T}$ a $B = 1\text{ }\mu\text{T}$ byl signál na osciloskopu zkreslen okolním magnetickým polem a proto odečtené hodnoty amplitudy napětí u v tomto nejnižším rozsahu zcela neodpovídají hodnotám, které byly získány v numerických modelech a v simulacích v programu Ansys Maxwell.

Pokud bych měl ověřit tyto nejnižší hodnoty, bylo by nutné využít jiné prostředí laboratoře, s nižšími hodnotami přirozeného okolního magnetického pole v pásmu $f = 0,1-30\text{Hz}$, a také použít další nezávislé srovnání, získané například ze zařízení pro měření koercitivity vzorku materiálu.

LITERATURA

- [1] Stratton, J.A.: Teorie elektromagnetického pole. SNTL Praha, 1975
- [2] ŠAVEL, Josef. Elektrotechnologie: materiály, technologie a výroba v elektronice a elektrotechnice. 3., rozš. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-154.
- [3] OCHODEK, V. Residual stress evaluation in spirally welded pipes for gas pipeline. In. 6th International Conference on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing, ICBM 6, 9-10 July 2007, Valenciennes, University of Valenciennes, France, ISBN 951- 98400-7-9.
- [4] DĚDEK, Libor a Jarmila DĚDKOVÁ. Elektromagnetismus. Vyd. 2. Brno: VUTIUM, 2000. ISBN 80-214-1548-7.
- [5] MYSLÍK, Jiří. Elektromagnetické pole: základy teorie. Praha: BEN - technická literatura, 1998. ISBN 80-86056-43-0.
- [6] NOVÁK, Ivo. Účinky elektromagnetického pole na lidský organismus. TZB-info. 2015.
- [7] Ionosféra [online]. [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://ok1like.c-a-v.com/soubory/ion.htm>
- [8] Schumann resonators [online]. [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: <http://www.schumannresonator.com/>
- [9] REDONDO, Sergio Toledo. Schumann resonances in the Earth-ionosphere cavity. 2013.
- [10] SIMÕES, Fernando, Robert PFAFF, Jean-Jacques BERTHELIER a Jeffrey KLENZING. A Review of Low Frequency Electromagnetic Wave Phenomena Related to Tropospheric-Ionospheric Coupling Mechanisms. Space Science Reviews [online]. 2012, 168(1-4), 551-593 [cit. 2016-05-19]. DOI: 10.1007/s11214-011-9854-0. ISSN 0038-6308. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11214-011-9854-0>
- [11] BARCHANSKI, A., CLEMENS, M., DE GERSEM, H. Efficient calculation of current densities in the human body induced by arbitrarily shaped, low-frequency magnetic field sources. Journal of Computational Physics. 2006, roč. 214, č. 1, 81–95. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021999105004249>
- [12] HANNA, S.A., MOTAI, Y., VARHUE, W., TITCOMB, S. Measurement evaluations of static and low frequency magnetic fields in the near field region. Measurement. 2011, roč. 44, č. 8, 1412–1421. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224111001527>
- [13] WATERS, C. L., M. D. SCIFFER a R. L. LYSAK. FDTD modeling of ULF waves in the magnetosphere and ionosphere. In: 2010 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications [online]. IEEE, 2010, s. 477-480 [cit. 2016-05-19]. DOI: 10.1109/ICEAA.2010.5653758. ISBN 978-1-4244-7366-3. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5653758>
- [14] SIMÕES, Fernando, Robert PFAFF a Henry FREUDENREICH. Satellite observations of Schumann resonances in the Earth's ionosphere. Geophysical Research Letters. 2011, 38(22), n/a-n/a. DOI: 10.1029/2011GL049668. ISSN 00948276. Dostupné také z: <http://doi.wiley.com/10.1029/2011GL049668>
- [15] HANZELKA, M.; FIALA, P. Measurement and Evaluation of the Effects of Low-Level Magnetic Fields on the Socio- Economic Behavior of the Humans. In Proceedings of The 25th International Business Information Management Association Conference. Amsterdam, Netherlands: 2015. s. 1666-1680. ISBN: 978-0-9860419-4- 5.
- [16] <https://en.wikipedia.org/wiki/Ionosphere>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

E	Vektor intenzity elektrického pole.
H	Vektor intenzity magnetického pole.
D	Vektor elektrické indukce.
B	Vektor magnetické indukce.
J	Vektor plošné hustoty elektrického proudu (proudová hustota).
ρ	Objemová hustota elektrického náboje.
γ	Měrná vodivost.
f	Frekvence.
λ	Vlnová délka.
c	Rychlost světla.
ϵ_0	Permitivita vakua ($8,854187818 * 10^{-12} \text{Fm}^{-1}$).
μ_0	Permeabilita vakua ($4\pi * 10^{-7} \text{Hm}^{-1}$).
v	Rychlost šíření elektromagnetické vlny.
n	Absolutní index lomu dielektrika.
μ_r	Relativní permeabilita.
ϵ_r	Relativní permitivita.
\mathbf{II}	Poyntingův vektor.
ω_{pe}	Plazmová frekvence.
n_e	Koncentrace elektronů.
m	Hmotnost elektronu.
ω_n	Schumannova frekvence.
R	Poloměr Země.
v_a	Alfvénova rychlost.

EMG	Elektromagnetické pole.
GPS	Global positioning system, globální polohovací systém.
ULF	Ultra low frequency, ultra nízká frekvence.
SLF	Super low frequency, super nízká frekvence.
ELF	Extreme low frequency, extrémně nízká frekvence.

SR	Schumannova rezonance.
EEG	Electroencephalography, elektroencefalogram.
EKG	Electrocardiography, elektrokardiogram.
BNC	Bayonet Neill Concelman connector, vysokofrekvenční konektor.