

Snímací zařízení intenzity elektrického a magnetického pole od silových rozvodů 50Hz

50Hz Power Distribution Cables Electric and Magnetic Field Sensing Device

Bc. Viktor Lokaj

Diplomová práce
2012



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Viktor LOKAJ**
Osobní číslo: **A10323**
Studijní program: **N 3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**

Téma práce: **Snímací zařízení intenzity elektrického
a magnetického pole od silových rozvodů 50Hz**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte stručnou teorii elektromagnetického pole.
2. Zpracujte literární rešerši k metodám měření intenzity elektrického a magnetického pole.
3. Popište dopady na problém elektrosmogu a problém EMC.
4. Provedte měření na funkčním vzorku.
5. Vyhodnoťte výsledky a zpracujte vlastní závěry k výsledkům.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. **ĎAĎO, S.KREIDL, M.:** Senzory a měřicí obvody. Praha: ČVUT, 1996.
2. **FRADEN, J.** Handbook of Modern Sensors. Physics, designs, and Applications. New York: Springer Verlag, 1996, s.556. ISBN 1-56396-538-0
3. **HRUŠKA, F.** Senzory pro systémy informatiky a automatizace. Učební texty. 1.vyd. Zlín: UTB ve Zlíně, prosinec 2007, s.177. ISBN 978-80-7318-630-2
4. **CHUDÝ, V. a kol.** Meranie technických veličin. Bratislava: STU, 1999. ISBN 80-227-1275-2
5. **Rothwell, Edward J.** Electromagnetics. Boca Raton : CRC Press, c2009, ISBN 978-1-4200-6447-6
6. **Bansal, Rajeev,** Fundamentals of engineering electromagnetics . Boca Raton : CRC/Taylor & Francis, 2006. ISBN 0-8493-7360-3

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. František Hruška, Ph.D.**
Ústav elektroniky a měření

Datum zadání diplomové práce: **24. února 2012**

Termín odevzdání diplomové práce: **15. května 2012**

Ve Zlíně dne 24. února 2012


prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan




doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Cílem této práce je seznámit její čtenáře se základními pojmy z oblasti teorie elektromagnetického pole, objasnit principy metod měření intenzity elektrického a magnetického pole. Popsat dopady na problém elektrosmogu a problém EMC. Sestavit a provést sérii měření na modelovém zařízení měření magnetického pole.

Klíčová slova: EMC, elektromagnetické pole, elektrické pole, magnetické pole, elektrosmog, Helmholtzovy cívky, Gaussmetr

ABSTRACT

The aim of this work is to acquaint its readers with the basic notions from the fields of the theory of Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields and also to explain the principles of methods and devices used to measure Electric and Magnetic Fields, then to describe the effects of Electromagnetic Smog and the problem of Electromagnetic Compatibility. In the practical part the aim is to build a working model for measuring Magnetic Fields and to do a series of measurements on it and to evaluate the results.

Keywords: EMC, Electromagnetic Field, Electric Field, Magnetic field, Electromagnetic Smog, Helmholtz coil, Gaussmeter

Poděkování:

Zde bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Františku Hruškovi, Ph.D. za cenné rady, ochotu a odbornou pomoc při psaní této práce a také svým rodičům za podporu při studiu a také své dívce Lilli za trpělivost při mém psaní této práce a také za její podporu..

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomové práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval.
V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.

Ve Zlíně

.....
podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 ZÁKLADY TEORIE ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE	12
1.1 ELEKTRICKÉ POLE	12
1.1.1 Elektricky nabité částice (atomy, subatomární částice a ionty).....	12
1.1.2 Vodiče, izolanty a dielektrika.....	14
1.1.3 Permitivita	15
1.1.4 Elektrický náboj	15
1.1.5 Coulombův zákon	16
1.1.6 Elektrický potenciál.....	16
1.1.7 Intenzita elektrického pole	17
1.2 MAGNETICKÉ POLE.....	18
1.2.1 Magnetické pole permanentního magnetu	19
1.2.2 Magnetické pole přímého vodiče s proudem a cívky s proudem	19
1.2.3 Magnetická indukce	20
1.3 ELEKTROMAGNETICKÉ POLE.....	23
1.4 MAXWELLOVY ROVNICE	25
1.4.1 Maxwellovy rovnice a veličiny v nich použité.....	25
1.4.2 Maxwellovy rovnice elektrostatického pole.....	25
1.4.3 Maxwellovy rovnice stacionárního magnetického pole.....	26
1.4.4 Maxwellovy rovnice kvazistacionárního elektromagnetického pole	26
1.5 POHYB ELEKTRICKY NABITÝCH ČÁSTIC V ELEKTROMAGNETICKÉM POLI.....	28
1.6 ELEKTROMAGNETICKÉ VLNĚNÍ.....	28
1.6.1 Vlastnosti elektromagnetického vlnění	30
1.6.2 Spektrum elektromagnetického vlnění.....	30
2 SENZORY ELEKTRICKÉHO POLE	32
2.1 SENZOR NÁBOJE SE ZVYŠOVÁNÍM VODIVOSTI PROSTŘEDÍ.....	33
2.2 SENZORY ELEKTRICKÉHO POLE S OPTICKÝMI VLÁKNY.....	34
3 SENZORY INTENZITY MAGNETICKÉHO POLE	35
3.1 HALLOVY SONDY	36
3.2 SENZORY MAGNETICKÉHO POLE S FEROMAGNETICKÝM PRINCIPEM (FLUXGATE).....	37
3.3 MAGNETOREZISTIVNÍ SENZORY (MAGNETOREZISTORY)	38
3.4 SENZORY S VĚTŠÍ CITLIVOSTÍ (NMR A SQUID).....	40
4 NEJČASTĚJŠÍ ZDROJE STATICKÝCH A NÍZKOFREKVENČNÍCH ELEKTROMAGNETICKÝCH POLÍ	41
4.1 STATICKÉ POLE.....	41
4.1.1 Přírodní statické elektrické pole.....	41
4.1.2 Přírodní statické magnetické pole	41

4.1.3	Antropogenní statické elektrické pole.....	42
4.1.4	Antropogenní statické magnetické pole	43
4.2	NÍZKOFREKVENČNÍ ELEKTROMAGNETICKÉ POLE	43
4.2.1	Přírodní nízkofrekvenční elektromagnetická pole	44
4.2.2	Antropogenní nízkofrekvenční elektromagnetická pole	44
4.2.3	Elektrická složka antropogenních ELF/EMF	44
4.2.4	Magnetická složka antropogenních ELF/EMF.....	46
5	ÚVOD DO PROBLEMATIKY ELEKTROMAGNETICKÉ KOMPATIBILITY	48
5.1	ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA BIOLOGICKÝCH SYSTÉMŮ.....	48
5.2	ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA TECHNICKÝCH SYSTÉMŮ	48
5.3	ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ PROBLEMATIKY EMC	49
5.3.1	Elektromagnetická interference (EMI).....	50
5.3.2	Elektromagnetická susceptibilita (EMS).....	50
5.4	FREKVENČNÍ ROZSAH ZDROJŮ RUŠIVÝCH SIGNÁLŮ.....	50
5.4.1	Nízkofrekvenční rušení - energetické.....	51
5.4.2	Nízkofrekvenční rušení – akustické	51
5.5	PRŮMYSLOVÉ ZDROJE RUŠENÍ	51
5.5.1	Přechodové jevy vzniklé spínáním a rozpínáním.....	52
5.5.2	Venkovní energetická vedení	54
6	BIOLOGICKÉ DOPADY A ÚČINKY NEIONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ.....	55
6.1	BIOLOGICKÉ VLIVY ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE NA TKÁŇ	56
6.1.1	Fyzikální účinky elektrických polí	56
6.1.2	Fyzikální účinky magnetických polí.....	56
6.1.3	Dozimetrické veličiny popisující elektromagnetické pole a záření.....	57
6.2	EPIDEMIOLOGICKÉ STUDIE A BEZPEČNOSTNÍ FAKTORY	58
6.2.1	Měrný absorbovaný výkon	58
6.2.2	Bezpečnostní faktory	59
6.2.3	Proudová hustota	59
6.3	DRUHY ŠÍŘENÍ NEIONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ.....	59
6.3.1	Induktivní vazba.....	59
6.3.2	Galvanická vazba	60
6.3.3	Kapacitní vazba	60
6.3.4	Vazba vyzářováním.....	61
6.4	VLÁDNÍ NAŘÍZENÍ Č. 1/2008 SB.....	61
6.4.1	Referenční hodnoty a nejvyšší přípustné hodnoty.....	62
6.5	NORMY V ČR ZABÝVAJÍCÍ SE ELF/EMF V PROSTŘEDÍ ČLOVĚKA	63
II	PRAKTICKÁ ČÁST	64
7	ZAŘÍZENÍ PRO MODELOVÉ MĚŘENÍ MAGNETICKÉHO POLE	65

7.1	DOSAVADNÍ STAV TECHNIKY	65
7.2	PODSTATA TECHNICKÉHO ŘEŠENÍ	65
7.3	POPIS KONSTRUKCE MĚŘÍČÍHO MODELU S VYUŽITÍM HELMHOLTZOVÝCH CÍVEK	66
7.4	SKUTEČNÉ TECHNICKÉ PROVEDENÍ	68
7.4.1	Model verze d	68
7.4.2	Model verze r	70
8	MĚŘENÍ NA MODELOVÉM ZAŘÍZENÍ HELMHOLTZOVÝCH CÍVEK	72
8.1	POUŽITÉ MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJE	72
8.1.1	Zdroje stejnosměrného napětí	72
8.1.2	Zdroje střídavého napětí 50Hz	73
8.1.3	Voltmetr/Ampérmetr	74
8.1.4	Osciloskop	74
8.1.5	Gaussmetr	75
8.2	STEJNOSMĚRNÁ MĚŘENÍ	76
8.3	STRÍDAVÁ MĚŘENÍ 50HZ	79
9	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	81
9.1	STEJNOSMĚRNÁ MĚŘENÍ	81
9.1.1	Hallův senzor	81
9.1.2	Měřicí cívka L3	81
9.1.3	Statické magnetické pole	82
9.2	STRÍDAVÁ MĚŘENÍ 50HZ	85
9.2.1	Hallův senzor	85
9.2.2	Měřicí cívka L3	86
9.2.3	Střídavé magnetické pole	86
10	MĚŘENÍ MAGNETICKÉHO POLE V OKOLÍ ROVNÉHO VODIČE PROTÉKANÉHO STRÍDAVÝM PROUDEM 50 HZ	89
10.1	POPIS MĚŘENÍ MAGNETICKÉHO POLE V OKOLÍ SILOVÉHO VODIČE 50 HZ PROTÉKANÉHO RŮZNÝMI PROUDY	89
10.1.1	Postup	89
10.2	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	90
10.2.1	Grafy	Chyba! Záložka není definována.
	ZÁVĚR	92
	ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ	93
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	94
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	96
	SEZNAM OBRÁZKŮ	97
	SEZNAM TABULEK	100
	SEZNAM PŘÍLOH	101

ÚVOD

V minulém století prodělal elektroenergetický průmysl nebývalý rozvoj, a to jak ve fázi výroby kvant elektrické energie a její distribuce k obrovským průmyslovým spotřebitelům tak k maloodběratelům, kteří však v dnešní době elektrickou energii používají ve stále více zařízeních. Tato zařízení a také samotná vedení elektřiny mohou být zdroji elektromagnetických polí. Vliv elektrických a magnetických polí o různých intenzitách a frekvencích byl předmětem mnoha studií. Úkolem této práce tedy je nastínit tuto problematiku od samotných principů teorie elektromagnetického pole po metody měření intenzit elektrického a magnetického pole. Uvést zde také základní dopady na problém elektrosmogu a elektromagnetické kompatibility.

V praktické části se pak budu zabývat sestavením zařízení pro modelové měření magnetického pole a vyhodnocením jeho možností.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ZÁKLADY TEORIE ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE

Elektromagnetické pole je fyzikální pole, které odpovídá míře působení elektrické a magnetické síly v prostoru. Skládá se tedy ze dvou fyzikálně propojených polí, **elektrického a magnetického**.

Pozn.: Ačkoli elektromagnetické pole je svým dosahem nekonečné, obvykle se uvažuje jen ta část, která má význam pro pohyby těles v okolí nabitého tělesa, které pole vytváří.

1.1 Elektrické pole

Vlastností některých částic je kladný nebo záporný elektrický náboj, který se projeví silovým působením na elektrické náboje v jeho okolí. Velikost tohoto silového působení je dána Coulombovým zákonem. Souhrnné silové působení určitého souboru elektricky nabitých částic se nazývá elektrické pole. Jiným zdrojem elektrického pole může také být časově proměnné magnetické pole.

Pozn.: Elektrické pole může existovat pouze v dielektriku. Ve vodivém prostředí by došlo k pohybu nabitých částic. Pokud by vodič nebyl připojen k trvalému zdroji napětí, pohyb nábojů by ustal jakmile by dosáhly takové polohy ve vodiči, v níž by na ně nepůsobily žádné elektrostatické síly tj. došlo by k vyrovnání nábojů.

1.1.1 Elektricky nabitá částice (atomy, subatomární částice a ionty)

Elektricky nabitá částice je částice, která má nenulový náboj. Rozlišuje se volná elektricky nabitá částice, která se může volně pohybovat na vzdálenosti větší, než jsou rozměry atomů, a vázaná elektricky nabitá částice, jejíž pohyb je vázán na vzdálenosti řádově rovné rozměrům atomů nebo molekul.

Atomy jsou nejmenší neutrální částice, na něž lze hmotu rozdělit chemickou reakcí. Atomy jsou složeny z malého, hmotného atomového jádra, které je obklopeno relativně velkým a lehkým elektronovým obalem. Každý typ atomu odpovídá určitému chemickému prvku (viz periodická tabulka).

Elektron je nejznámější subatomární částice. Je to částice se záporným elektrickým nábojem. Elektrony jsou nositeli náboje při vedení elektrického proudu v kovech, polovodičích (majoritní v typu N) a v elektrických výbojích v plynech i

ve vakuu (např. katodové záření). Také radioaktivní záření beta (β^-) je tvořeno elektrony.

Ionty jsou elektricky nabitě částice atomární velikosti (atomy, molekuly, někdy také skupiny atomů či molekul). Rozlišujeme je na kationty a anionty.

Kationty jsou kladně nabitě ionty, obvykle atomy, které odevzdaly 1 nebo více elektronů, tzn. kationt má v elektronovém obalu méně elektronů než odpovídající atom. Většinou vznikají z elektropozitivních prvků, například sodíku, vápníku nebo železa.

Anionty jsou záporně nabitě ionty, obvykle atomy, které přijaly 1 nebo více elektronů, tzn. aniont má v elektronovém obalu více elektronů než odpovídající atom. Většinou vznikají z elektronegativních prvků, například z kyslíku nebo chloru.

Ionty vznikají při rozpouštění (např. solí ve vodě), kdy se část molekul rozpouštěné látky rozštěpí na dva (nebo i více iontů), nebo při ionizaci plynu, kdy rychle letící částice nárazem rozštěpí molekulu na ionty, a také při triboelektrickém nabíjení (kdy jedna látka předá elektrony látce druhé při jejich vzájemném dotyku nebo tření).

Tab. 1 Příklad elektricky nabitých částic

Částice	Symbol	Velikost náboje (násobky elem. náboje)
alfa částice	${}^4_2\text{He}^{+2}$	+2
Elektron	e^-	-1
Iont vodíku	H^+	+1
Positron	e^+	+1
Proton	p	+1

Pozn.: Částice alfa je atom helia, z něhož byl odstraněn elektronový obal (tzn. pouze jádro atomu helia). Positron je antičástice elektronu.

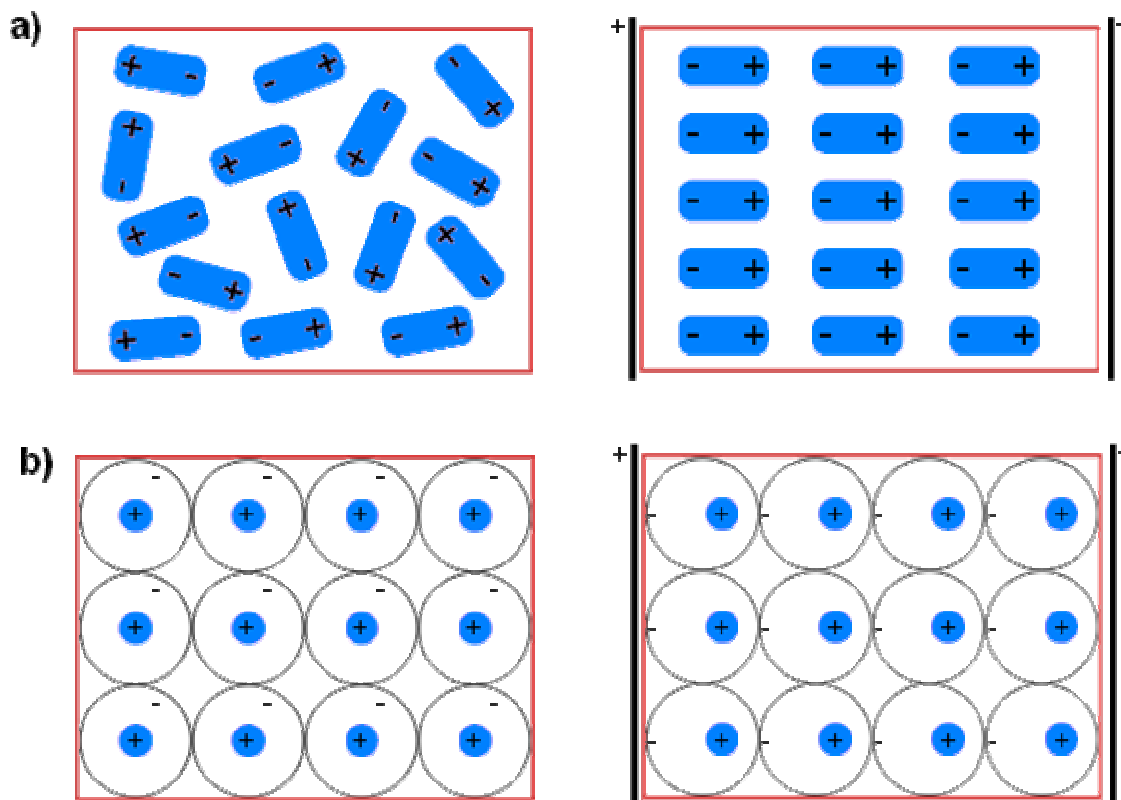
1.1.2 Vodiče, izolanty a dielektrika

Podle pohybu náboje daným materiálem rozlišujeme:

Vodiče - elektrický náboj se v nich snadno přemísťuje. Je to dáno tím, že např. elektrony, které jsou schopné přenášet náboj v kovech, jsou k atomovým jádrům slabě vázány a mohou se tedy od nich snadno odpoutat. Vytváří tak tzv. elektronový plyn, který je příčinou dobré vodivosti kovů.

Izolanty - elektrony jsou pevně vázány k atomovým jádrům a jejich pohyb daným materiálem proto není možný.

Dielektrika - teoretické dielektrikum (izolant) je látka, která neobsahuje volné náboje a má schopnost polarizace. Skutečné dielektrikum však vodí, ale proud je z hlediska praxe zanedbatelný. Dielektrika obsahují elektrické náboje obou polarit. Elektrické pole pak na tyto náboje působí a mění jejich polohu. To způsobuje následnou změnu elektrického pole – polarizaci (posuv elektronů vůči jádrům atomů). Vzniknou tak dipóly. Při přerušení působení elektrického pole na dielektrikum pak dipóly ve většině látek zanikají. [1]



Obr. 1 Polarizace a) polárního a b) nepolárního dielektrika

Pozn. Při polarizaci se z atomů nebo molekul dielektrika (nepolární dielektrikum) působením přitažlivé a odpudivé elektrické síly stanou elektrické dipóly – dojde k nesymetrickému rozložení částic s elektrickým nábojem uvnitř atomů nebo molekul. Některé látky (polární dielektrika, např. voda) obsahují elektrické dipóly i bez působení vnějšího elektrického pole. Jejich směr je ale chaotický a při polarizaci dojde pouze k uspořádání dipólů do jednoho směru. Všechny elektrické dipóly mají při polarizaci stejnou polaritu opačnou k polaritě vnějšího elektrického pole. Tím se velikost vnějšího elektrického pole zmenšuje. Poměr intenzity E_0 vnějšího elektrického pole k intenzitě výsledného elektrického pole E udává relativní permitivita dielektrika ε_r .

1.1.3 Permitivita

Je fyzikální veličina popisující izolační vlastnosti dielektrika (v případě statického elektrického pole). Permitivita vakua $\varepsilon_0 = 8,854\,187\,817 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$. Relativní permitivita je podíl permitivity daného materiálu a permitivity vakua, např. vzduchu, kde $\varepsilon_r = 1$. [1]

1.1.4 Elektrický náboj

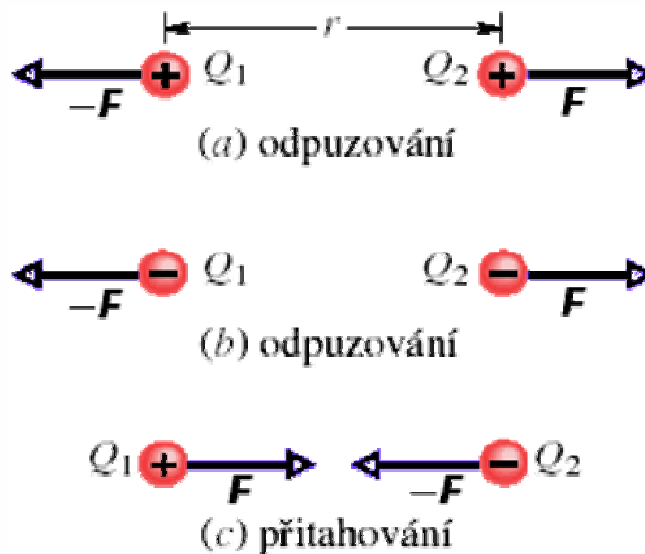
Elektrický náboj je skalární fyzikální veličina, která vyjadřuje schopnost působit elektrickou silou. Elektrický náboj je charakteristickou veličinou elektrostatického pole. Značí se Q (C - coulomb). Elektrický náboj může mít kladnou nebo zápornou hodnotu. Elektrické náboje všech reálných částic jsou rovny celistvému násobku elementárního náboje $e_0 = (1,602\,189 \pm 0,000\,005) \cdot 10^{-19} \text{ C}$. [2]

Tělesa, které mají elektrický náboj rovný nule nazýváme tělesa elektricky neutrální. Pohybující se elektrický náboj je popisován pomocí elektrického proudu I (A). Velikost elektrického náboje se při jeho pohybu nemění. Pokud se v tělese nachází více elektrických nábojů, je výsledný elektrický náboj tělesa roven algebraickému součtu elektrických nábojů jednotlivých částí. Celkové množství náboje v elektricky izolované soustavě se nemění. Tato skutečnost se označuje jako zákon zachování elektrického náboje. Podle tohoto zákona nelze elektrický náboj vytvořit ani zničit, lze jej jen přemístit.

1.1.5 Coulombův zákon

Velikost elektrických sil, kterými na sebe působí dva bodové náboje, je přímo úměrná absolutní hodnotě součinu jejich velikostí a nepřímo úměrná druhé mocnině jejich vzdálenosti:

$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{|Q_1Q_2|}{r^2} \quad (1)$$



Obr. 2 Vzájemné silové působení elektricky nabitých částic

Síly působící mezi dvěma různě nabitými tělesy jsou přitažlivé, pokud mají tělesa náboje se shodnými znaménky působí na ně síly odpudivé. Tyto síly se označují jako elektrostatické. Nabitá tělesa, která se pohybují na sebe navíc působí silami magnetickými.

1.1.6 Elektrický potenciál

Elektrický potenciál je skalární fyzikální veličina, která popisuje potenciální energii jednotkového elektrického náboje v neměnném elektrickém poli. Značí se φ a jednotkou je volt (V). Jde tedy o množství práce potřebné k přenesení jednotkového elektrického náboje ze vztažného bodu, kterému je přisouzen nulový potenciál, do daného místa. Za místo s nulovým elektrickým potenciálem se obvykle bere v praktických úlohách povrch Země.

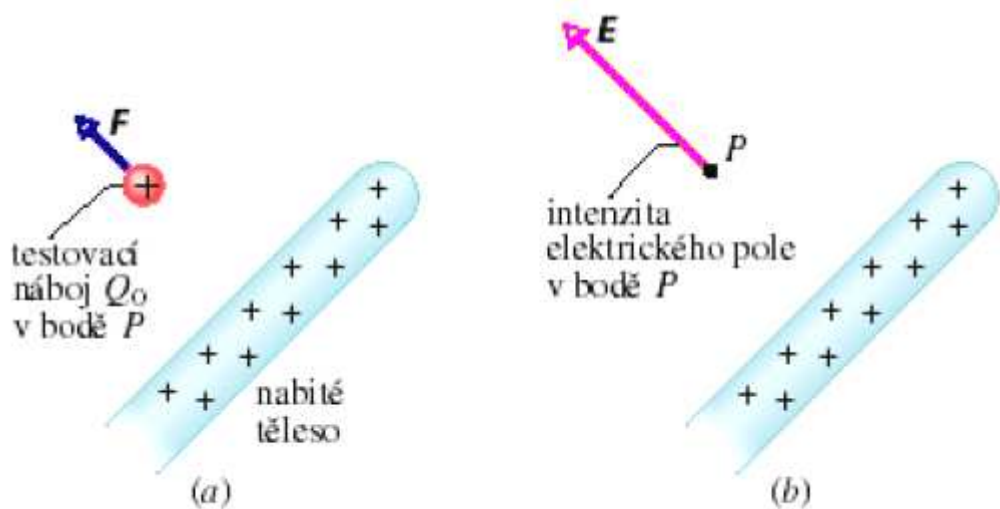
$$\varphi = \frac{W}{Q}, \quad (2)$$

kde W je potenciální energie nabitého tělesa a Q je jeho náboj.

Rozdíl potenciálů dvou bodů v prostoru pak označujeme jako napětí U , jednotkou je rovněž V.

1.1.7 Intenzita elektrického pole

Elektrické pole se šíří vakuem i hmotným prostředím, přičemž jeho charakteristická veličina intenzita elektrického pole E ($\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$) závisí na materiálové vlastnosti prostředí (relativní permitivitě ϵ_r). Vlivem vnějšího elektrického pole na vnitřní náboje dielektrika dochází k jeho polarizaci. Ve vodivých látkách způsobuje elektrické pole pohyb nábojů, tedy elektrický proud. K popisu takto indukovaných proudů se používá veličina proudová hustota J ($\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$). [3]



Obr. 3 Intenzita elektrického pole v bodě v prostoru

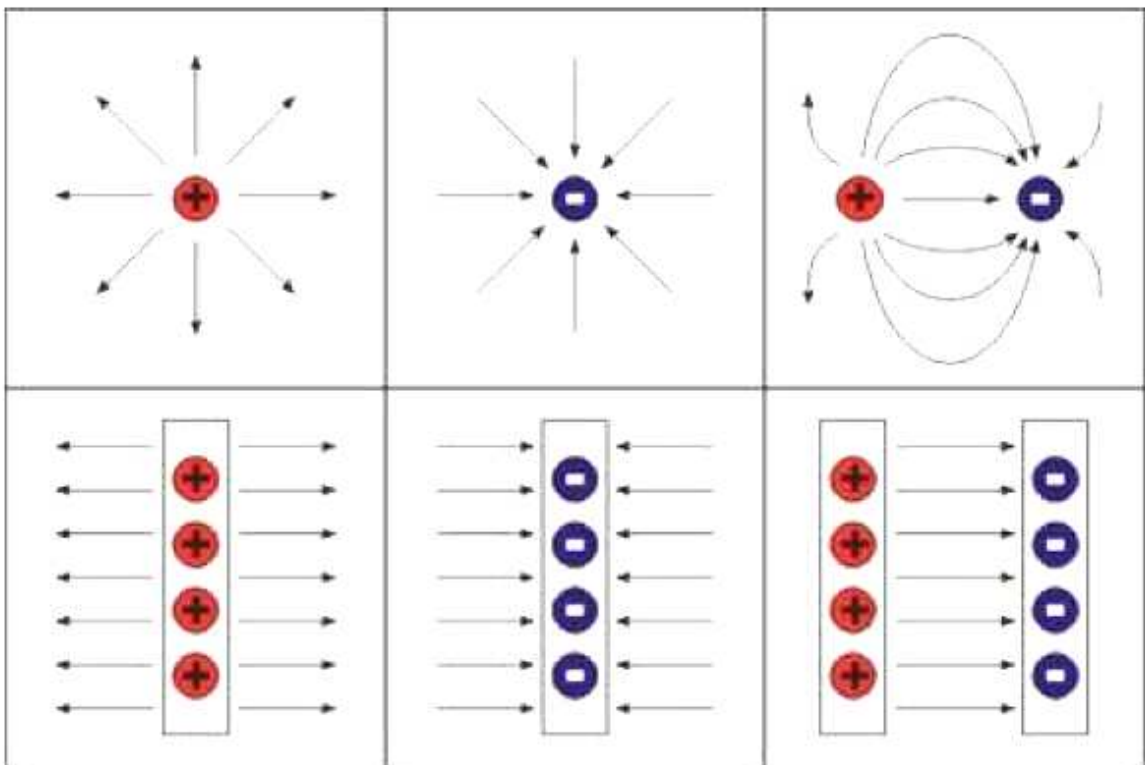
Intenzitu elektrického pole vytvořeného nábojem Q_1 na jiný bodový náboj Q_2 , umístěný ve vzdálenosti r lze vyjádřit pomocí vztahu:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \cdot \frac{1}{Q_2} \quad (3)$$

Nechá-li se vektor elektrické intenzity procházet uzavřenou plochou, jedná se o veličinu tok elektrické intenzity Φ_E .

Změna elektrické intenzity má za následek vznik magnetického pole, což popisuje dynamická teorie elektromagnetického pole. Důsledkem jsou jevy jako např. elektromagnetická indukce.

Intenzita elektrického pole se graficky zobrazuje pomocí ekvipotenciálních ploch (množiny bodů, které se vyznačují stejným potenciálem) nebo siločar (myšlené čáry, jejichž tečna pak určuje v každém místě daného pole směr intenzity). Ekvipotenciální plochy jsou vždy kolmé na siločáry.



Obr. 4 Elektrický náboj a jeho siločáry převzato z [4]

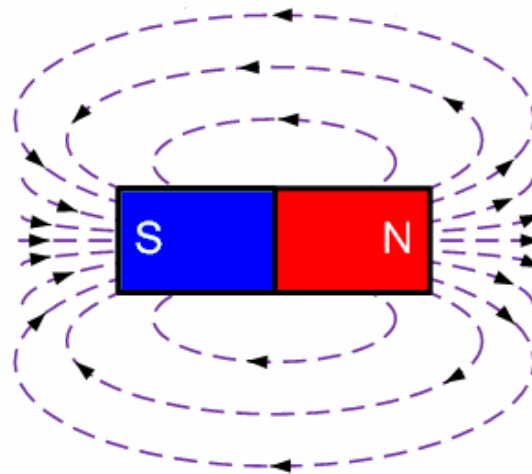
1.2 Magnetické pole

Magnetické pole je fyzikální pole, které se vyskytuje kolem elektrických vodičů, kde je jeho zdrojem volný elektrický proud a dále rovněž kolem tzv. permanentních magnetů, kde zdrojem pole jsou vázané elektrické proudy. Pokud bude uvedené fyzikální pole neměnné v čase, hovoříme pak o stacionárním magnetickém poli. Pole je charakterizováno vektorovou veličinou zvanou magnetická indukce B a indukčními čarami (uzavřené, neprotínající se orientované křivky, jejichž tečna v daném bodě má směr vektoru magnetické indukce a jejich hustota je úměrná velikosti vektoru magnetické indukce).

Vzhledem k charakteru indukčních čar je pole magnetické polem vírovým. Charakteristickým znakem vírových polí je to, že nemají klasický zdroj, ale vystupují jako doprovodná pole polí zřídlových, jejichž typickým zástupcem je pole elektrické. Společně pak vytváří pole elektromagnetické. [4]

1.2.1 Magnetické pole permanentního magnetu

Permanentním magnetem je těleso, které kolem sebe šíří magnetické pole, jehož zdrojem sou vázané elektrické proudy. Každý magnet má dva póly, které se nazývají severní pól (z angl. N – „North“) a jižní pól (z angl. S – „South“). Tato vlastnost je zachována i při rozdělení jednoho magnetu na libovolný počet dílů. Nelze tedy oddělením získat nový díl pouze s jižním nebo pouze se severním pólem. Magnetické pole je znázorňováno magnetickými indukčními čarami, které vždy tvoří uzavřené křivky, začínající na severním a končící na jižním pólu permanentního magnetu. [4]



Obr. 5 Magnetické indukční siločáry permanentního magnetu

1.2.2 Magnetické pole přímého vodiče s proudem a cívky s proudem

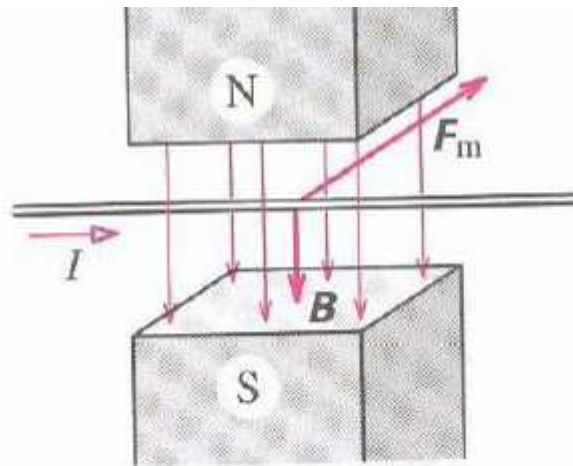
Magnetické pole vzniká kolem každého vodiče jímž protéká elektrický proud. Je tvořeno magnetickými indukčními čarami, jejichž rovina je pak kolmá ke směru protékajícího elektrického proudu. V případě cívky, kdy se jedná o několik jednotlivých proudových závitů cívky uspořádaných v řadě za sebou, se magnetické indukční čáry protahují. Uvnitř cívky je magnetické pole homogenní. V místech,

kde siločáry z cívky vystupují, se nachází severní magnetický pól, místa, kde siločáry do cívky vstupují jsou místem jižního magnetického pólu.

Ke stanovení orientace magnetických indukčních čar používáme **Ampérovo pravidlo pravé ruky**. Podle uvedeného pravidla pro přímý vodič platí, že pokud uchopíme vodič do pravé ruky tak, aby palec ukazoval dohodnutý směr proudu ve vodiči, pak prsty ukazují orientaci magnetických indukčních čar. Pokud pravidlo aplikujeme pro cívku, platí, že pokud prsty ukazují dohodnutý směr proudu v závitěch, pak palec ukazuje orientaci magnetických indukčních čar. [4]

1.2.3 Magnetická indukce

V magnetickém poli na sebe vzájemně působí jednotlivá magnetická pole vytvořená např. mezi cívkami s elektrickým proudem, mezi dvěma vodiči s elektrickým proudem nebo mezi dvěma permanentními magnety. Magnetické pole charakterizujeme vektorovou veličinou magnetická indukce B (Tesla T). Její velikost závisí jen na magnetickém poli, směr je definován jako tečna k magnetickým indukčním čarám a identickou orientací s magnetickými indukčními čarami (viz. Obr.6). [4]



Obr. 6 Vodič v homogenním poli dvou permanentních magnetů převzato z [4]

Hodnotu magnetické indukce přímého vodiče stanovíme ze vztahu:

$$B = \mu \cdot \frac{I}{2\pi \cdot d} \quad (4)$$

Hodnotu magnetické indukce ve středu proudového závitu stanovíme ze vztahu:

$$B = \mu \cdot \frac{I}{2r} \quad (5)$$

Hodnotu magnetické indukce cívky stanovíme ze vztahu:

$$B = \mu \cdot \frac{N \cdot I}{l} \quad (6)$$

kde: B – magnetická indukce [T]

μ – permeabilita prostředí

I – proud protékající vodičem [A]

d – vzdálenost od vodiče [m]

r – poloměr závitů [m]

l – aktivní délka vodiče [m]

N – počet závitů cívky

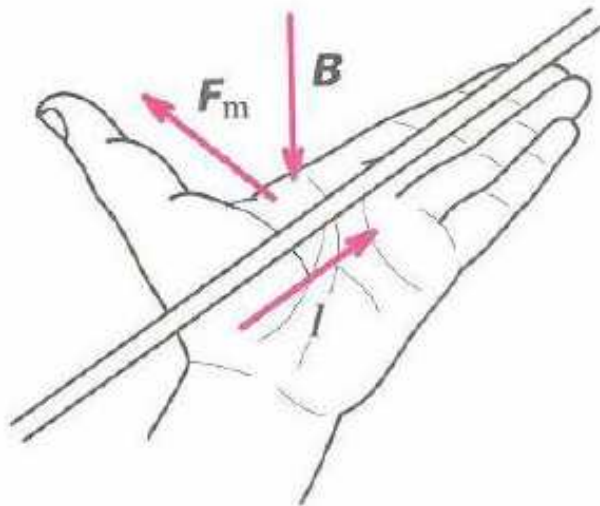
Pro velikost magnetické síly F_m , působící v mag. poli na vodič s proudem platí:

$$F_m = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \beta \quad (7)$$

kde: F_m – magnetická síla [N] a β – úhel sevřený vektorem B a vodičem.

Směr síly F_m stanovíme Flemingovým pravidlem levé ruky, které říká, že pokud prsty ukazují směr proudu a indukční čáry vstupují do dlaně, pak palec ukazuje směr síly, kterou působí magnetické pole na vodič s proudem (viz. Obr.7).

[4]



Obr. 7 Flemingovo pravidlo levé ruky převzato z [4]

Pro indukci magnetického pole vyvolaného elementem proudovodiče platí Biot-Savartův zákon. Biot-Savartův zákon popisuje magnetickou indukci, která vzniká díky pohybujícímu se náboji. Společně s Ampérovým zákonem o síle působící na náboj v magnetickém poli je základním zákonem magnetostatiky. Pomocí Biot-Savartova zákona lze určit i intenzitu magnetického pole vodičů s průřezem nezanedbatelných rozměrů. Průřez nejprve rozdělíme na elementární proudová vlákna s proudy dI . Určíme pole jednoho vlákna jako pole tenkého vodiče. Výsledné pole vodiče pak určíme integrací.

Biot-Savartův zákon můžeme napsat ve tvaru:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{J \times r}{r^3} dV \quad (8)$$

Magnetické pole můžeme definovat pomocí magnetického (indukčního) toku Φ (weber Wb). Další definující veličinou je intenzita magnetického pole H ($A \cdot m^{-1}$), která určuje vlastnosti magnetického pole v závislosti na prostředí, kterým se šíří. [3]

1.3 Elektromagnetické pole

Elektromagnetické pole je rozšířeno po celém vesmíru. Je jedním ze čtyř základních sil v přírodě. Pole se rozšiřuje pomocí elektromagnetického záření, kdy roste energie a klesá vlnová délka.

Pole může být vnímáno jako směs z elektrického pole a magnetického pole. Elektrické pole se vytváří ze stacionárních nábojů a magnetické pole z pohybujících se nábojů (proudů), tyto dvě části jsou často popisovány jako zdroje pole. Způsob, jakým náboje a proudy interagují s elektromagnetickým polem je popsána v Maxwellových rovnicích a Lorentzově vztahu pro sílu:

$$F = q(E + v \times B). \quad (9)$$

Lorentzova síla je síla působící na náboj (vodič v elektromagnetickém poli).

Z klasického pohledu lze elektromagnetické pole považovat za plynulé, kontinuální pole, z kvantově mechanického hlediska je oblast považována za kvantovanou, která je složeninou z jednotlivých fotonů. Přesun elektromagnetické energie je popsán jako pohyb fotonů s pevnou frekvencí. Max Planck v souvislosti s odkazy na energii fotonů na sestavil rovnici:

$$E = h \cdot \nu \quad (10)$$

která může být také napsána

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (11)$$

kde h je Planckova konstanta ($h=6.6260693 \cdot 10^{-34}$ J·s), ν je frekvence těchto fotonů, c je rychlost světla a λ je vlnová délka.

Pozn. Například fotoelektrický efekt (emise elektronů z kovových povrchů vystavených elektromagnetickému záření). Zde bylo zjištěno, že zvyšování intenzity dopadajícího záření nemá vliv na energii, ale pouze frekvence záření je důležitá.

V minulosti se elektricky nabitě objekty považovaly za zdroje produkující dva typy nábojů spojených s jejich nábojem. Elektrické pole je produkováno při stacionárním náboji ve vztahu k pozorovateli vlastností náboje. Magnetické pole se vytváří při pohybu nábojů (vytvoření elektrického proudu) vzhledem k pozorovateli. V průběhu času si uvědomili, že

elektrické a magnetické pole je lepší brát jako dvě části z většího celku - elektromagnetické pole.

Jakmile toto elektromagnetické pole bylo vytvořeno z daných nábojů, jiné objekty s nábojem byly následně ovlivňovány silou. Pokud tyto další náboje a proudy jsou srovnatelné co do velikosti zdroje, vytvářejí nové elektromagnetického pole. To znamená, že elektromagnetické pole může být chápáno jako dynamický subjekt, který způsobí, že další náboje a proudy jsou uvedeny do pohybu a ty také mohou dále ovlivňovat. Tyto interakce jsou popsány pomocí Maxwellových rovnic a Lorentzovým vztahem pro sílu. Existují různé matematické způsoby zahrnující elektromagnetického pole. První z nich je zobrazení elektrických a magnetických polí pomocí tří-dimenzionálního vektoru pole. Tyto vektorové pole mají hodnotu stanovenou na každém místě v prostoru a času, a jsou proto často považovány za funkce v prostoru a čase souřadnice. Jsou často zapsány jako $E(x, y, z, t)$ (elektrické pole) a $B(x, y, z, t)$ (magnetické pole).

Pokud vezmeme v úvahu pouze elektrické pole E , jako nenulové a konstantní v čase, jedná se o elektrostatická pole. Podobně je tomu u magnetického pole B . Pokud je nenulové a je v konstantním čase jedná se o magnetické pole. Nicméně, pokud jde o elektrické nebo magnetické pole, které má časovou závislost, pak obě pole musí být považována jako společně provázaná a jedná se o elektromagnetické pole.

Chování elektrických a magnetických polí, ať už v případech elektrostatiky, magnetismu nebo elektrodynamiky (elektromagnetické pole), je upraveno pro vakuum. Formulace vektorového pole jsou

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (12)$$

kde ∇ je divergence, E je intenzita elektrického pole, ρ je celková hustota elektrického náboje a ϵ_0 je konstanta (permitivita vakua $8,854187817 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$).

$$\nabla \cdot B = 0$$

Magnetické pole divergencí je rovné nule, jde o vektorové nestlačitelné pole. Zde B je intenzita magnetického pole.

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (13)$$

Maxwell-Faradayova rovnice vycházející z Faradayova zákona o indukci. Tato rovnice popisuje vytvářející se elektrické pole při změně magnetického pole. Tato rovnice se objevuje v moderní soustavě Maxwellových rovnic a je často označována jako Faradayův zákon. Nicméně protože obsahuje parciální derivace času, její použití je omezeno na situace, kdy se zkušební náboj stojí v čase s různým magnetickým polem. To však neplatí, pokud se elektrický náboj pohybuje v magnetickém poli.[5]

1.4 Maxwellovy rovnice

Maxwellovy rovnice jsou základní zákony v makroskopické teorii elektromagnetického pole, které zformuloval James Clerk Maxwell v roce 1865. Lze je zapsat v integrálním nebo v diferenciálním tvaru. V integrálním tvaru popisují elektromagnetické pole v jisté oblasti, kdežto v diferenciálním tvaru v určitém bodu této oblasti. [1]

1.4.1 Maxwellovy rovnice a veličiny v nich použité

Tab. 2 Fyzikální proměnné použité v Maxwellových rovnicích [2]

Označení	Význam	Jednotka SI
D	elektrická indukce	C/m ²
B	magnetická indukce	T
E	intenzita elektrického pole	V/m
H	intenzita magnetického pole	A/m
ρ	hustota volného náboje	C/m ³
j	hustota elektrického proudu	A/m ²

1.4.2 Maxwellovy rovnice elektrostatického pole

Oblast elektrostatických jevů je charakterizována časovou nezávislostí všech veličin a neexistencí proudů ($j = 0$).

Výchozí rovnice elektrostatického pole jsou:

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = 0, \quad \operatorname{div} \mathbf{D} = \rho,$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = 0, \quad \operatorname{div} \mathbf{B} = 0.$$

K těmto rovnicím připadají hraniční podmínky:

$$E_{1t} - E_{2t} = 0, \quad D_{1n} - D_{2n} = \eta,$$

$$H_{1t} - H_{2t} = 0, \quad B_{1n} - B_{2n} = 0.$$

Rovnice pole včetně hraničních podmínek se rozpadají na dvě nezávislé soustavy, tudíž lze elektrické pole zkoumat nezávisle na poli magnetickém. [2]

1.4.3 Maxwellovy rovnice stacionárního magnetického pole

Z pokusů vyplývá, že teče-li nějakým vodičem stacionární proud, vyvolává stacionární magnetické pole. Na rozdíl od elektrostatiky nyní tedy existuje souvislost mezi elektrickými a magnetickými veličinami pole. [2]

Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru jsou:

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = 0, \quad \operatorname{div} \mathbf{D} = \rho,$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J}, \quad \operatorname{div} \mathbf{B} = 0.$$

1.4.4 Maxwellovy rovnice kvazistacionárního elektromagnetického pole

Kvazistacionární jevy jsou takové jevy, při kterých můžeme zanedbat posuvný proud všude, kromě kondenzátů. Maxwellovy rovnice tedy musíme uvažovat v obecném tvaru. Pro regulární body pole můžeme rovnice psát v diferenciálním tvaru (regulární body jsou takové body, ve kterých jsou veličiny pole spojité a spojitě diferencovatelné funkce polohy).

Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru jsou:

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad \operatorname{div} \mathbf{D} = \rho,$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad \operatorname{div} \mathbf{B} = 0.$$

Kvazistacionární jevy jsou typické pro silnoproudé aplikace při síťové frekvenci 50Hz (případně 60Hz – tato frekvence se používá např. v USA nebo v Kanadě). Musí být ovšem splněna ještě jedna podmínka. Rozměry uvažované soustavy musí být zanedbatelné v porovnání s vlnovou délkou [2]

$$\lambda = \frac{v}{f}. \quad (14)$$

Pozn. Vlnová délka je ve vzduchu přibližně $300000/50 = 6000$ km. Tato podmínka není splněna u (elektricky) dlouhých vedení.

Pozn. **Rotace** je matematický operátor definovaný pro vektorové funkce n proměnných, který v každém bodě udává lokální míru rotace. Značí se rot . Ve třech rozměrech (pro funkci tří proměnných) jej lze zapsat ve tvaru:

$$\text{rot } \mathbf{E} = \left(\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z}, \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x}, \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \right).$$

Divergence je diferenciální operátor ve vektorovém počtu udávající zřídlovost vektorového pole. Je-li zkoumaným polem např. gradient teploty (vektory udávají rychlost vedení tepla), potom kladná divergence v daném bodě znamená, že v daném bodě vzniká teplo a záporná, že v daném bodě teplo zaniká. Značí se div .

Jsou-li x, y, z kartézské souřadnice v 3-rozměrném prostoru, a e_x, e_y, e_z báze jednotkových vektorů a $\mathbf{F} = F_x e_x + F_y e_y + F_z e_z$ je spojitě diferencovatelné vektorové pole, pak jeho divergenci definujeme jako skalární

$$\text{veličinu } \text{div } \mathbf{F} = \left(\frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} \right).$$

1.5 Pohyb elektricky nabitých částic v elektromagnetickém poli

Na pohybující se nabitou částici v elektromagnetickém poli působí tzv. Lorentzova síla, což je souhrnné vyjádření silového působení elektrického i magnetického pole. Magnetická složka může měnit pouze dráhu částice, elektrická pak její rychlost. Možnosti ovlivnění pohybu částic se využívá např. v televizních obrazovkách, elektronových mikroskopech, v cyklotronech, důsledkem Lorentzovy síly je rovněž tzv. Hallův jev, který spočívá v indukci napětí na plochém vodiči ve směru kolmém k protékajícímu proudu I i k vnějšímu magnetickému poli. Bude-li vodič i protékající proud kalibrovaný, bude velikost indukovaného napětí záviset jen na indukci vnějšího magnetického pole, což umožňuje její měření. [3]

Pozn. Hallův jev se uplatňuje ve vodiči (polovodiči), kterým protéká proud za přítomnosti magnetického pole. Vložíme-li vodivou destičku tloušťky d , kterou protéká proud I , do magnetického pole s magnetickou indukcí B , kolmou na směr proudu, pak ve třetím směru, kolmém na směr proudu a zároveň na směr magnetického pole změříme potenciálový rozdíl U_H . Následkem Hallova jevu vzniká Hallovo napětí.

1.6 Elektromagnetické vlnění

Pohybem elektrického náboje se vytváří kolem každého vodiče elektromagnetické pole. Vedením ze dvou paralelních vodičů, jejichž vzájemná vzdálenost je velmi malá v porovnání s vlnovou délkou protékajícího proudu, vzniká mezi vodiči elektromagnetické pole, které umožňuje přenos vysokofrekvenční energie.

Podél takových vodičů se rychlostí světla šíří tzv. **elektromagnetické rozruchy**, které jsou původem elektromagnetického vlnění podobně jako mechanické rozruchy způsobují mechanické vlnění a stejně tak jej lze i popsat vlnovou funkcí, která je řešením vhodné vlnové rovnice.

Základní vlastnosti elektromagnetické vlny můžeme tedy vyčíst z **vlnové rovnice**. Složky elektromagnetického pole jsou matematicky formulovány sinovou funkcí času t a prostoru x :

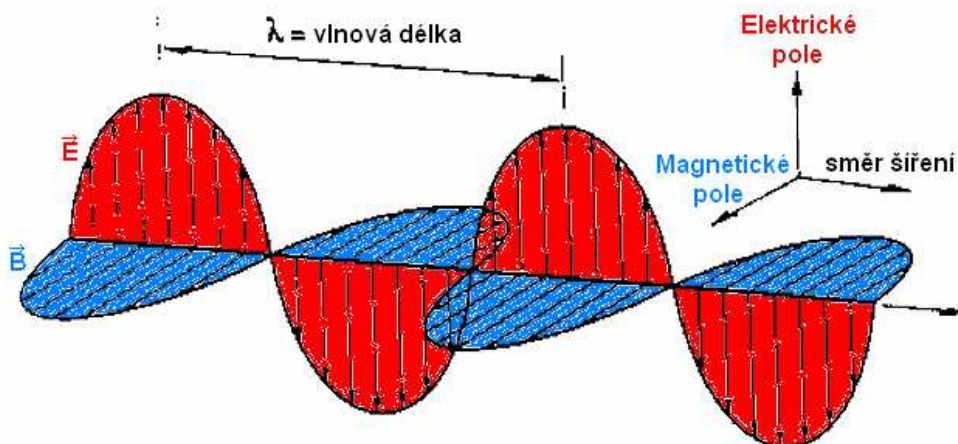
$$E = E_{\max} \cdot \sin(kx - \omega t) \quad (15)$$

$$B = B_{\max} \cdot \sin(kx - \omega t) \quad (16)$$

přičemž E_{\max} a B_{\max} jsou amplitudy složek, k je úhlový vlnčet a ω je úhlová frekvence vlnění.

Nejjednodušší případ elektromagnetické vlny je příčná rovinná vlna (Obr.8), která se šíří homogenním nevodivým prostředím rychlostí světla a má vlastnosti vlnové a kvantové:

- vlnové (odraz, lom, ohyb, interference, polarizace).
- kvantové (fotoelektrický jev).



Obr. 8 Rovinná elektromagnetická vlna

Vektory E a B jsou na sebe kolmé a oba jsou kolmé ke směru šíření. Mění-li se E harmonicky, mění se harmonicky i B , vektory jsou ve fázi. [3]

Pro bezdrátový přenos je nutné aby rozměr antény byl srovnatelný s vlnovou délkou přenášeného vlnění. Příkladem může být jednoduchá smyčka vodiče (tzv. magnetický dipól) s průřezem a materiálem voleným tak, aby stejnosměrný odpor byl zanedbatelný a indukčnost smyčky byla nenulová. Smyčku rozřízneme a připojíme ke zdroji střídavého proudu (50 Hz). Při tomto nízkém kmitočtu bude vlnová délka mnohem větší než rozměry smyčky. Napětí předbíhá proud o $\pi/2$ a ztracený výkon na smyčce bude nulový. Bude-li kmitočet proudu, kterým smyčku budíme tak vysoký, že vlnová délka bude kratší než smyčka, bude proud podél smyčky měnit svoji fázi. Poté bude v určitém místě smyčky proud s napětím ve fázi a zdroj bude muset dodávat do smyčky reálný výkon – původně nulový odpor smyčky se změnil na nenulový. Tomuto odporu se říká radiační odpor a reálný elektrický výkon na něm ztracený vyzařuje smyčka do prostoru okolo sebe. Smyčce nebo vodiči, který vyzařuje elektromagnetickou energii říkáme anténa. Její obvyklý rozměr je $1/2$ nebo $1/4$ vlnové délky (rezonanční antény).

Anténou prochází vysokofrekvenční proud, který ji napájí. Ten je nejvyšší v místě připojení antény k napájecí a nulový na konci antény. Průchodem vř proudou anténou se

vytváří v jejím okolí střídavé magnetické a elektrické pole. Vyzařování je buď rovnoměrně do všech směrů (prutová anténa kolmá k zemi) a pak intenzita elektrického a magnetického pole ubývá se čtvercem vzdálenosti nebo upřednostňuje určitý směr (směrové, parabolické antény) a intenzita ubývá mnohem pomaleji.

1.6.1 Vlastnosti elektromagnetického vlnění

Magnetická a elektrická složka jsou ve vzájemném vztahu, který definují Maxwellovy rovnice. Z jejich řešení vyplývá, že úbytek vektoru B v čase vede k nárůstu vektoru E ve směru osy x a naopak, (což jednoznačně prokazuje vztah mezi E a B), dále se jejich řešením určí rychlost šíření elektromagnetického vlnění v homogenním prostředí. Při šíření elektromagnetického vlnění dochází k transportu energie, kterou mohou přijímat předměty, které záření absorbují. Množství energie dW transportované za jednotku času jednotkovou plochou kolmou ke směru záření se nazývá intenzita vlnění I (W/m^2). Pro elektromagnetické vlnění je výhodnější popisovat intenzitu tzv. Poyntingovým vektorem S .

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (17)$$

Stejně jako mechanické vlnění, i elektromagnetické může interferovat, odrazet se nebo být pohlcováno v závislosti na vlastnostech prostředí, kterým prochází. [3]

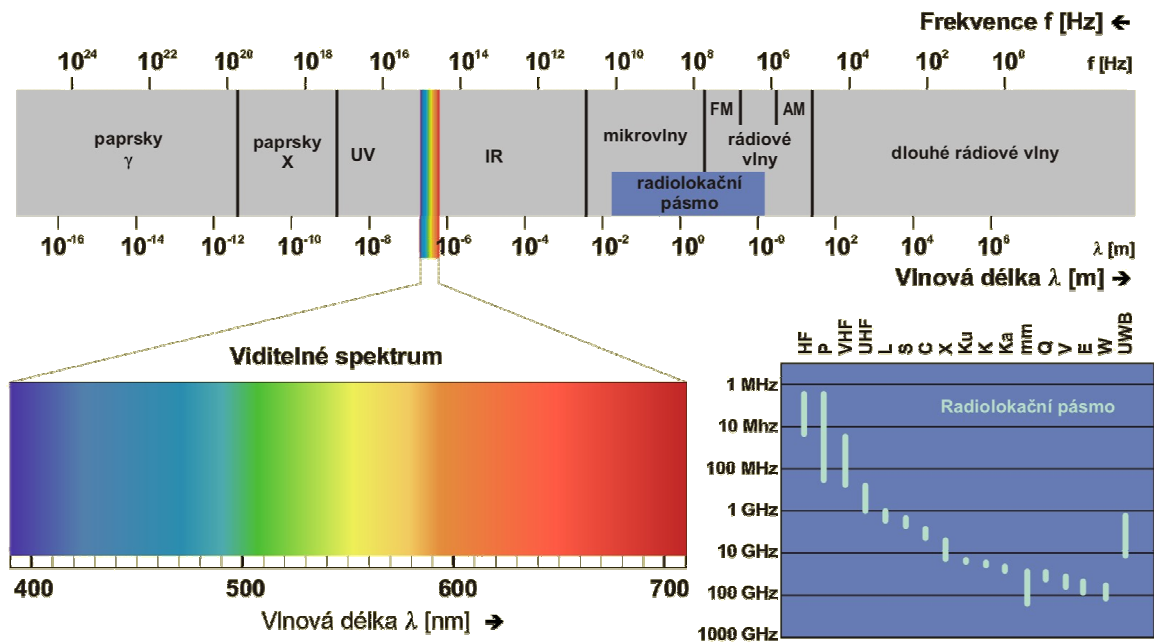
Pozn. Poyntingův vektor je vektorový součin intenzit elektrického a magnetického pole. Tento vektor popisuje přenos energie prostřednictvím elektromagnetického pole. Jeho velikost udává plošnou hustotu toku výkonu, směr a orientace se shodují se směrem a orientací toku výkonu. To platí, pokud pro určení hodnoty Poyntingova vektoru použijeme intenzity elektrického a magnetického pole, které přísluší jedné elektromagnetické vlně (mají stejnou příčinu, např. stejný zdroj napětí v elektrickém obvodu).

1.6.2 Spektrum elektromagnetického vlnění

Elektromagnetické vlnění je charakterizováno vlnovou délkou λ (metr) nebo frekvencí f (hertz Hz), přičemž součin vlnové délky a frekvence nám udává rychlost šíření v m/s. Rozsah frekvencí elektromagnetického záření je teoreticky neomezený

spodní ani horní hranicí, prakticky je však v současné době známo spektrum o rozsahu asi 30 řádů. To se podle používaných zdrojů a detektorů dělí na několik frekvenčních oborů, přičemž záření z různých oborů mají velmi odlišné vlastnosti co se týká šíření vlnění, prostupnosti a přenášené energie.

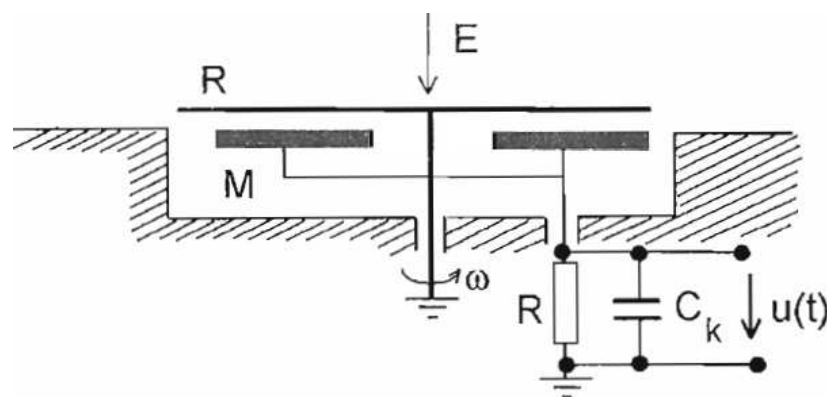
Rozdělení frekvenčního spektra – viz Obr. 9:



Obr. 9 Frekvenční oblasti elektromagnetického spektra převzato z [6]

2 SENZORY ELEKTRICKÉHO POLE

Elektrostatický náboj nashromážděný na povrchu objektů se měří bezdotykově na základě elektrostatickou indukci vyvolaného proudu odporem, spojující elektrodu měřicího kapacitátoru se zemí. Měření napětí na velkém odporu klade extrémní požadavky na vstupní odpor zesilovače voltmetru, často nesplnitelné obvyklými metodami, tj. použitím tranzistorů FET na vstupu. Řešením je dynamický kapacitor, v němž je kapacita mezi aktivní elektrodou M a elektromagneticky rozkmitávanou (případně rotující) elektrodou R periodicky proměnná s časem. (Obr.10) [7]



Obr. 10 Dynamický kapacitor převzato z [7]

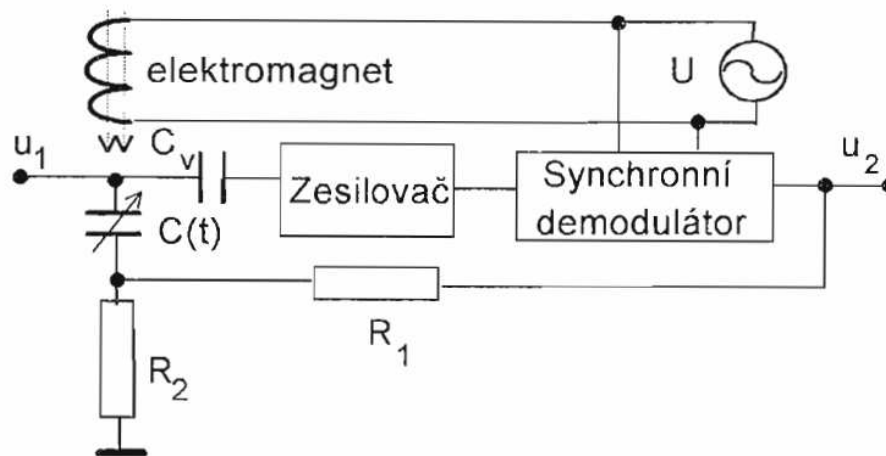
Jde o kapacitní modulátor s výstupním napětím

$$u(t) = \frac{Q}{C(t)} \quad (18)$$

jehož střídavou složku po oddělení kapacitorem C_v s velmi kvalitní izolací zesiluje střídavý zesilovač. Usměrněné napětí (obvykle synchronním demodulátorem) je měřítkem náboje. Ve zpětnovazebním uspořádání výstupní napětí slouží k vytvoření kompenzačního pole (Obr.11) a dynamický kapacitor funguje jako nulový indikátor.

Princip dynamického kondenzátoru je pro účely měření parametrů elektrostatického pole upraven tak, jak je na (Obr.10). Uzemněná rotující elektroda R má tvar kruhových výsečí tvarově shodných se segmenty měřících elektrod M. Při každém zakrytí a odkrytí elektrod M indukci vzniklé náboje vyvolávají proudové impulzy na odporu R napětí $u(t)$ s tvarem závislým na geometrii elektrod a hodnotě parazitních kapacit C_k . Výhodné je, že lze použít střídavý zesilovač a synchronní demodulátor s referenčním napětím odvozeným od rotující elektrody R. Vlastnosti přístroje jsou závislé na hodnotách kontaktního

potenciálu rozhraní elektroda – vzduch, permitivitě prostředí a dokonalosti uzemnění rotující elektrody R. Dosahuje se rozlišovací schopnosti 1 V/cm s přesností až 1%. [7]



Obr. 11 Zpětnovazební zapojení dynamického kapacitoru převzato z [7]

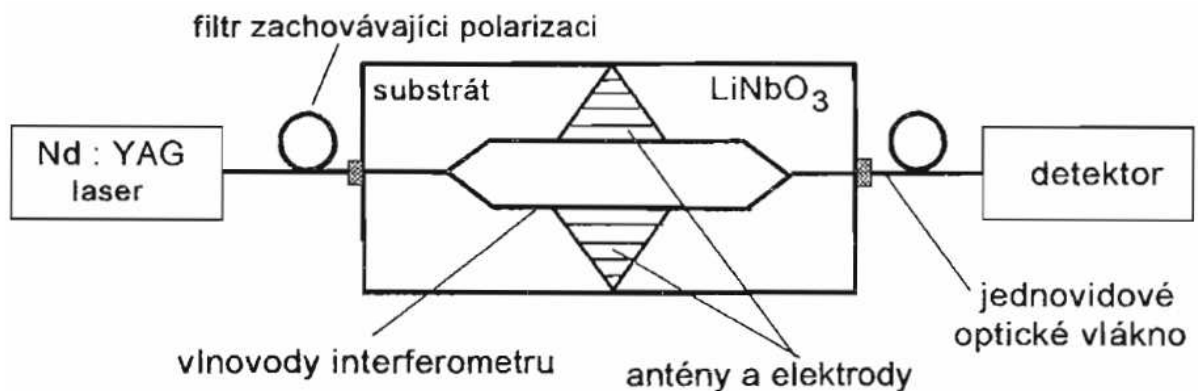
2.1 Senzor náboje se zvyšováním vodivosti prostředí

Na jedné z elektrod měřícího kapacitoru (konektor) je upevněn zdroj radioaktivního záření, který vyvolává ionizaci molekul v okolí. Takto vzniká dráha pro nabíjení kapacitoru ze zdroje měřeného náboje. Náboj je přijímán až do vyrovnání potenciálu kolektorové elektrody s okolím. Napětí na měřícím kapacitoru je úměrné náboji a měří se voltmetrem s vysokým vstupním odporem. Pro zvyšování vodivosti okolí kolektoru lze také použít plamenného, hrotového nebo elektronového kolektoru. [7]

Senzory pro měření náboje lze také použít pro měření intenzity nebo gradientu elektrického pole.

2.2 Senzory elektrického pole s optickými vlákny

Napětí z antény řídí elektrooptický modulátor, který je koncipován jako Mach-Zehnderův interferometr realizovaný postupy integrované optiky na substrátu z LiNbO_3 . Vlnovody na substrátu jsou obvykle zhotoveny postupy APE (Annealed Proton-Exchange). Optické vlastnosti LiNbO_3 lze ovládat i napětím řádově jednotek V, proto je možné měřit i nízké úrovně elektromagnetického pole, např. pro potřeby testování elektromagnetické kompatibility. [7]



Obr. 12 Elektrooptický senzor pro měření intenzity elektrického pole převzato z [7]

Vodivé plošky antén o rozměrech několik mm, vytvořené na substrátu, tvoří současně elektrody pro ovládní optických vlastností vlnovodů elektrickým napětím. Senzor pole této konstrukce byl realizován pro širokopásmové měření elektrického pole v rozsahu frekvencí od 100 Hz do 2,5 GHz, citlivost 0,1 V/cm při šíři pásma 7,5 kHz. [7]

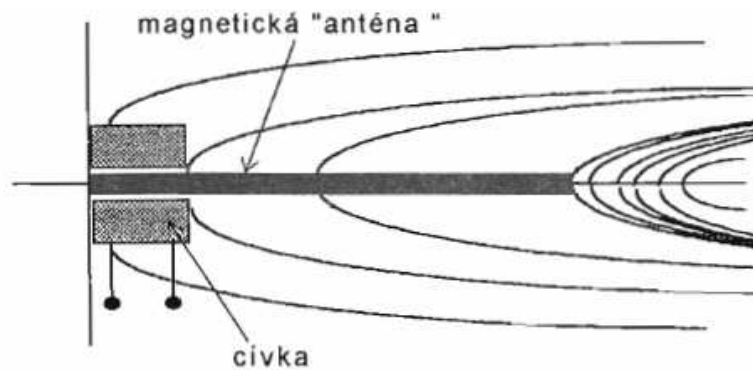
3 SENZORY INTENZITY MAGNETICKÉHO POLE

Nejjednodušším senzorem magnetického pole je snímací cívka, v níž se indukují napětí dle Faradayova zákona indukce.

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d}{dt} \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (19)$$

Napětí cívky U odpovídající pravé straně rovnice (19) je zpracováno v integračním zesilovači, jehož výstupní napětí odpovídá zadané hodnotě magnetického toku Φ nebo indukci B . Cívka musí být elektrostatičticky stíněná, aby se neuplatnil průnik rušivých napětí kapacitní vazbou. Citlivost je přímo úměrná počtu závitů N , avšak zvyšování N má za následek růst rozměrů a kapacity cívky. Při měření na vyšších frekvencích je nutno respektovat změny citlivosti s frekvencí, jelikož náhradní obvod cívky má vlastnosti rezonančního obvodu. Rotující nebo vibrující cívkou lze měřit stejnosměrné magnetické pole. Zpracování výstupního signálu je obdobné jako v případě střídavého pole. [7]

Snímací cívka s feromagnetickým jádrem (magnetická anténa) má podstatně vyšší citlivost a rozměry, jelikož pole je soustředěno v okolí jádra.



Obr. 13 Snímací cívka s feromagnetickým jádrem převzato z [7]

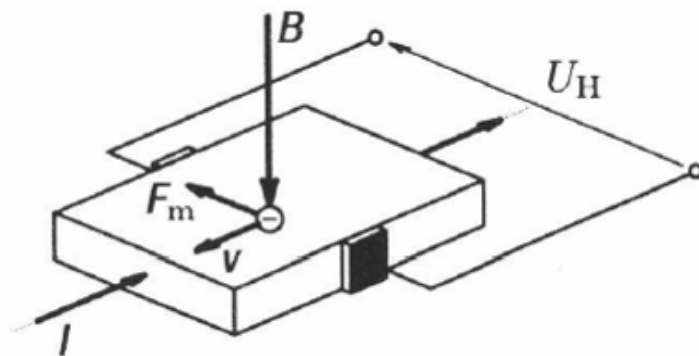
Menší počet závitů pro dosažení stejné citlivosti znamená pokles kapacity vinutí a tedy možnost měření rychle proměnných magnetických polí. Složitý průběh magnetického pole v okolí jádra znesnadňuje početní návrh a optimalizaci senzoru.

Nezávislost výstupního napětí senzoru na kmitočtu měřeného pole je možné dosáhnout zavedením záporné zpětné vazby. Část vstupního napětí se převede na vinutí, generující v jádru opačné magnetické pole. Takto lze potlačit rezonanční chování senzoru, avšak za cenu náchylnosti soustavy ke kmitům. [7]

3.1 Hallovy sondy

Hallovy sondy se v současné době používají zejména pro měření magnetické indukce, ale své použití našly i při měření proudu. Dosažitelná přesnost je asi 1%. Přístroje lze použít pro měření proudu do kmitočtu cca 30kHz.

Pokud do homogenního magnetického pole umístíme destičku z kovu nebo polovodiče, přemísťují se volné částice s nábojem působením magnetické síly k jedné boční stěně destičky. To se projeví vznikem malého Hallova napětí mezi bočními stěnami. Toto napětí U je přímo úměrné proudu I , magnetické indukci B a nepřímo úměrné tloušťce pásku d :



Obr. 14 Hallova sonda

$$U = R_H \cdot \frac{I \cdot B}{d} \quad (20)$$

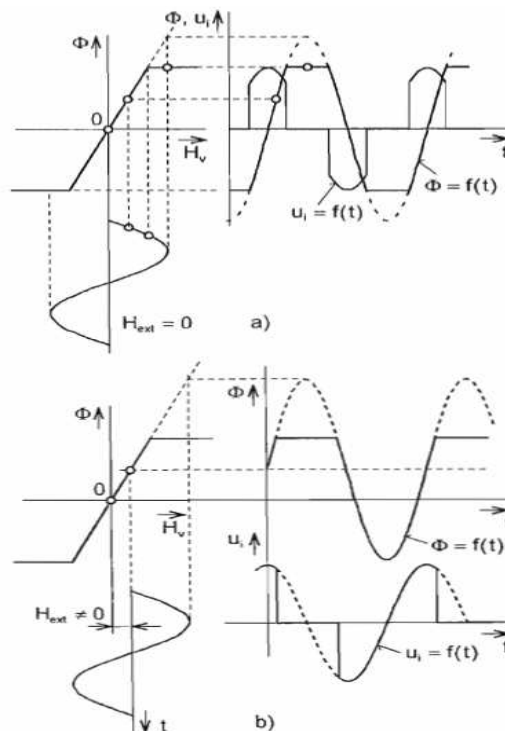
Hallova konstanta R_H má pro některé vodiče kladnou a pro jiné zápornou hodnotu. Z teorie vyplývá, že Hallova konstanta je nepřímo úměrná hustotě nositelů proudu, a proto je Hallův jev při stejném magnetickém poli a stejné hustotě proudu mnohem silnější u polovodičů než u kovů. Hallova jevu se tedy využívá zvláště u polovodičů, a to jak ke studiu jejich vlastností, tak k praktickým aplikacím.

Na Hallovu jevu je především založeno měření magnetických polí. Polovodičový pásek s postranními kontakty se vloží do měřeného pole a vede se jím slabý, přesně známý proud a měří se Hallovo napětí. Tyto přístroje se nazývají měřiče magnetické indukce.

3.2 Senzory magnetického pole s feromagnetickým principem (fluxgate)

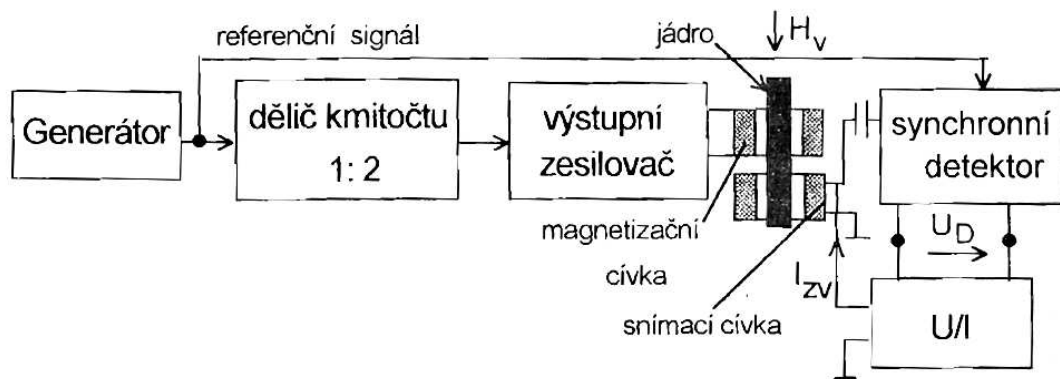
V principiálním uspořádání senzorů na tomto principu je jádro z feromagnetického materiálu s velkou permeabilitou a malou koercitivní silou umístěné v ose kostry dvou cívek: magnetizační a snímací. Jádro je periodicky buzeno do nasycení sinusovým proudem v magnetizačním vinutí. Vzniklý harmonický průběh intenzity pole H vyvolává magnetickou indukci B jádra s průběhem neharmonickým a závislým na tvaru křivky $B=f(H)$. Výstupní napětí na snímací cívice je úměrné derivaci hustoty pole uvnitř jádra a obsahuje pouze liché harmonické, jelikož funkce $B=f(H)$ je lichá. Demagnetizačními účinky volných konců jádra se závislost toku jádra na intenzitě měřeného pole H a budícím proudem I_B natolik komplikuje, že přesný výpočet je nemožný, proto pro vysvětlení podstaty činnosti je hysterezní smyčka nahrazena lomenou čarou. (Obr.15a)

Za předpokladu buzení sinusovým proudem a (přibližně) sinusového průběhu intenzity pole H_B jsou graficky odvozeny průběhy toku $\Phi(t)$ a napětí indukovaného ve snímací cívice $u_i(t)$. Bez přítomnosti vnějšího pole ($H=0$) neobsahuje symetrický průběh $u_i(t)$ sudé harmonické. Působením vnějšího pole H_v orientovaného ve směru jádra sondy (Obr.15b), vzniká nesymetrie průběhu $\Phi(t)$, vedoucí ke vzniku sudých harmonických napětí $u_i(t)$. [7]



Obr. 15 Princip feromagnetické sondy převzato z [7]

Amplituda druhé harmonické je úměrná hodnotě H_v , a je vyhodnocována synchronní demodulací. Nároky na obvody synchronního demodulátoru (tzv. dynamickou rezervu) jsou mimořádné, jelikož se vyžaduje zpracování signálu na druhé harmonické o nízké úrovni za přítomnosti o několik o několik řádů vyšší amplitudy první harmonické. Dokonalejší měřicí obvody pracují na zpětnovazebním principu, jehož podstatou je kompenzace měřeného pole H_v proudem I_{ZV} odvozením z výstupu synchronního detektoru převodníkem napětí – proud U/I . Přitom snímací cívka může sloužit současně jako kompenzační (Obr.16), střídavé výstupní napětí je odděleno kapacitorem. [7]



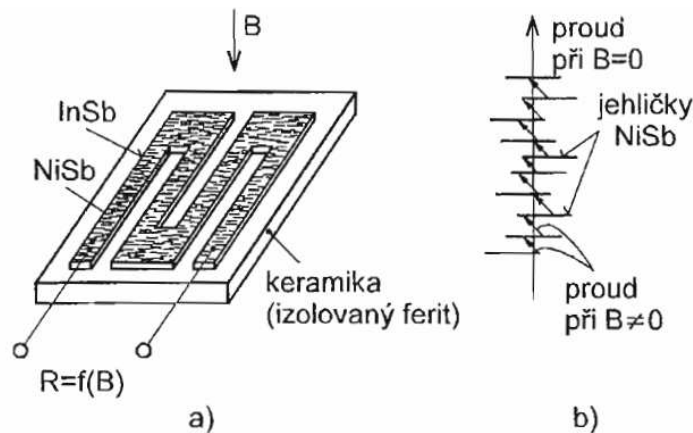
Obr. 16 Kompenzační zapojení feromagnetické sondy převzato z [7]

Dalšího zlepšení parametrů lze dosáhnout v souladu se zásadami potlačování rušivých veličin u senzorů diferenčním uspořádáním. Používá se dvou jader s opačně orientovanými budícími vinutími, takže liché harmonické se v rozdílu výstupních napětí na snímacím vinutí neuplatní. Sensory na tomto principu dosahují citlivosti až 0,1 nT a přesnosti asi 2,5% z rozsahu. Funkce směrové citlivosti má kosinový průběh s maximem na ose jádra. Citlivost ve směru kolmo k ose jádra může být až 10^5 krát menší. [7]

3.3 Magnetorezistivní senzory (magnetorezistory)

Elektrický odpor vodivých materiálů v pevné fázi je ovlivňován magnetickým polem prostřednictvím různých fyzikálních jevů. Jde především o Hallův jev, vyvolávající změny odporu úměrné $(vB)^2$, kde v je pohyblivost elektronů a B je magnetická indukce. U kovů je v zanedbatelné a Hallův jev se neprojeví. Dále se uplatňuje specifický ohyb pásem Fermiho plochy, tento účinek je rovněž úměrný B^2 a projevuje se výrazně u neferomagnetických materiálů. Třetím jevem je anizotropní magnetorezistence, spočívající v různém posuvu elektrických hladin pro elektrony s kladným a záporným spinem při

působení magnetického pole. Důsledkem je zmenšení rezistivity ρ ve směru vektoru magnetizace ve srovnání s hodnotou ρ v kolmém směru. [7]



Obr. 17 Podstata polovodičového magnetorezistoru převzato z [7]

Na keramickém substrátu magnetorezistoru je nanesena polovodičová vrstva InSb. Skutečností, že prodloužení drah proudu v důsledku Hallova jevu se projevuje více u krátkých destiček, se využívá ke zvýšení citlivosti magnetorezistoru. Kovové jehličky z NiSb, vykrystalizované ve vrstvě InSb, působí jako miniaturní destičky, v nichž jsou náboje vychylovány magnetickým polem v souladu s Hallovým jevem. Takto se při působení pole magnetické indukce B prodlužují proudové dráhy (Obr.17b) a výrazně se zvyšuje citlivost. [7]

Citlivost polovodičových magnetorezistorů k je obecně definován vztahem (21):

$$k = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{B} \quad (21)$$

Tento druh magnetorezistorů je pro své nevýhody (nelinearita, menší citlivost) postupně vytlačován feromagnetickými magnetorezistory.

Feromagnetické magnetorezistory jsou tvořeny tenkou vrstvou permalloye (NiFe) meandrovitého tvaru na nevodivém substrátu. Depozice vrstvy probíhá za působení magnetického pole. Odpor senzorů závisí na intenzitě H magnetického pole přibližně kvadraticky. [7]

$$R = R_{\min} + (R_{\max} - R_{\min}) \left[1 - \left(\frac{H}{H_s} \right)^2 \right] \quad (22)$$

R_{max}, R_{min} jsou maximální a minimální odpor senzoru, H_s je intenzita při nasycení. Relativní změna odporu $\frac{(R_{max} - R_{min})}{R_{min}}$ dosahuje typicky 2%. Zvýšení citlivosti až o dva řády se dosahuje umístěním vrstvy NiFe mezi další vrstvy permalloye působící jako koncentrátor pole. Senzor, koncentrátor pole se vyrábí jako integrovaný obvod, aby bylo možné senzor použít ve zpětnovazebném uspořádání, bývá jeho součástí také cívečka pro generaci kompenzačního pole vnějším proudem. Magnetorezistory tohoto typu lze použít i pro měření velmi slabých magnetických polí řádově 10^{-10} T. [7]

3.4 Senzory s větší citlivostí (NMR a SQUID)

Větších citlivostí lze dosáhnout senzory na principu nukleární magnetické rezonance (NMR) a zejména supravodivými prvky typu SQUID (Superconducting QUantum Interference Device).

Senzory NMR jsou založeny na precesním pohybu protonů, který nastává v přítomnosti magnetického pole. Rezonanční frekvence některých látek závisí lineárně na intenzitě magnetického pole. Vzorek látky je umístěn v cívce, napájené vysokofrekvenčním zdrojem, a rezonance se indikuje jako pokles výkonu zdroje způsobený absorpcí při rozmítání kmitočtu v daném pásmu rozsahu. Posuv rezonanční frekvence je např. u protonu H^1 roven $42,5776$ MHz/T. Měření magnetického pole pro aplikace v senzorech lze také použít nyní již méně běžných prvků, jako jsou magnetodiody a magnetotranzistory. Jejich činnost spočívá v řízení životnosti injektovaných nosičů náboje vnějším magnetickým polem. [7]

Tab. 3 Vlastnosti základních senzorů magnetického pole

Typ senzoru	Relativní rozměry	Rozsah měření [T]	Šířka pásma	Relativní cena
Hallův jev	malé	10^{-4} až 10^{-2}	velká	nízká
Magnetorezistory(MR)	malé	10^{-6} až $2,5 \cdot 10^{-2}$	velká	nízká
MR s koncentrátorem	malé	10^{-10} až $3 \cdot 10^{-4}$	velká	střední
Feromagnetická sonda	malé	10^{-10} až 10^{-2}	malá	střední
NMR	velké	10^{-11} až 10^{-2}	malá	vysoká
SQUID	velké	10^{-16} až 10^{-8}	velká	vysoká

4 NEJČASTĚJŠÍ ZDROJE STATICKÝCH A NÍZKOFREKVENČNÍCH ELEKTROMAGNETICKÝCH POLÍ

4.1 Statické pole

Intenzita těchto polí je nezávislá na čase a pokud se mění tak jen velmi pomalu. Tato pole bývají považována za složku (s frekvencí 0 Hz) elektromagnetických polí o extrémně nízkých frekvencích (ELF/EMF).

4.1.1 Přírodní statické elektrické pole

Statické elektrické pole měřené nad povrchem Země vzniká rozdílem nábojů ionosféry a Země, která je z tohoto hlediska považována za vodič. Od ionosféry je oddělena vrstvou vzduchu, jehož vodivost můžeme zanedbat. Intenzita tohoto pole je ve značné míře závislá jednak na vzdálenosti od povrchu Země (typická hodnota na povrchu je udávána $130 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$, 100 m nad povrchem je $100 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$, ve výšce 1000 m pak $45 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$) [3], dále závisí na vlastnostech vzduchu (vlhkost, teplota a složení – vliv má hlavně obsah vodivých iontů). Poměrně velké výkyvy způsobují rovněž klimatické jevy jako např. bouřka, kdy může lokálně dojít nejprve k nárůstu intenzity elektrického pole až na hodnotu $3 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ a následně až k jeho inverzi, která je taky časově omezená. Mlhy a dešťové srážky mohou způsobit odchylky od normální intenzity přírodního el. pole v rozmezí až 200%. [3]

4.1.2 Přírodní statické magnetické pole

Statické magnetické pole je způsobováno hlavně vnitřní stavbou Země. Díky elektrickým proudům vznikajícím v tekutém jádře se Země chová jako permanentní magnet s průměrnou intenzitou magnetického pole kolísající v závislosti na geografické poloze od $35 \mu\text{T}$ na rovníku po $70 \mu\text{T}$ na magnetických pólech. [3] Nerovnoměrné proudění kapalných složek jádra pak způsobuje fluktuace, jejichž rychlost je obvykle v řádu týdnů a intenzitou nepřesahující většinou několik procent z celkové intenzity magnetického pole Země. Součástí samotného procesu generace magnetického pole Země jsou i pomalejší, avšak intenzivnější změny, kdy může docházet až k téměř úplnému vymizení geomagnetického pole a jeho následnému přepólování. Periody těchto změn jsou v rámci statisíců let. Nejrychlejší změny

probíhají díky vnějším vlivům, hlavně slunečním erupcím, kdy dochází k interakci slunečního větru (proudu protonů) s horními vrstvami atmosféry, čímž dojde k fluktuaci zde vnikajících elektrických proudů, které ovlivňují geomagnetické pole Země. Celková intenzita takto indukovaných změn je ještě menší, než u změn vyvolaných nerovnoměrným prouděním tekutin v jádře, nedosahují ani $1 \mu\text{T}$. [3]

4.1.3 Antropogenní statické elektrické pole

Intenzivním zdrojem tohoto druhu pole jsou vedení stejnosměrného proudu, kdy přímo pod vedením vysokého napětí (500 kV) byla zjištěna hodnota statického elektrického pole přibližně $20 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$, což je téměř 200násobek přírodní hodnoty. Intenzita tohoto pole klesá se vzdáleností od zdroje (ve vzdálenosti 400 m je cca $2 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$, ve vzdálenosti 800 m je cca $1 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$) [3]. Pod 450 kV vedením byla pak naměřena průměrná intenzita $13,7 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ s maximální hodnotou $23,3 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$. [3] Vedení stejnosměrného proudu nejsou ale tak často používána, neboť zde dochází k mnohem větším ztrátám, než při vedení střídavého elektrického proudu. Dalším zdrojem statického elektrického pole jsou dopravní prostředky, využívající jako zdroj energie stejnosměrný proud. To se týká zejména metra, tramvají a vlaků, kdy ve vzdálenosti 5 m od 600 V vedení stejnosměrného proudu dosahuje intenzita elektrického pole cca $30 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ [3].

Významným zdrojem statického elektrického pole jsou díky svému poměrně velkému rozšíření v mnoha domácnostech elektrická zařízení používající stejnosměrný proud, mezi nimiž jsou nejvýznamnější emitory televizní obrazovky a PC monitory. Intenzita těchto zdrojů je velmi různorodá v závislosti na druhu spotřebiče a taky na okolních podmínkách – např. vlhkost ovzduší a uzemnění. Obvyklá hodnota intenzity el. statického pole ve vzdálenosti 5 cm od obrazovky je v rozpětí $100 - 300 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$, ve vzdálenosti 30 cm pak $10 - 20 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$. [3] Intenzitu tohoto pole lze velmi dobře zredukovat až na hodnotu několika $\text{kV}\cdot\text{m}^{-1}$ bezprostředně u obrazovky stíněním uzemněnou vodivou clonou.

Elektrický potenciál může být akumulován i chůzí po nevodivém povrchu a jeho velikost může dosáhnout až několika kilovoltů. Toto napětí pak generuje elektrické pole o intenzitě $10 - 500 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ [3].

4.1.4 Antropogenní statické magnetické pole

Nejčastěji je generováno spolu se statickým elektrickým polem, pořadí zdrojů co do intenzity je však odlišné. Nejvíce se na vzniku magnetického pole podílí doprava, konkrétně tramvaje, metra a elektrifikovaná železniční doprava. Typická hodnota indukce v místech pro cestující bývá mezi 30 – 60 μT , v závislosti na typu dopravního prostředku může být i vyšší (např. udává indukci u podlahy prostoru pro cestující v Londýnském metru 100 – 2000 μT). [3]

Veřejnost může být dále konfrontována se statickým magnetickým polem (SMF – static magnetic field) vznikajícím vedením stejnosměrného proudu, což ovšem není příliš běžné. Navíc generované pole je poměrně málo intenzivní - 22 μT pod 500 kV vedením. V domácnostech se statická magnetická pole vyskytují poměrně zřídka a většinou jen o nízké intenzitě. Zdroje mohou být běžně používané permanentní magnety, zde však klesá intenzita z uváděných 1 -10 mT uvnitř magnetu velmi rapidně se vzdáleností. Potencionální riziko expozice by mohly představovat magnety používané v blízkosti těla, tedy např. ty, které jsou v reproduktorech mobilních i pevných telefonů a sluchátek. Podle studie EC z roku 1996 může indukce na jejich povrchu nabývat hodnot 0,3 – 1 mT. Působení tohoto pole o intenzitě silně převyšující přírodní hodnoty jsou vystaveni pracovníci v některých odvětvích průmyslu. Jedná se zejména o výrobu hliníku, při které se používá stejnosměrný proud na elektrolýzu taveniny bauxitu a při které se generuje SMF o indukci až 100 mT, pracovníci jsou však podle dostupných měření průměrně vystavováni polím <20 mT. Podobné hodnoty jsou typické i pro jiné elektrolytické průmyslové procesy. Mezi další lidské činnosti, které tak jako průmysl generováním SMF ohrožují pouze určitou skupinu lidí, patří obecně metody, které SMF přímo využívají. Ve zdravotnictví je velmi rozšířeno zobrazování tkání magnetickou rezonancí (Magnetic Resonance Imaging – MRI). [3]

4.2 Nízkofrekvenční elektromagnetické pole

U tohoto druhu polí je rozsah frekvencí 0 až 300 Hz. Tato pole se označují jako ELF (Extremely Low Frequency) elektromagnetická pole (ELF/EMF).

4.2.1 Přírodní nízkofrekvenční elektromagnetická pole

Přírodní zdroje elektromagnetických polí s velmi nízkou frekvencí souvisí s výše popsanými způsoby alternace přírodních statických EMF. Jsou tedy dány hlavně stavbou Zemského jádra (fluktuační magnetického pole), nepravidelnostmi sluneční aktivity a lokálními klimatickými podmínkami (fluktuační elektrického pole). Vzhledem k velmi nízké frekvenci bývají považovány za statickou složku přírodních ELF/EMF s intenzitou elektrického a magnetického pole stejnou, jako u přírodních statických polí. Časově proměnná složka přírodního elektromagnetického pole pak obsahuje i rozmezí frekvencí 50 – 60 Hz, což je pásmo, kterému díky využívání elektřiny dominují antropogenní zdroje. V tomto rozmezí frekvencí je intenzita přírodního elektrického pole cca 10^{-4} V·m⁻¹ a magnetického pole průměrně 10^{-6} μ T. [3]

4.2.2 Antropogenní nízkofrekvenční elektromagnetická pole

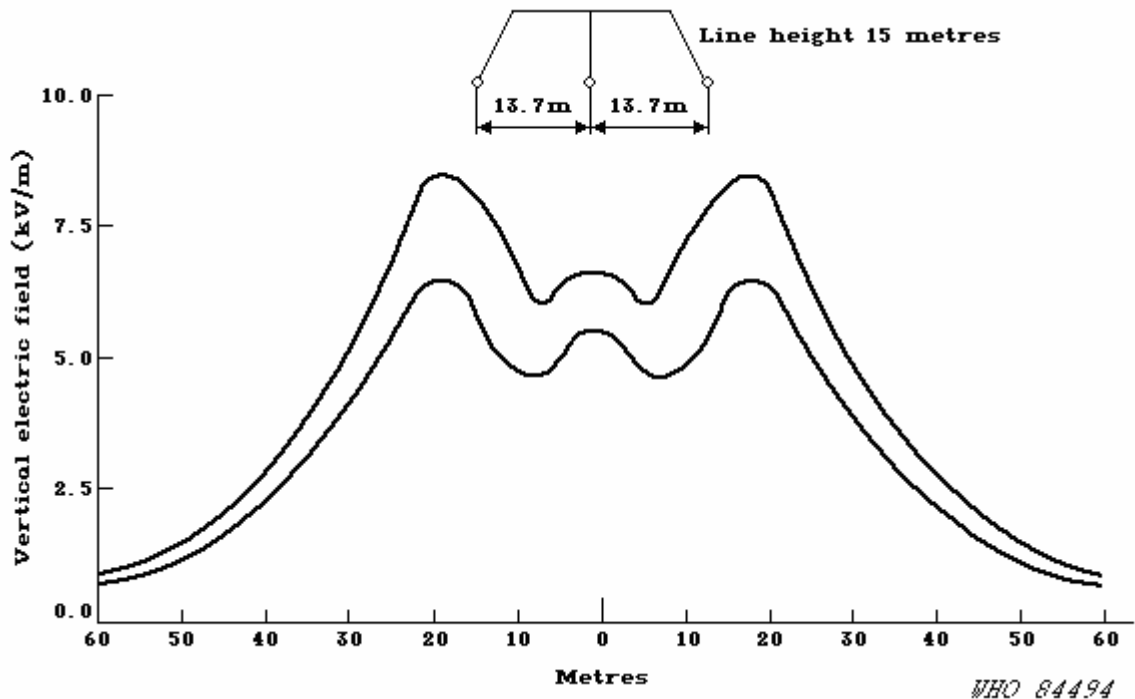
Tyto pole mají co do intenzity a rozšíření velkou převahu nad přírodními poli. Generují se hlavně při výrobě, transportu a využívání elektřiny, jejíž spotřeba v souvislosti se zvyšujícími se nároky na životní úroveň lidí neustále roste. Spolu s elektromagnetickými poli o radiové frekvenci jsou považovány za nejrozšířenější environmentální polutant, stávají se nevyhnutelnou součástí moderního životního stylu.

4.2.3 Elektrická složka antropogenních ELF/EMF

Jelikož intenzita těchto polí závisí přímo úměrně na napětí, pomocí kterého jsou indukována, je jasné, že nejintenzivnější zdroje ELF elektrických polí bude tzv. nadřazená přenosová soustava – tedy distribuční síť velmi vysokých napětí (v ČR 400 kV a 220 kV) - a obecně zařízení související s touto distribuční sítí, např. transformátory. Intenzita el. pole u zemského povrchu bezprostředně pod vodiči takto vysokých napětí nepřesahuje 10 kV/m, ve vzdálenosti 50 m pak klesá řádově na jednotky až desítky kV/m. Přesnější údaje jsou v tabulce Tab. 4. [3]

Tab. 4 Intenzita elektrického pole v blízkosti vedení vysokého napětí

Napětí vedení	E ve vzdálenosti 30 m [kV/m]	E ve vzdálenosti 60 m [kV/m]
115 kV	0,07	0,01
230 kV	0,3	0,05
500 kV	1,0	0,3

Obr. 18 Závislost intenzity elektrického pole na vzdálenosti od vedení 765 kV
převzato z [8]

Podmínky, které nejvíce ovlivňují intenzitu elektrického pole jsou kromě vzdálenosti od vodiče, také jeho výška nad povrchem, geometrie vodičů a napětí. Intenzita může být dále snižována pevnými překážkami, přírodními nebo např. zdmi domů. Díky tomu je intenzita takto generovaného pole uvnitř budov postavených v blízkosti vedení vysokého napětí o 1 až 2 řády nižší než venku.

Obecně se uvnitř budov elektrické pole o frekvenci 50/60 Hz generuje používáním různých druhů elektrických spotřebičů a přístrojů. Intenzita pole je různorodá a závisí na druhu přístroje a vzdálenosti od těla, průměrná hodnota intenzity elektrického pole v běžných domácnostech je 0 až 10 V/m. [3]

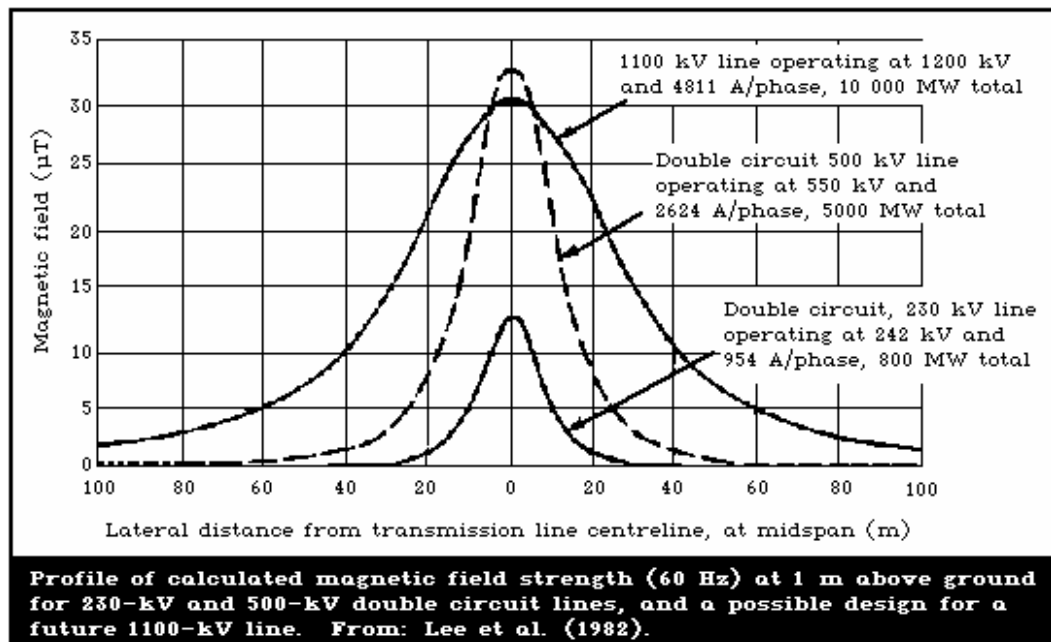
4.2.4 Magnetická složka antropogenních ELF/EMF

Je považována za tu složku ELF/EMF, která může mít negativní dopady na lidské zdraví, proto je jí ve většině studií, zabývajících se dopady distribuce a používání elektřiny věnována větší pozornost než elektrickému poli. Jeho nejintenzivnější zdroje jsou jako u elektrického pole vedení velmi vysokého napětí, přičemž hlavní směr šíření je kolmo na osu vodiče. Maximální hodnota indukce závisí na velikosti protékajícího proudu (udává se cca 0,1 mT/kA) a podobně jako u elektrického pole na geometrii a vzájemné poloze vodičů, kdy magnetické pole klesá při snižování horizontální vzdálenosti mezi dvěma vodiči s opačným průběhem proudu. Průměrné hodnoty indukce magnetického pole v okolí vedení velmi vysokého napětí udává Tab.5:

Tab. 5 Indukce magnetického pole pro vybrané vzdálenosti od vedení vysokého napětí z [8]

Napětí vedení	B ve vzdálenosti 30 m [μ T]	B ve vzdálenosti 60 m [μ T]
115 kV	0,17	0,04
230 kV	0,71	0,18
500 kV	1,26	0,32

Tvar závislosti indukce magnetického pole na laterální vzdálenosti od vodiče je zřejmý z Obr. 19.



Obr. 19 Závislost magnetické indukce na vzdálenosti od vedení vysokého napětí
 převzato z [3]

Magnetická pole indukovaná vedením vysokého napětí se díky své prostupnosti většinou materiálů podílí i na celkové expozici v domácnostech či na pracovištích. Podle měření z r.1993 je průměrná hodnota magnetického pole v domácnosti (měřeno v USA) $0,09 \mu\text{T}$, přičemž v 50% domácností nepřekročila indukce $0,06 \mu\text{T}$ a v 1% domácností byla větší než $0,66 \mu\text{T}$. [8] Tyto hodnoty byly zjišťovány při vypnutých elektrospotřebičích, zahrnují tedy především magnetická pole vzniklá distribucí elektrické energie. Používáním elektrických zařízení pak vznikají pole, jejichž intenzita může významně překročit daný průměr - viz Tab.6. Uvedené hodnoty platí pro vzdálenost několika centimetrů od přístrojů.

Tab. 6 Velikost magnetického pole indukovaného běžnými el. spotřebiči z [8]

60 Hz magnetické pole o průměrné indukci:			
0,01 až 0,1 mT	0,01 až 0,5 mT	0,5 až 1,0 mT	1,0 až 2,5 mT
Drtič odpadků	Barevná televize	El. otvírák konzerv	325 wattová pájka
Sušička na prádlo	Kuchyňský mixér	Kuchyňský sporák	Fén
Vysavač	Vrtačka	El. Holící strojek	
El. topinkovač		Stolní zářivka	

5 ÚVOD DO PROBLEMATIKY ELEKTROMAGNETICKÉ KOMPATIBILITY

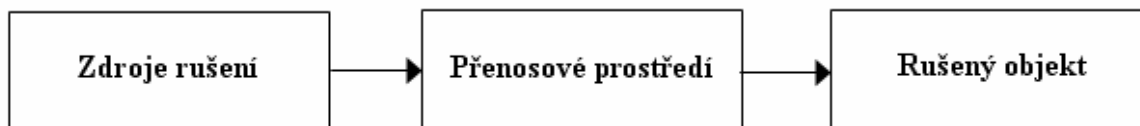
Elektromagnetická kompatibilita (EMC) neboli slučitelnost je schopnost systému, zařízení či přístroje vykazovat správnou činnost i v prostředí, v němž působí jiné zdroje elektromagnetických signálů (ať už přírodní či umělé), a naopak svou vlastní „elektromagnetickou činností“ nepřístupně neovlivňovat své okolí, tzn. nevyzařovat signály, jež by byly rušivé pro jiná zařízení. [9]

5.1 Elektromagnetická kompatibilita biologických systémů

EMC biologických systémů se zabývá celkovým „elektromagnetickým pozadím“ našeho životního prostředí a přípustnými úrovněmi rušivých i užitečných elektromagnetických signálů s ohledem na jejich vlivy na živé organismy. I když tyto vlivy jsou pozorovány již delší dobu, mnohé názory v této oblasti nejsou jednoznačné. Biologické účinky elektromagnetického pole závisí totiž na jeho charakteru, době působení i na vlastnostech organismu. Protože nejsou známy receptory na vnímání elektromagnetického pole (tj. vstupy elektromagnetického pole do organismu), posuzují se tyto účinky jen podle nespecifických reakcí organismu. [9]

5.2 Elektromagnetická kompatibilita technických systémů

Zabývá se koexistencí a působením technických prostředků jako např. elektrotechnických zařízení, elektronických přístrojů, výpočetní a komunikační a měřicí techniky. Principy a návrhy EMC lze chápat jako praktickou aplikaci obecných principů elektrotechniky a elektroniky pro danou situaci.



Obr. 20 Základní řetězec EMC převzato z [1]

Každé zařízení nebo systém může ale být současně zdrojem rušení i rušeným objektem. Objekty, které jsou však méně citlivé na rušení a spíše generují větší úroveň rušení můžeme označit jako **zdroje rušení**. Naopak objekty, které jsou velmi citlivé na rušení a rušení jiných zařízení téměř nezpůsobují můžeme označit jako **rušené objekty**.

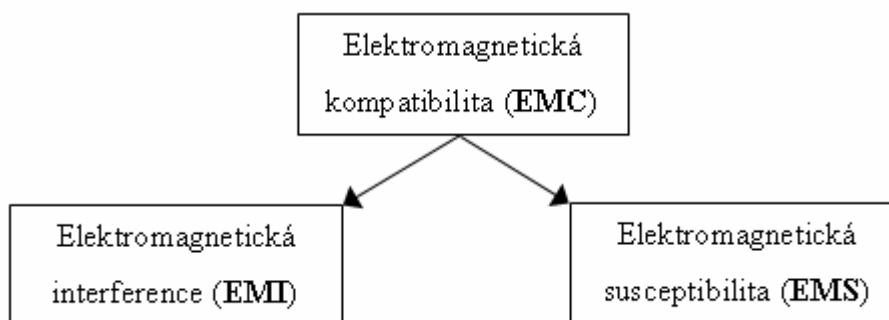
Tab. 7 Příklady ze základního řetězce EMC z [1]

Zdroje elektromag. rušení	Přenosová prostředí	Rušený objekt
Motory	Energetické kabely	Číslicová technika
Spínače	Napájecí vedení	Počítače
Relé	Zemnění	Měřicí přístroje
Energetické rozvody	Stínění	Telekomunikační systémy

V praxi nikdy nedosáhneme, aby systém byl absolutně kompatibilní, tomuto stavu se však chceme co nejvíce přiblížit. A to tou nejjednodušší nebo nejlevnější cestou, kterou zároveň dosáhneme nejvyššího efektu EMC. Upravují se tedy vlastnosti zdroje rušení, přenosového prostředí i objektu citlivého na rušení. [1]

5.3 Základní rozdělení problematiky EMC

Problematika EMC se člení do dvou základních skupin: **elektromagnetická interference** (rušení) a **elektromagnetická susceptibilita** (odolnost).



Obr. 21 Základní členění problematiky EMC převzato z [1]

5.3.1 Elektromagnetická interference (EMI)

EMI je proces, ve kterém se signál generovaný zdrojem rušení přenáší prostřednictvím elektromagnetické vazby do rušených objektů. Elektromagnetická vazba je způsob i cesta, kterou energie ze zdroje rušení přechází do rušených objektů. EMI se hlavně zabývá identifikací hlavních zdrojů rušení, jejich popisem a měřením. Kompatibility se zde dosahuje technickými opatřeními na zdrojích rušení. **EMI se tedy snaží odstranit příčiny rušení.[1]**

5.3.2 Elektromagnetická susceptibilita (EMS)

EMS je vlastnost zařízení či systému pracovat bez poruch nebo s přesně definovaným přípustným vlivem v daném prostředí. EMS se zabývá technickými opatřeními na objektu (přijímači rušení), které zvyšují jeho odolnost vůči vlivu různých zdrojů rušení. **EMS se zabývá odstraňováním důsledků rušení, bez odstraňování jeho příčin. [1]**

5.4 Frekvenční rozsah zdrojů rušivých signálů

Rušivé signály můžeme na základě jejich frekvence rozdělit na nízkofrekvenční a vysokofrekvenční. Nás budou zajímat převážně nízkofrekvenční, které se dále dělí na energetické a akustické.

Tab. 8 Kmitočtové spektrum některých zdrojů rušení z [9]

Zdroj rušivých signálů	Kmitočtové pásmo	Způsob šíření rušivého signálu
Zářivka	0,1 Hz ÷ 3 MHz 100 Hz ÷ 3 MHz	po vedení prostorem
rtuťová výbojka	0,1 Hz ÷ 1 MHz	po vedení
kolektorové motory	2 Hz ÷ 4 MHz 10 Hz ÷ 400 kHz	po vedení prostorem
síťové vypínače	0,5 Hz ÷ 25 MHz	po vedení
výkonové spínače	10 Hz ÷ 20 MHz 0,1 Hz ÷ 20 MHz	po vedení prostorem
spínané síťové zdroje	0,1 Hz ÷ 30 MHz 0,1 Hz ÷ 30 MHz	po vedení prostorem
korónový výboj	0,1 Hz ÷ 10 MHz	po vedení
klopné obvody	15 kHz ÷ 400 MHz	prostorem

Z obecného hlediska se z každého interferenčního zdroje šíří rušivý signál jak vyzářováním (prostorem), tak i po napájecích či sdělovacích vedeních. U různých zdrojů rušení však obvykle jeden z těchto způsobů šíření převažuje, a proto se interferenční zdroje někdy rozdělují na zdroje rušení šířených vedením a na zdroje rušení šířených vyzářováním (prostorem). [9]

5.4.1 Nízkofrekvenční rušení - energetické

Energetické nízkofrekvenční rušení působí na napájecí energetickou soustavu v pásmu kmitočtů od nuly do 2 kHz a způsobuje hlavně zkreslení (deformaci) napájecího napětí a odebíraného proudu energetických sítí. To se projevuje rušivě v provozu zařízení, která jsou závislá na tvaru křivky napájecího elektrického napětí, jako jsou např. ovládací a sdělovací systémy, osvětlení, stroje a přístroje a další. Zdrojem energetického rušení je obecně každá nelineární zátěž napájecí sítě způsobující deformaci odebíraného proudu.[9]

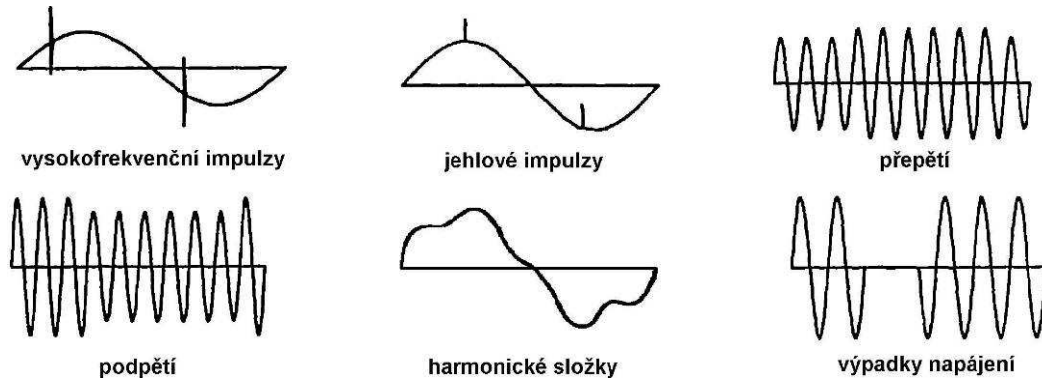
5.4.2 Nízkofrekvenční rušení – akustické

Akustické nízkofrekvenční rušení působí v pásmu do 10 kHz, kde negativně ovlivňuje funkci přenosových informačních systémů jako jsou telefony, rozhlas, měřicí a řídicí zařízení, komunikační a informační soustavy apod. Toto rušení generují prakticky všechny energetické zdroje, dále systémy číslicového přenosu dat, radary apod.[9]

5.5 Průmyslové zdroje rušení

Z periodických spojitých rušivých signálů jsou nejdůležitější harmonické složky kmitočtu napájecí sítě 50 Hz, které jsou často produkovány již samotnými generátory při výrobě elektrické energie. Takto vzniklé harmonické složky vyvolávají na nelineárních impedancích sítě (např. na transformátorech s nelineární magnetickou charakteristikou) vznik dalších harmonických složek. Největšími průmyslovými zdroji tohoto rušení jsou řízené polovodičové měniče velkých výkonů, které produkují v napájecí síti harmonické kmitočty až do 30 MHz. [9]

Rušivá napětí v napájecí energetické síti mají řadu podob a projevují se různými způsoby deformace harmonického napájecího napětí 50 Hz. Typické případy jsou uvedeny na Obr. 22.



Obr. 22 Typické projevy rušivých signálů v síťovém napájecím napětí převzato z [9]

5.5.1 Přechodové jevy vzniklé spínáním a rozpínáním

V napájecích energetických sítích se vyskytuje řada přechodových jevů (a tím i rušivých napětí) spojených se spínacími nebo rozpínacími pochody mechanických či elektrických spínačů. V sítích vysokého a velmi vysokého napětí dochází k vysokofrekvenčním oscilacím při zapínání vlivem kapacity a indukčnosti spínaných vedení. Tlumené oscilace s kmitočtem do několika MHz dosahují velikosti několika tisíc V a trvají obvykle pěti až desetinásobek doby své periody. Pro svůj vysoký kmitočet se tyto oscilace kapacitními vazbami snadno šíří až do sítí nízkého napětí. [9]

Další typ rušení vzniká v napájecích sítích nízkého napětí při činnosti stykačů a jističů, případně mechanických relé. Při přechodovém jevu rozpojování obvodu obsahujícího indukčnost dochází v okamžiku rozpojení kontaktů k rychlé změně (přerušení) proudu di/dt a tím vzniku vysokého rušivého napětí u , které leží prakticky celé mezi oběma kontakty spínače.

Mezi kontakty tak vznikne obloukový výboj a napětí na kontaktech klesne skokem k nule. Tím výboj zhasne a mezi kontakty opět začíná narůstat napětí. Pokud jeho velikost opět překročí průraznou pevnost vzduchu mezi vzdalujícími se kontakty spínače (to záleží na velikosti rozpojovaného napětí, na rychlosti vzdalování se kontaktů spínače i na velikosti indukčnosti obvodu), oblouk mezi

kontakty se opět zapálí a celý děj se může několikrát opakovat. Na rozpojovaných kontaktech tak vznikají velmi strmé impulzy s krátkou náběžnou hranou jen několika ns, ale s napětím až několika kV. Vznikající pilovitý průběh napětí se opakuje s kmitočtem několika kHz, až při dostatečně otevřených kontaktech spínače se ustálí na provozní hodnotě odpojovaného napětí v obvodu. Podobné procesy vznikají rovněž při spínání obvodů obsahujících indukčnost. Opět zde dochází k opakovanému vzniku obloukového výboje mezi přibližujícími se kontakty spínače a tím ke vzniku přepětového přechodného jevu pilovitého průběhu. Vzhledem k odlišným počátečním podmínkám je však velikost vznikajících impulzů menší. Pro rychle po sobě jdoucí ostré impulzní poruchy generované ve skupinách po větších časových intervalech (např. při každém rozpojení a spojení stykače) se v angličtině používá výstižný název „burst“. [9]

Přepětové impulzy lze odstranit, zajistíme-li pomalejší nárůst napětí mezi kontakty spínače, aby jeho velikost nepřesáhla ani při ne zcela rozevřených kontaktech průraznou pevnost vzduchu. Toho lze dosáhnout např. překlenutím kontaktů sériovým obvodem RC. Tato kombinace má však pro střídavý proud konečnou impedanci, takže odpojení zařízení od sítě není dokonalé. To bývá na závadu z bezpečnostních důvodů. Uvedené rušení se dá rovněž omezit použitím standardních přepětových ochran příp. užitím bezkontaktních elektronických spínačů, např. tyristorů či triaků – avšak za cenu vzniku jiných rušivých jevů.

Dalším zdrojem poruch mohou být tzv. spínané síťové zdroje, u nichž se síťové napětí 50 Hz transformuje na požadované (obvykle nižší) stejnosměrné napětí prostřednictvím pomocného harmonického napětí s kmitočtem řádu až stovek kHz. Tím se výrazně zmenší rozměry potřebných transformátorů a zvýší se účinnost celého zdroje, což je ovšem zapláceno výrazným vyzařováním širokého spektra rušivých kmitočtů, které se navíc mění se změnami odběru v důsledku regulace výstupního napětí pulzní šířkovou modulací. Tyto napájecí zdroje se používají hlavně pro napájení počítačů, ale i řady dalších zařízení spotřební elektroniky. [9]

5.5.2 Venkovní energetická vedení

Značně silné rušící účinky vykazují venkovní energetická vedení vysokého (vn) a velmi vysokého (vvn) napětí. Patří k těm zdrojům rušení, která se obtížně vyhledávají a ještě obtížněji odstraňují. Produkované rušivé spektrum sahá od několika kHz až k 1000 MHz, takže může negativně ovlivnit provoz prakticky jakékoli radiokomunikační služby. Zdrojem rušivých signálů vedení vn a vvn jsou výboje dvojího druhu. Korónové výboje vznikají jen u vedení velmi vysokého napětí (110 kV a více) na nerovnostech vodičů, na armaturách a zařízeních rozvodn. Koróna se podobá doutnavému výboji a její spektrální složky nepřesahují 10 MHz. Velikost výbojů se zvyšuje za vlhka (projevuje se jako intenzivní slyšitelný praskot pod vedením vvn). Intenzita rušivého pole koronového výboje však není příliš velká, takže jeho nežádoucí vlivy lze omezit především tím, že venkovní linky vvn vedou mimo obytná území. Kapacitní výboje jsou typické pro vedení vysokého napětí 22 kV, kde vznikají na nedokonalém spojení kovových předmětů, které se nacházejí v těsné blízkosti částí vedení pod napětím. Takovými místy jsou především kovové kloubové spoje závěsných izolátorů, u nichž se v důsledku koroze vytvoří izolační vrstvička a dielektricky se oddělí kovové části kloubového spoje. Po překročení dielektrické pevnosti této vrstvičky či při jejím mechanickém narušení (např. při kývání izolátoru ve větru) dojde k jiskrovému výboji. Vznikající kmitočtové spektrum sahá až k 1000 MHz a rušivý signál se „dobře“ vyzařuje částmi armatur i vlastním vn vedením. Za suchého počasí bývá toto rušení větší, za vlhka někdy i zcela vymizí. [9]

6 BIOLOGICKÉ DOPADY A ÚČINKY NEIONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ

Vlivu elektromagnetických polí a záření na přístroje a zařízení se věnuje obor elektromagnetická kompatibilita (EMC), jejímž podoborem je i EMC biologických systémů, která se zabývá úrovněmi rušivých i užitečných elektromagnetických signálů s ohledem na jejich vlivy na živé organismy. [9]

Termínem neionizující záření se označuje kromě vlastního elektromagnetického záření s frekvencí do $1,7 \cdot 10^{15}$ Hz i **statická a nízkofrekvenční elektrická a magnetická pole**. Elektromagnetické záření s frekvencí vyšší než $1,7 \cdot 10^{15}$ Hz patří k záření ionizujícímu, schopnému oddělit od elektricky neutrálního atomu elektron. I když všechny elektromagnetické jevy mají stejnou fyzikální podstatu, jejich působení na živou tkáň je velmi rozdílné podle toho, jakou mají frekvenci. Stejně podstatně se liší i rizika spojená s expozicí člověka elektromagnetickému poli různých frekvencí. [10]

Tab. 9 Přehled elektromagnetického záření a elektrických a magnetických polí z [10]

korpuskulární α , β ; kosmické záření – protony, mezony; (radioaktivní rozpad; urychlené částice)	ionizující	Rychlé částice	
diagnostika, terapie, stopování pomocí radioizotopů			záření γ rentgenové záření
slunce; umělé zdroje	ultrafialové záření (1,7 PHz)		Elektromagnetické záření
Všude	viditelné záření infračervené (tepelné) záření		
radar, ohřev, spoje, družice, přenos dat	milimetrové vlny centimetrové vlny		
Televize, mobilní telefony	decimetrové vlny		
VKV (FM) rozhlas	metrové vlny		
krátkovlnný rozhlas; vysokofrekvenční ohřev	desetimetrové až stometrové vlny		
AM rozhlas	střední a dlouhé rozhlasové vlny		
speciální komunikace, geofyzikální průzkum	velmi dlouhé vlny (VDV)		
slaboproudá zařízení, monitory	pole s frekvencemi vyššími než 30 kHz	Elektrické a magnetické pole	
technická zařízení, indukční ohřev, tramvaj	nízkofrekvenční pole (50 Hz – 30 kHz)		
transformátory, síťový rozvod, spotřebiče	elektrická a magnetická pole s frekvencí energetické sítě (50 Hz)		
tramvaje, metro	velmi pomalu proměnná pole		
geomagnetické pole, atmosférická elektřina, technické zdroje	statické elektrické a magnetické pole (0 Hz)		

6.1 Biologické vlivy elektromagnetického pole na tkáň

V roce 1998 publikovala komise ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, Mezinárodní komise pro ochranu před neionizujícím zářením) směrnice, ke kterým dala WHO (World Health Organization, Světová zdravotnická organizace) explicitní prohlášení, že jejich dodržování pokládá za dostatečnou ochranu zdraví. Před stanovením hygienických limitů pro elektromagnetická pole a záření vyhodnotila komise ICNIRP téměř dvacet tisíc odborných publikací a výzkumných zpráv týkajících se vlivu elektromagnetického záření na biologické objekty a velký počet z nich odmítla jako neprůkazné nebo vůbec chybné. Členové komise ICNIRP průběžně sledují výzkumné práce mající vztah k působení elektromagnetických polí na biologické objekty a v případě potřeby jsou připraveni limity změnit. Nezávislá komise ICNIRP tedy na základě vyhodnocení odborných publikací, výzkumných zpráv, ve kterých se objevují také výsledky pokusů jak na hlodavcích, primátech, tak i skupinách dobrovolníků, popisuje následující fyzikální účinky elektromagnetických polí. [10]

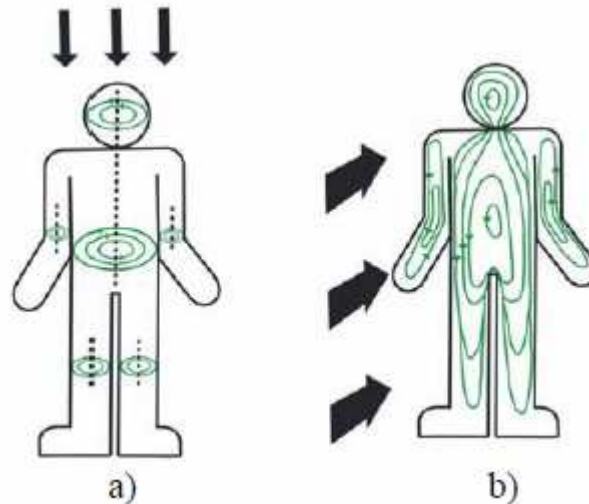
6.1.1 Fyzikální účinky elektrických polí

Živá tkáň je poměrně dobrý vodič a tak elektrické pole neproniká do hloubky, a ke vzniku (indukci) proudů dochází převážně v místech těsně pod povrchem tkáně. Prokazatelné biologické účinky takto indukovaného proudu jsou minimální vzhledem k velmi malé prostupnosti elektrického pole živou tkání. Aby se uvnitř tkáně indukoval proud o proudové hustotě dostatečné ke stimulaci periferních nervů, byl by zapotřebí buď přímý kontakt se zdrojem elektrické energie nebo elektrické pole o intenzitě řádově 100 kV/m [3].

6.1.2 Fyzikální účinky magnetických polí

Podle Faradayova zákona vzniká v biologické tkáni elektrické pole. To způsobuje vznik indukovaných proudů. Velikost indukovaných proudů závisí na poloměru proudových smyček, konduktivitě tkáně a míře změny a velikosti proudové hustoty. Přesná cesta a velikost proudu (v jakékoliv části těla) bude záviset na elektrické konduktivitě tkáně. Tělo není elektricky homogenní, přesto mohou být indukované hustoty proudu vypočteny na základě anatomických a elektrických modelů těla a výpočetních metod, které mají vysoký stupeň

anatomického rozlišení. Díky ztrátovému prostředí biologické tkáně způsobují indukované proudy také tepelné účinky. Na Obr. 23a jsou znázorněny proudové smyčky v těle při svislém vektoru střídavého magnetického pole a na Obr. 23b pak při vodorovném vektoru magnetického pole směřujícím proti hrudníku. [10]



Obr. 23 Uzavírání proudových smyček v těle převzato z [10]

Z popisu působení elektromagnetických polí vyplývá, že existují pouze dva přímé biologické účinky:

- **ohřívání tkáně těla při absorpci elektromagnetického záření o vyšších frekvencích.**
- **působení elektrických proudů indukovaných v těle proměnným magnetickým a elektrickým polem.**

6.1.3 Dozimetrické veličiny popisující elektromagnetické pole a záření

Protože jediné prokázané účinky elektromagnetických polí a záření jsou ohřev tkáně a indukované proudy, byly stanoveny 2 dozimetrické veličiny pro posouzení expozičních situací:

- proudová hustota (J).
- měrný absorbovaný výkon (SAR).

6.2 Epidemiologické studie a bezpečnostní faktory

6.2.1 Měrný absorbovaný výkon

Základní limity stanovené ve směrnici ICNIRP vycházejí z experimentálně dobře ověřených a kvantifikovaných krátkodobých účinků elektromagnetických polí a záření. Dostupné experimentální důkazy naznačují, že expozice lidí v klidovém stavu po dobu 30 minut elektromagnetickým polím, které produkují celotělový SAR mezi 1 až 4 W/kg má za následek vzrůst teploty o méně než 1°C. Zjistilo se, že tělesná teplota se při stálém dopadání dostatečně silné elektromagnetické vlny na tělo z počátku zvyšuje, přibližně po šesti minutách však stoupat přestane a ustálí se na nové, poněkud vyšší hodnotě. Výsledná data z pokusů na zvířatech ukazují stejné výsledky. Bylo zjištěno, že expozice intenzivnějším polím, překračujícím 4 W/kg, mohou velmi nepříznivě ovlivnit termoregulační schopnosti těla a vést k nebezpečnému přehřátí těla. Mnohé laboratorní studie na hlodavcích a na primátech demonstrovaly velký rozsah poškození tkáně, ke kterému došlo při lokálnímu nebo celotělovému ozáření a následného vzrůstu teploty o více než 1 až 2°C. Údaje o lidské reakci na vysokofrekvenční zdroje byly získány z kontrolované expozice dobrovolníků a epidemiologických studií zaměstnanců, tedy lidí, kteří se profesně setkávají se zařízeními jako radar atd. Plně to podporuje závěry, které se zjistily při laboratorních pokusech. A sice, že nepříznivými vlivy mohou být jen vlivy tepelné, a to při růstu teploty o více než 1°C. Citlivost různých druhů tkání na teplotní poškození je velmi rozmanitá, ale i v těch nejcitlivějších případech je hranice pro expozici větší než 4 W. Laboratorní data i výsledky studií na dobrovolnících jasně ukazují, že prostředí, které je teplotně stresující, a užívání drog a alkoholu mohou ohrozit termoregulační schopnosti těla. Z tohoto důvodu byly zavedeny bezpečnostní faktory, jež poskytují ochranu i těmto lidem a obecně vytváří bezpečnou zónu pro případné započítání nejistot v informacích a ke zvýšení důvěryhodnosti, že limity jsou pod úrovněmi, při kterých se objevují nepříznivé vlivy. [10]

6.2.2 Bezpečnostní faktory

Bezpečnostní faktor je číslo, které vypovídá, kolikrát je daná hodnota snížena oproti hodnotě, při které již nedochází k negativním účinkům na zdraví. Typickými bezpečnostními faktory jsou faktory 10 a 50. Celotělový průměr SAR 4 W/kg je považován jako práh, pod kterým nejsou očekávány nepříznivé vlivy. K ujištění hranice bezpečnosti je SAR práh zredukován díky bezpečnostním faktorům 10 a 50 na základní omezení 0,4 W/kg pro zaměstnance a 0,08 W/kg pro ostatní obyvatelstvo. [10]

6.2.3 Proudová hustota

Pro nízké frekvence bylo experimentálně a následně na skupinách dobrovolníků, kteří se sami označovali za velmi citlivé, zjištěno, že podráždění nervové soustavy, které tito citliví jedinci zaznamenali, a tudíž možná zdravotní rizika nastávají při proudové hustotě J vyšší než $0,1 \text{ A/m}^2$.

Pro působení indukovaných elektrických proudů je podstatné, že pro frekvence vyšší než 1 kHz jejich účinnost s rostoucí frekvencí strmě klesá.

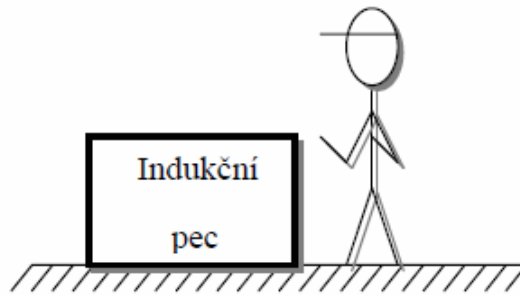
Nejvyšší přípustná hodnota J pro zaměstnance byla díky bezpečnostním faktorům snížena na $0,01 \text{ A/m}^2$ a pro ostatní obyvatelstvo ještě na 5krát nižší hodnotu $0,002 \text{ A/m}^2$. [10]

6.3 Druhy šíření neionizujícího záření

Stejně jako u EMC i při působení elektromagnetického pole a záření na člověka můžeme mechanismy šíření rozdělit na 4 druhy vazeb. Vlastnosti šíření jsou pak obdobné.

6.3.1 Induktivní vazba

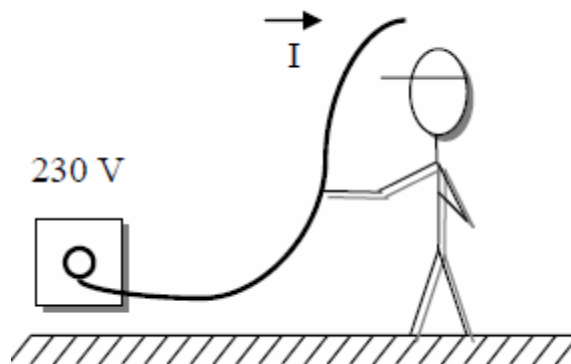
Induktivní vazba vzniká na základě principu elektromagnetické indukce mezi zdrojem rušení a člověkem. Typickým příkladem induktivní vazby je pobyt člověka v těsné blízkosti silného zdroje elektromagnetického pole (Obr.24). [10]



Obr. 24 Induktivní vazba při působení elektromagnetického pole na biologické systémy

6.3.2 Galvanická vazba

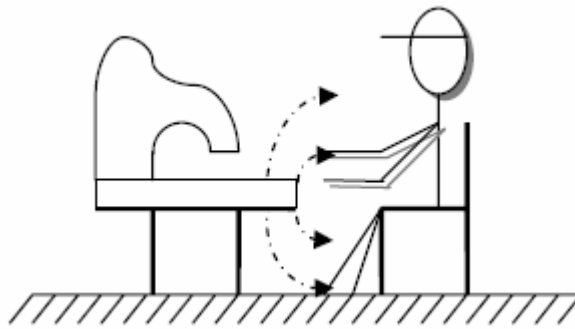
U galvanické vazby se jedná o přímý kontakt s proudovým polem. Jedná se o vodivostní konvekční proud (Obr.25). [10]



Obr. 25 Galvanická vazba při působení elektromagnetického pole na biologické systémy

6.3.3 Kapacitní vazba

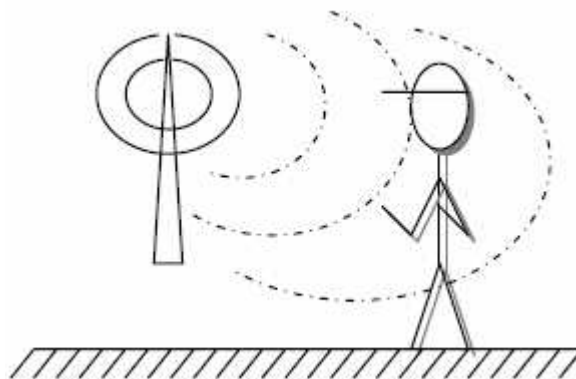
Kapacitní vazba vzniká přítomností člověka v elektrickém poli. V těle je vyvolán posuvný proud způsobený časovou změnou elektrické indukce, kterou vyvolal náboj, v jehož blízkosti se člověk nachází. Příkladem mohou být technologické zdroje – svářečky (Obr.26). [10]



Obr. 26 Kapacitní vazba při působení elektromagnetického pole na biologické systémy

6.3.4 Vazba vyzařováním

Parazitní vazba vyzařováním elektromagnetického pole vzniká mezi zdrojem rušení a člověkem v těch případech, kdy je vzhledem k velkým vzdálenostem vyloučena vazba indukční a kapacitní. Typickým příkladem je pobyt člověka v blízkosti antény (Obr.27). [10]



Obr. 27 Vazba vyzařováním při působení elektromagnetického pole na biologické systémy

6.4 Vládní nařízení č. 1/2008 Sb.

Podle nařízení vlády musí být expozice elektrickým nebo magnetickým polem a elektromagnetickým zářením s frekvencí od 0 Hz do 300 GHz omezena tak, aby:

- **proudová hustota (J) indukovaná v těle,**
- **měrný absorbovaný výkon (SAR) a měrná absorbovaná energie (SA),**
- **hustota zářivého toku elektromagnetické vlny (S) z intervalu frekvencí od 10 GHz do 300 GHz, dopadající na tělo nebo na jeho část**

nepřekročily nejvyšší přípustné hodnoty viz Příloha č.1.

6.4.1 Referenční hodnoty a nejvyšší přípustné hodnoty

Nejvyšší přípustné hodnoty jsou hodnotami uvnitř tkáně a přímé zjištění je u nich obtížné. Z tohoto důvodu byly odvozeny referenční úrovně, které jsou určeny tak, aby při jejich nepřekročení nemohly být za žádných okolností překročeny nejvyšší přípustné hodnoty a které se již měří relativně snadno. Referenční úrovně jsou obecně získány ze základního omezení matematickým modelováním a laboratorními experimenty na specifických kmitočtech. A jsou určeny s bezpečnostním faktorem, který zohledňuje nepřesnost měření či výpočtu. [10]

Referenční úrovně byly stanoveny pro:

- Intenzitu elektrického pole (E).
- Intenzitu magnetického pole (H), magnetickou indukci (B).
- Hustotu zářivého toku (S).

Tento způsob hodnocení umožňuje bez náročných výpočtů nebo měření rychle rozhodnout o nepřekročení nejvyšších přípustných hodnot, tam kde nejsou překročeny referenční hodnoty.

Jestliže naměřená nebo vypočtená hodnota překračuje referenční úroveň, nemusí z toho nutně vyplývat, že jsou překročeny také nejvyšší přípustné hodnoty. V takovém případě jsou nezbytné podrobnější metody hodnocení, které jsou specifické pro daný typ zařízení a expozici.

Frekvenční závislosti referenčních hodnot jsou složitější než závislosti nejvyšších přípustných hodnot. Je to proto, že při stanovení referenčních hodnot bylo nutné brát v úvahu hloubku pronikání záření (pole) do tkáně a současné působení ohřívání těla a indukovaných proudů. [10]

Tab. 10 Referenční úrovně limitů expozice elektrických a magnetických střídavých polí

Evropský průmyslový kmitočet 50 Hz		
	elektrické pole	magnetické pole
	kV/m	μT
Limit expozice obyvatelstva	5	100
Limit profesionální expozice	10	500

6.5 Normy v ČR zabývající se ELF/EMF v prostředí člověka

Metodiku hodnocení vyzařování elektromagnetického pole přístrojů a zařízení (výrobků) v souvislosti s expozicí člověka elektromagnetickému záření předepisují normy skupiny 3679:

ČSN EN 50 364 - Omezení vystavení člověka elektromagnetickým polím ze zařízení pracujících v kmitočtovém rozsahu 0 Hz až 10 GHz, používaných při elektronické ochraně zboží (EAS), vysokofrekvenční identifikaci (RFID) a podobných aplikacích, vydána 1.6. 2002.

Předmětem normy je prokazovat shodu zařízení používaných při EAS, RDIF a podobných aplikací se základními omezeními z hlediska vystavení člověka elektromagnetickým polím v kmitočtovém rozsahu 0 Hz – 10 GHz.

Normy vycházejí ze směrnic ICNIRP a jimi stanovených nejvyšších přípustných hodnot pro expozici člověka neionizujícímu elektromagnetickému poli a záření. [10]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 ZAŘÍZENÍ PRO MODELOVÉ MĚŘENÍ MAGNETICKÉHO POLE

Použité technické řešení je realizováno pro modelové měření magnetického pole generovaného v Helmholtzových cívkách s dalším využitím při výuce a při studiu magnetického pole. [11]

7.1 Dosavadní stav techniky

Při výuce magnetického pole ve fyzice a nebo při jeho studiu, případně při výzkumu souvisejících problémů je jednak požadavkem generovat homogenní magnetické pole a také zajistit jeho správné měření. Velkým nedostatkem dnešní výuky je, že nepoužívá názorných pomůcek. Týká se to jak části generování magnetického pole stejnosměrného i střídavého o proměnné indukci, tak části měření hodnoty magnetické indukce pro stejnosměrné i střídavé magnetické pole. [11]

Hlavní nevýhodou současného stavu je skutečnost, že se nepoužívají jednoduché a názorné prostředky, které odpovídají současnému stavu techniky a vědy. Tyto nedostatky způsobují problémy s nepochopením výukové látky studenty nedostatkem názornosti a možnosti samostatné práce s modelem. Omezená dostupnost modelů je velké části také způsobena cenovými relacemi a následnou nedostupností zařízení. [11]

7.2 Podstata technického řešení

Výše uvedené nedostatky a nevýhody uvedených připravovaných řešení do značné míry odstraňuje zařízení pro modelové měření magnetického pole generovaného v Helmholtzových cívkách. Podstata technického řešení spočívá v tom, že zařízení obsahuje generátor magnetického pole s proměnou magnetickou indukcí a s možností vytvářet stejnosměrné nebo střídavé pole a je vybaveno dvěma snímači magnetické indukce s možností měření magnetické indukce ve třech osách v prostoru magnetického toku. Jeden druh snímače je určen pro měření pouze střídavého magnetického pole a druhý druh snímače umožňuje měřit jak stejnosměrný tak i střídavý typ magnetického pole. Tato možnost usnadňuje výuku a umožňuje oddělit měření stejnosměrné a střídavé složky pole. [11]

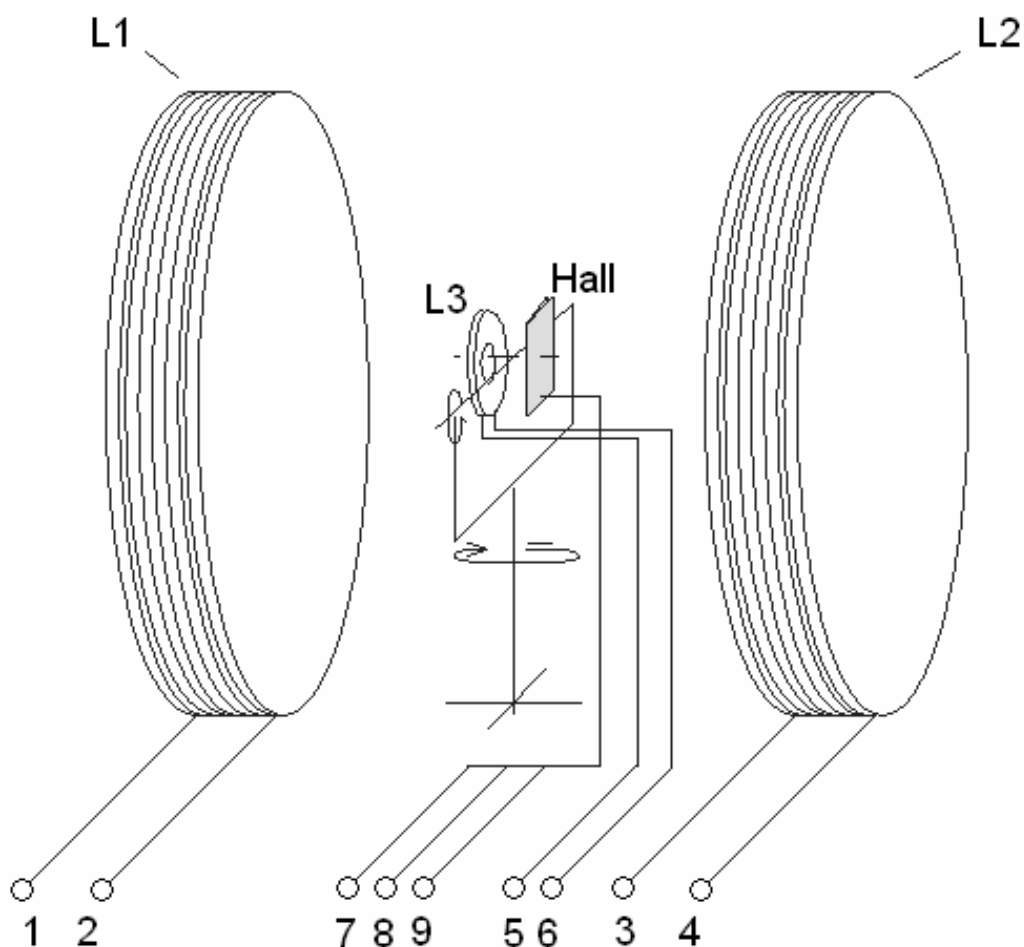
Výhodou zařízení pro modelové měření magnetického pole generovaného v Helmholtzových cívkách a související s využitím při výuce a při studiu magnetického

pole je, že se jedná o jednoduché a finančně dostupné výukové i laboratorní zařízení. Další značnou výhodou zařízení podle technického řešení je především možnost vytváření dvou typů magnetického pole a to se stejnosměrným a střídavým charakterem a magnetického pole homogenního díky použití Helmholtzových cívek. [11]

Předností také je používání dvou typů senzorů magnetické indukce s rozdílnými vlastnostmi s tím, že jeden typ je indukčnostní pro snímání jen střídavé magnetické indukce a druhý typ využívá Hallova jevu a měří proto jak střídavé, tak stejnosměrné magnetické pole. Další předností je, že výstupy z měřicích senzorů se dají zapojit na standardní měřicí přístroje a zajistit další vizualizaci a vyhodnocování. [11]

7.3 Popis konstrukce měřicího modelu s využitím Helmholtzových cívek

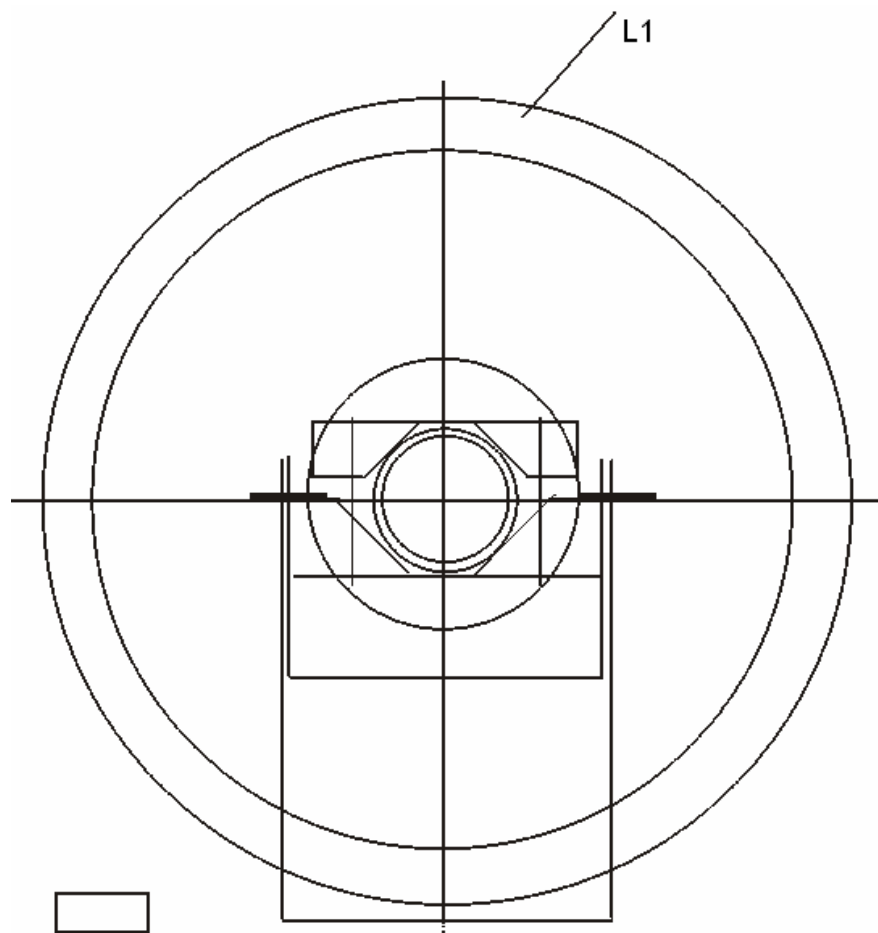
Příklad zařízení pro modelové měření magnetického pole generovaného v Helmholtzových cívkách podle technického řešení je znázorněn na Obr.28.



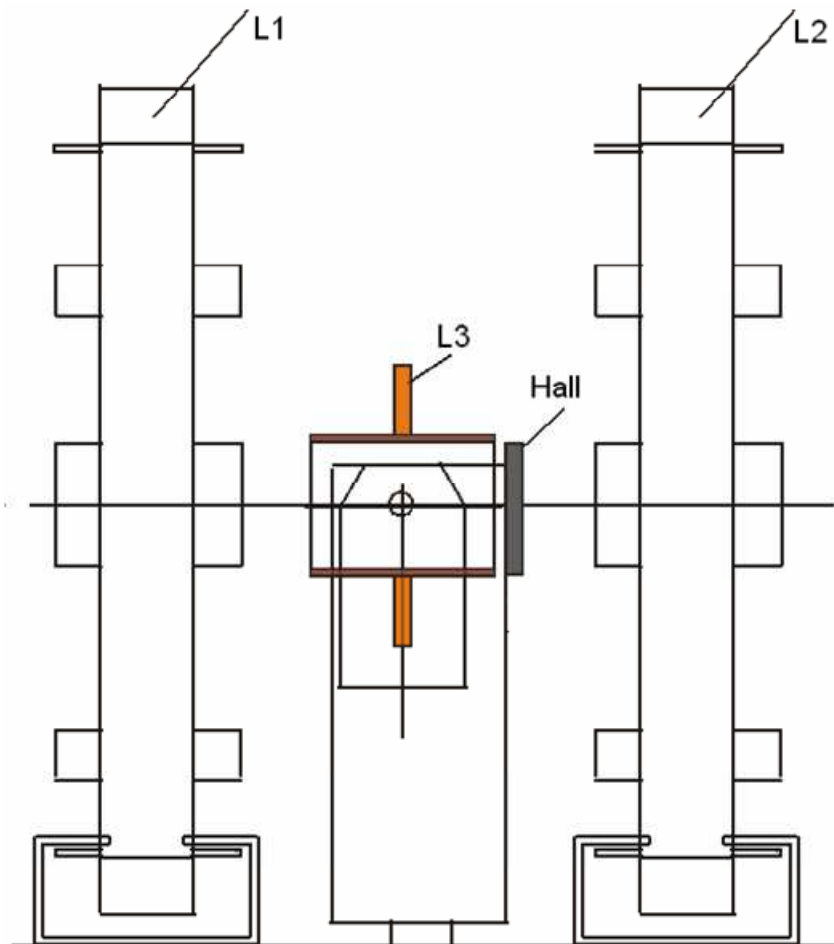
Obr. 28 Schéma zařízení pro modelové měření magnetického pole

Zařízení obsahuje dvě cívky (**L1** a **L2**) Helmholtzovy sestavy, snímací indukčnostní senzor (**L3**) střídavé magnetické indukce, Hallův senzor (**Hall**) střídavé i stejnosměrné magnetické indukce, mechanický systém pro nastavení polohy senzorů v prostoru a blok napájecích vstupů (1,2,3,4,8,9) a signálních výstupů (5,6,7,8). [11]

Zařízení pro modelové měření magnetického pole generovaného v Helmholtzových cívkách po připojení napájení cívek L1 a L2 a jejich vhodném zapojení (vstup budou tvořit svorky 1,4 a svorky 2,3 budou propojeny) vytvoří homogenní magnetické pole ve směru osy cívek v prostoru mezi cívkami. Magnetická indukce při napájení střídavým elektrickým proudem indukuje při průchodu senzory střídavé elektrické napětí v obou senzorech (L3 i Hall). Magnetická indukce při napájení stejnosměrným elektrickým proudem indukuje při průchodu senzory stejnosměrné elektrické napětí pouze v senzoru Hall a v senzoru L3 nevznikne žádný napěťový signál. Výstupy pak mohou být napojeny na měřicí přístroje vznikajícího elektrického napětí např. typu multimetr, osciloskop, vyhodnocovací převodník nebo počítačová jednotka. [11]



Obr. 29 Schematický pohled z boku převzato z [11]



Obr. 30 Schematický pohled zepředu převzato z [11]

7.4 Skutečné technické provedení

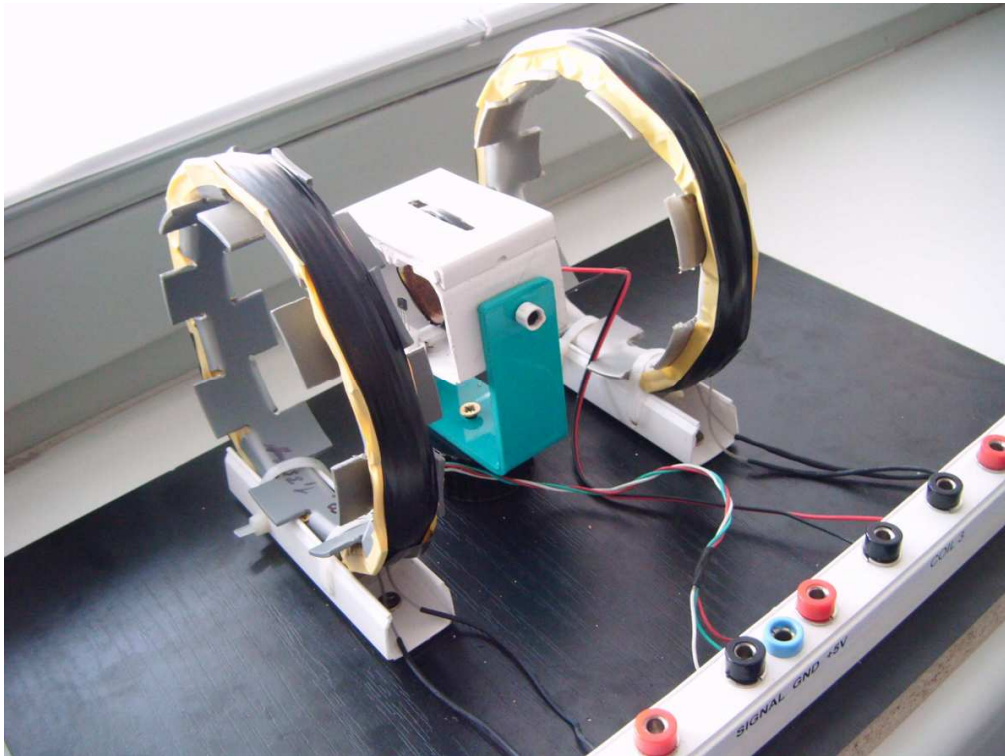
7.4.1 Model verze d

Provedl jsem konstrukci zařízení pro modelové měření magnetického pole s použitím Helmholtzových cívek. Jako první model jsem po studiu této problematiky a při zohlednění specifikací na otočný mechanický systém pro nastavení polohy senzorů v prostoru usoudil, že skutečné provedení nebude vhodné dodržet vzdálenost páru Helmholtzových cívek a zvolil jsem tedy u tohoto modelu vzdálenost rovnu průměru cívek.

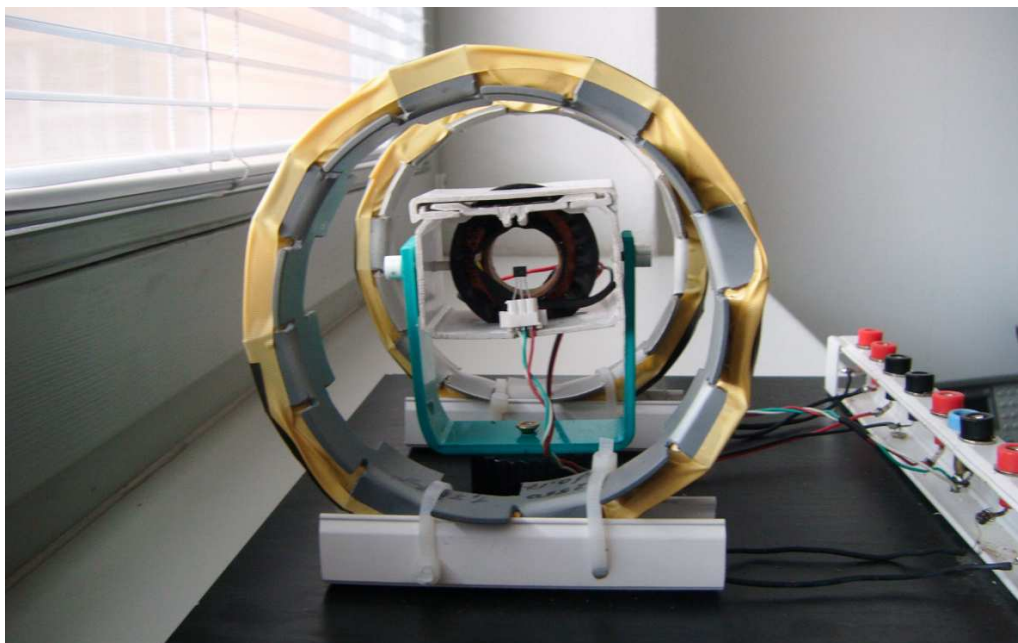
Celá sestava je umístěná na dřevěné desce, kde jsou uchyceny dvě cívky Helmholtzovy sestavy a uprostřed mezi nimi je otočný mechanismus s cívkou L3 a Hallovým elementem A1321LUA-T s citlivostí 5mV/G. Celé zařízení je sestaveno z různých druhů plastu (aby jinak použité feromagnetické materiály neovlivňovaly

magnetické pole uvnitř měřených cívek. Jediné použité kovy je sada šroubů která drží lišty cívek k dřevěné desce a středový šroub dole u otočného mechanismu.

Měřicí sestava je pak opatřena předním panelem s popisky jednotlivých konektorových vstupů případně výstupů.



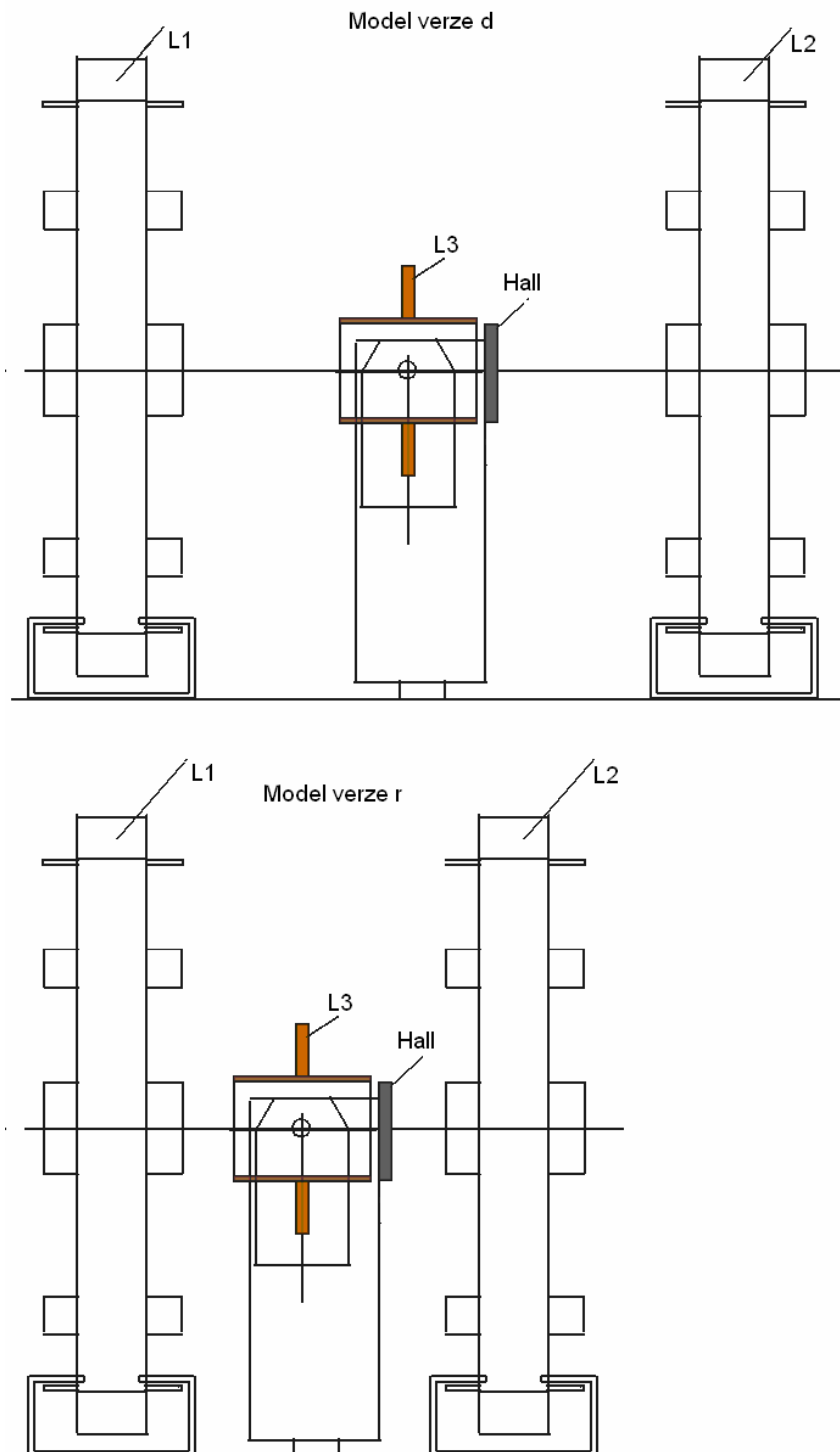
Obr. 31 Měřicí sestava verze d - skutečné provedení



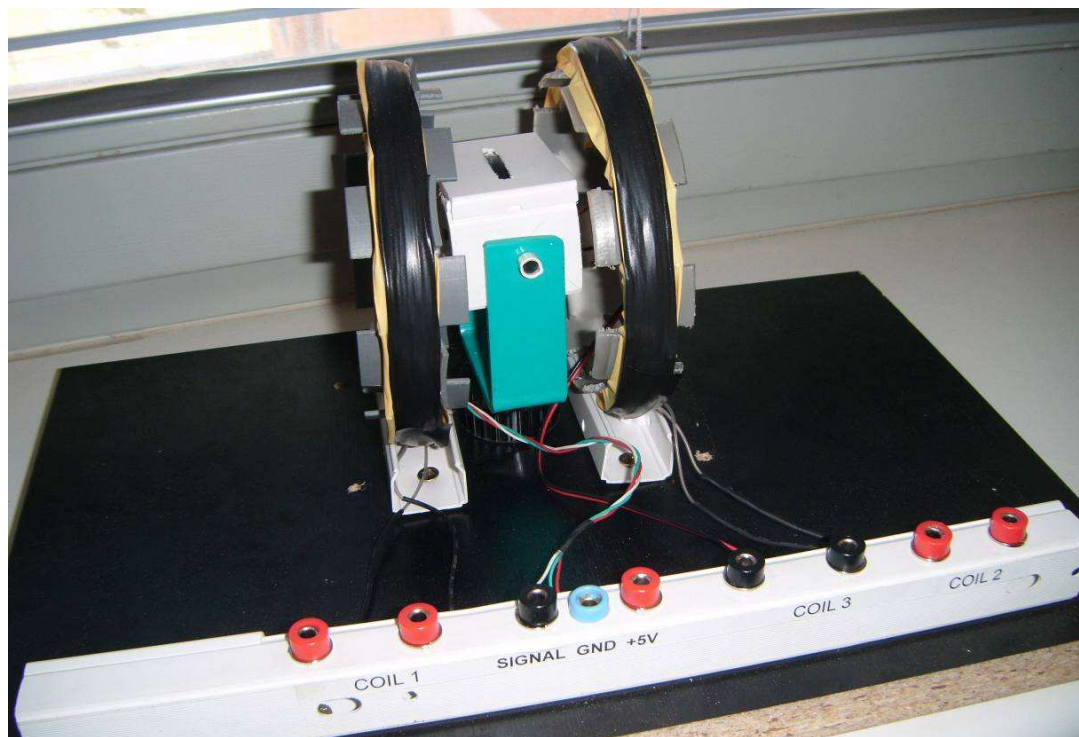
Obr. 32 Měřicí sestava verze d - pohled z boku

7.4.2 Model verze r

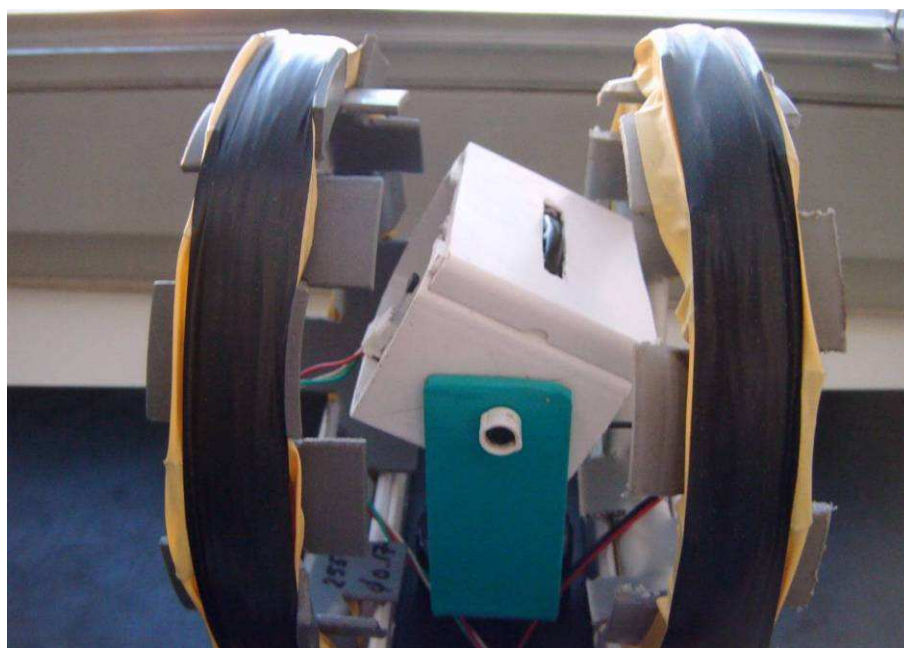
Jedná se o pozměněnou verzi modelu d, která byla upravena tak, aby vzdálenost mezi párem Helmholtzových cívek byla rovna poloměru použitých cívek za účelem zvýšení homogenity pole mezi nimi.



Obr. 33 Srovnání modelů sestavy Helmholtzových cívek verze d a verze r



Obr. 34 Měřící sestava verze r - skutečné provedení



Obr. 35 Měřící sestava verze r – detail otočného mechanismu

8 MĚŘENÍ NA MODELOVÉM ZAŘÍZENÍ HELMHOLTZOVÝCH CÍVEK

8.1 Použité měřicí přístroje

Při měření byly použity následující laboratorní přístroje:

8.1.1 Zdroje stejnosměrného napětí

Voltcraft model 2256 s výstupním napětím 1,5V až 15V.



Obr. 36 Voltcraft model 2256

Laboratorní zdroj ZM 1605U s regulovatelným výstupem 0-20V a pevným napětím 5V.



Obr. 37 Laboratorní zdroj ZM 1605U

8.1.2 Zdroje střídavého napětí 50Hz

Funkční generátor Agilent 33220A s kmitočtovým výstupem 1 μ Hz ... 20 MHz. Generované průběhy: sinus, trojúhelník, obdélník, impuls, exp(+), exp(-), sin(x)/x, šum. AM, FM, PWM, FSK modulace. Rozhraní: USB, LAN, GPIB.



Obr. 38 Funkční generátor Agilent 33220A

Pro vyšší střídavá napětí cca 30V byl použit transformátor TR2 220/24V 2VA 40-80Hz



Obr. 39 Transformátor TR2 220/24V

8.1.3 Voltmetr/Ampérmetr

Multimetr Agilent 34410A je vyvinut pro rychlá měření. Rozlišení displeje $6\frac{1}{2}$ místa, duální zobrazení, přenesení 10 000 měření/s při rozlišení $5\frac{1}{2}$ místa, logování dat, měření odporu a frekvence, s rozhraními LAN, USB a GPIB.



Obr. 40 Multimetr Agilent 34410A

8.1.4 Osciloskop

Osciloskop Agilent DSO6104A byl použit pro vizualizaci průběhů napětí 50Hz a pro kontrolní měření napětí.



Obr. 41 Osciloskop Agilent DSO6104A

Osciloskop je schopen měření v kmitočtovém pásmu DC - 1 GHz s rychlostí vzorkování 4 GS/s. Zpracovává signály až ze 4 kanálů.

8.1.5 Gaussmetr

LakeShore 421 Gaussmeter je odpověď firmy LakeShore na potřebu vysokého výkonu za přijatelnou cenu v rychle se měnící průmyslové oblasti.



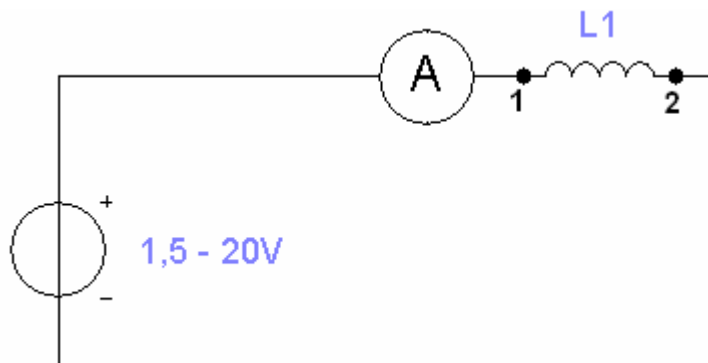
Obr. 42 LakeShore 421 Gaussmeter přední panel

Tab. 11 Parametry Gaussmetru

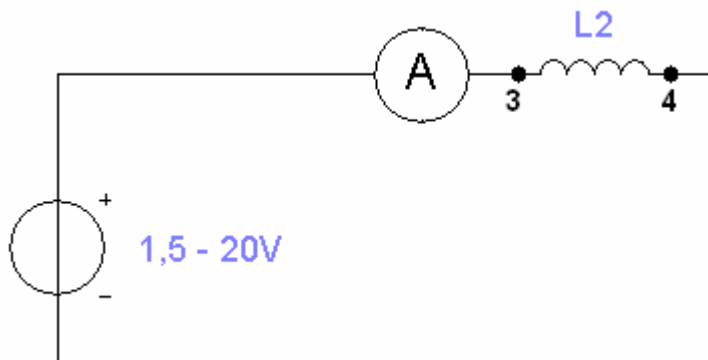
Number Of Inputs:	1
Update Rate:	5 readings per second on display
Probe Features:	Linearity Correction, Auto Probe Zero
Measurement Features:	Auto Range, Max Hold, Relative Mode
Connector:	15 pin D style
DC Accuracy:	$\pm 0.20\%$ of reading $\pm 0.05\%$ of range
AC Frequency Range:	10 – 400 Hz
AC Accuracy:	$\pm 2\%$ of reading (50 – 60 Hz.)

8.2 Stejnoseměrná měření

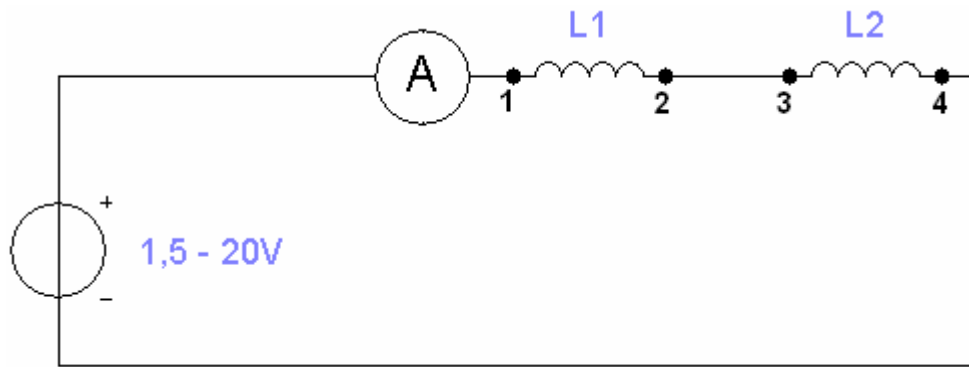
Byla provedena série měření pro 4 různá zapojení Helmholtzových cívek s napájením 0V až 20V DC. Sestava byla vždy zapojena jako na příslušném obrázku (Obr.43 až Obr.46). Měřicí sonda gaussmetru byla umístěna uprostřed cívky L3 (tj. ve středu mezi Helmholtzovými cívkami). Hallův senzor byl napájen ze zdroje 5V a jeho signální výstup byl napojen na voltmetr. Bylo také měřeno voltmetrem napětí indukované v cívce L3 a to jak pro zasunuté feritové jádro, tak pro jádro tvořené vzduchem.



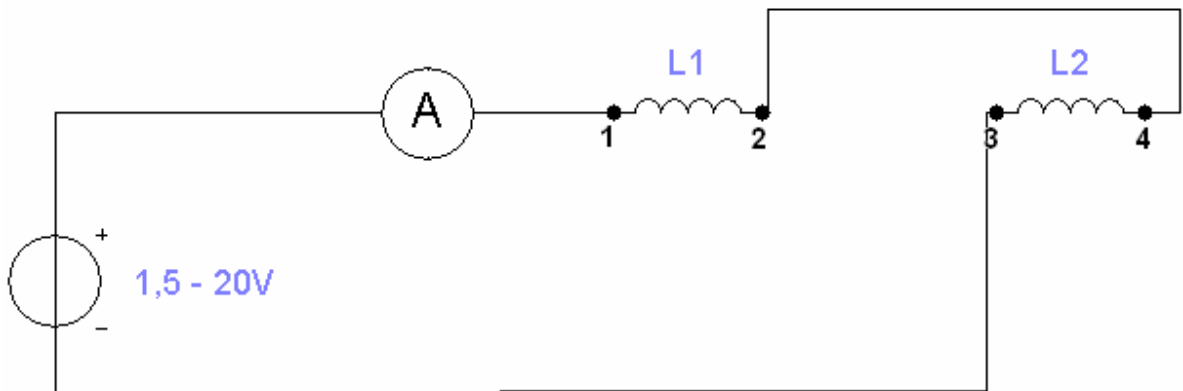
Obr. 43 Zapojení cívy L1



Obr. 44 Zapojení cívy L2



Obr. 45 Helmholtzovo zapojení cívek



Obr. 46 Zapojení s cívkou L2 zaponenou proti cívce L1

Tab. 12 Vzor protokolu ze stejnosměrného měření č.1

Měření 1	16.4.2012	stejnosměrné				
Zapojení:		Popis zapojení:			Pozn:měřeno bylo sondou	
Cívka 1	2550závitů	plus připojené na první banánek			přímo u hallova elementu	
UL1	IL1	B (u Hall) (DC)	B (RMS)	Hall (5,154V)	UL3	UL3 s jádrem
V	mA	G	G	V	mV(AC)	mV(AC)
0	0	0,138	0	2,5874	8,8	9,42
1,5	2,03	0,57	0	2,585	9,8	9,16
2	2,819	0,674	0	2,584	8,7	10,56
2,5	3,43	0,785	0	2,584	10	9,47
3	4,083	0,881	0	2,583	9,9	10,44
3,5	4,721	0,995	0	2,583	10,6	10,25
4	5,437	1,103	0	2,582	10,2	10,57
4,5	6,06	1,17	0	2,582	9,7	10,12
5	6,799	1,305	0	2,581	10,4	9,8
5,5	7,388	1,41	0	2,58	9,5	10,3
6	8,038	1,504	0	2,58	9,2	10,12

6,5	8,77	1,623	0	2,579	10,2	9,76
7	9,53	1,72	0	2,579	9,45	10,52
7,5	10,05	1,815	0	2,578	9,55	10,44
8	10,724	1,91	0	2,578	9,9	10,46
8,5	11,523	2,018	0	2,577	9,8	10,76
9	12,13	2,109	0	2,577	10,13	10,1
9,5	12,763	2,237	0	2,576	10,27	10,93
10	13,476	2,333	0	2,576	9,42	10,15
10,5	14,044	2,403	0	2,575	10,28	10,43
11	14,683	2,488	0	2,575	8,92	10,6
11,5	15,296	2,585	0	2,574	10,94	10,03
12	15,976	2,607	0	2,574	10,02	9,81
13	17,31	2,725	0	2,573	9,84	10,6
14	18,689	3,12	0	2,571	10,15	10,5
15	20,222	3,329	0	2,57	10,26	10,9
16	21,322	3,527	0	2,569	9,17	10,48
17	22,611	3,73	0	2,568	9,22	9,84
18	24,016	3,952	0	2,567	10,27	9,48
19	25,341	4,117	0	2,566	9,65	9,66
20	26,8	4,398	0	2,565	9,44	9,97

Rovněž byly provedeny měření (pro zapojení obou cívek souhlasně a v sérii – Helmholtzovo zapojení a pro zapojení obou cívek v sérii s tím, že konektory cívky L2 byly připojeny obráceně) velikostí magnetické indukce pro různou polohu měřící sondy posouvanou v každé ose (x - zprava doleva, y - shora dolů, z - zezadu dopředu) v prostoru mezi cívkami.

Měření byla pak opět provedena pro upravenou měřící sestavu (verze r) s vzdáleností cívek L1 a L2 přesně podle Helmholtzova návrhu (tj. vzdálenost byla rovna poloměru cívek).

8.3 Střídavá měření 50Hz

Zde byly provedeny série měření pro 4 různá zapojení Helmholtzových cívek s napájením 0 V až 7 V AC a pak 30 V AC (z transformátoru). Sestava byla vždy zapojena jako na příslušném obrázku (Obr.43 až Obr.46) s tím, že nebyl použit zdroj DC, ale funkční generátor Agilent 33220A s nastavenou frekvencí 50 Hz a místo něj pak také transformátor 30 V se síťovou frekvencí 50 Hz.

Měřicí sonda gaussmetru byla umístěna uprostřed cívky L3 (tj. ve středu mezi Helmholtzovými cívkami). Hallův senzor byl napájen ze zdroje 5 V a jeho signální výstup byl napojen na voltmetr. Bylo také měřeno voltmetrem napětí indukované v cívce L3 a to jak pro zasunuté feritové jádro, tak pro jádro tvořené vzduchem.

Tab. 13 Vzor protokolu ze střídavého měření č.5

Měření 5	28.4.2012	střídavé měření s generátorem Agilent 33220A a 30V transformátorem				
Cívky L1 a L2	Popis: 50Hz měření 3 Helmholtz – měřící sestava verze r					
UL	IL	B (DC)	B (RMS)	UL3	UL3 s jádrem	
V	mA	G	G	mV	mV	
0	0,004	-0,06	0	15,5	15	
1,5	0,899	-0,06	0,26	13,1	21,75	
2	1,342	-0,06	0,39	13,6	29,08	
2,5	1,68	-0,06	0,49	18	36,24	
3	2,014	-0,06	0,6	19,3	43,57	
3,5	2,35	-0,06	0,7	23,7	50,88	
4	2,68	-0,06	0,81	26,8	58,23	
4,5	3,02	-0,06	0,91	29,4	65,46	
5	3,36	-0,06	1,01	32,7	72,77	
5,5	3,69	-0,06	1,11	35,3	80,06	
6	4,02	-0,06	1,22	37,96	87,43	
6,5	4,36	-0,06	1,33	41,4	94,75	
7	4,7	-0,06	1,43	44,16	102	
32V trafo naprázdno					Natočení cívky L3	
30,2	21,57	-0,069	6,63	202	476	
				12,3	15,2	
					souosé	
					kolmo shora	

Rovněž byly provedeny měření (pro zapojení obou cívek souhlasně a v sérii – Helmholtzovo zapojení a pro zapojení obou cívek v sérii s tím, že konektory cívky L2 byly připojeny obráceně) velikostí magnetické indukce pro různou polohu měřicí sondy posouvanou v každé ose (x - zprava doleva, y - shora dolů, z - zezadu dopředu) v prostoru mezi cívkami.

Tab. 14 Část protokolu měření magnetického pole ze stejnosměrného měření č.3 –
Helmholtzovo zapojení – měřeno na měřící sestavě verze r

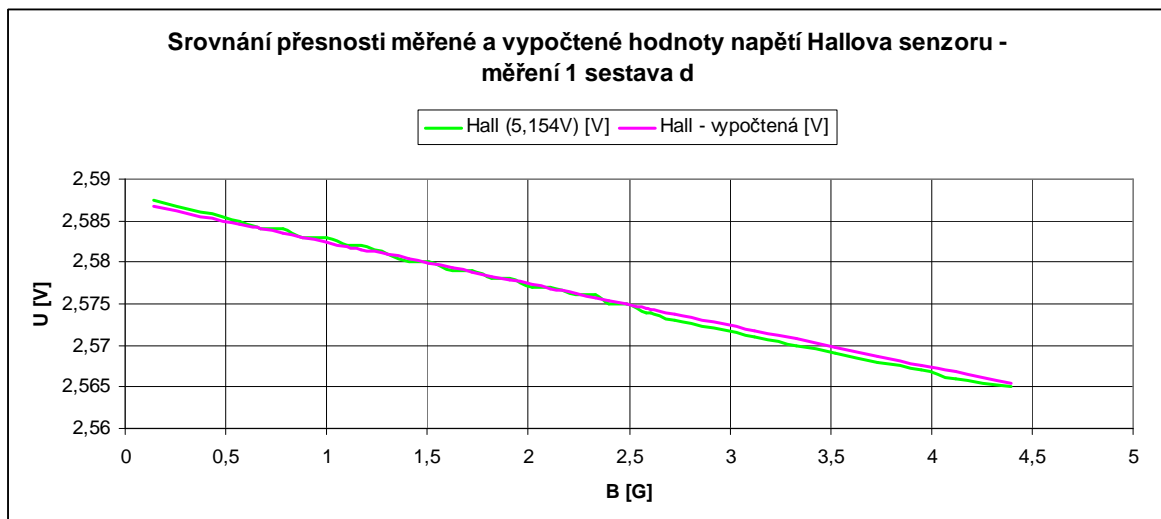
Měření 3	17.4.2012	stejnosměrné												
obě cívky zapojeny - L1 na plus a obě propojeny vnitřní svorky drátem														
UL	IL													
V	mA													
0	0													
20	16,121													
0V měření v ose cívky L2 zvenč - rastrové měření						20V v ose cívky L2 zvenč - rastrové měření						20V/r		
	1cm	3cm	5cm	7cm	9cm		1cm	3cm	5cm	7cm	9cm			
1 cm	-0,92	-0,1	-0,103	-0,111	-0,122	1 cm	2,5681	1,391	0,938	0,71	0,504	1 cm		
2 cm	-0,075	-0,095	-0,104	-0,103	-0,125	2 cm	2,974	1,745	1,054	0,816	0,588	2 cm		
3 cm	-0,075	-0,096	-0,1	-0,107	-0,123	3 cm	3,19	1,959	1,173	0,873	0,6	3 cm		
4 cm	-0,07	-0,097	-0,101	-0,111	-0,122	4 cm	3,109	2,073	1,257	0,906	0,625	4 cm		
5 cm	-0,069	-0,098	-0,102	-0,115	-0,125	5 cm	2,901	2,126	1,319	0,979	0,652	5 cm		
6 cm	-0,07	-0,097	-0,105	-0,116	-0,126	6 cm	2,767	2,13	1,322	0,922	0,658	6 cm		
7 cm	-0,07	-0,1	-0,106	-0,117	-0,127	7 cm	2,723	2,11	1,131	0,917	0,648	7 cm		
8 cm	-0,067	-0,104	-0,11	-0,117	-0,133	8 cm	2,726	2,065	1,256	0,881	0,621	8 cm		
9 cm	-0,07	-0,107	-0,117	-0,12	-0,135	9 cm	2,762	1,969	1,165	0,824	0,588	9 cm		
10 cm	-0,074	-0,11	-0,117	-0,122	-0,14	10 cm	2,656	1,774	1,046	0,707	0,546	10 cm		
11 cm	-0,074	-0,111	-0,123	-0,123	-0,142	11 cm	2,506	1,527	0,903	0,628	0,551	11 cm		
12 cm	-0,083	-0,013	-0,125	-0,128	-0,143	12 cm	2,34	1,155	0,746	0,539	0,511			
13 cm	-0,092	-0,12	-0,127	-0,132	-0,149	13 cm	0,843	0,752	0,582	0,47	0,401			
0V měření v ose cívky zprava do leva														
cm	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
G	0,034	0,054	0,02	0,037	0,035	0,055	0,064	0,074	0,096	0,117	0,095	0,093	0,104	0,
Pozn.							střed L1							
20V měření v ose cívky zprava do leva														
cm	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
G	-0,563	-0,715	-1,291	-1,711	-3,027	-3,912	-4,306	-4,56	-4,577	-4,38	-4,028	-3,821	-3,523	-3,
Pozn.							střed L1							

9 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

9.1 Stejnoseměrná měření

9.1.1 Hallův senzor

Měřenými na sestavě verze d i sestavě verze r byla potvrzena správná funkčnost Hallova senzoru umístěném v měřící části sestavy. Nejmenší chyba měření byla u nejpřesnějšího umístění sondy gaussmetru u Hallova elementu rovna 0,000 V až 0,001 V. Případné jiné nepřesnosti byly pak způsobeny jinou polohou měřící sondy nebo také nedosaženou stoprocentní tvrdostí napájecího zdroje Hallova senzoru.



Obr. 47 Srovnání přesnosti měřené a vypočtené hodnoty napětí Hallova senzoru

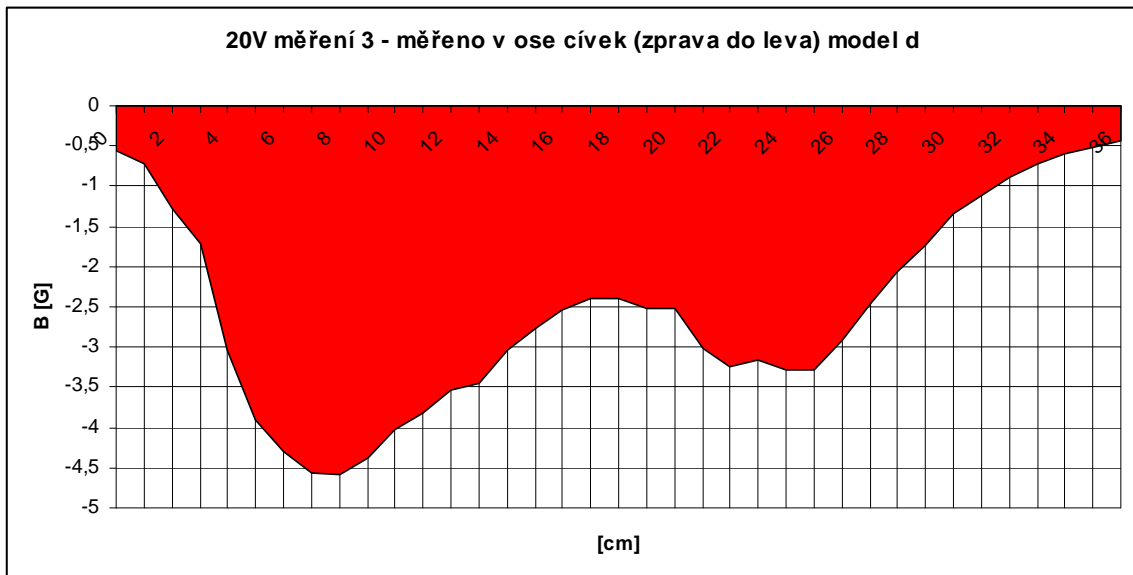
Ovšem vzhledem k tomu, že velikosti magnetické indukce generované měřící sestavou (v oblasti pohybu otočného mechanismu s připevněným Halloovým senzorem) nepřesáhly 8 Gauss a nejčastěji se pohybovaly i pod hodnotou 1 Gauss a použitý Hallův senzor typu A1321LUA-T má citlivost 5 mV/G doporučuji případně sestavu doplnit o jiný typ obvodu – např. EQ-430L s citlivostí více než 2x větší tj. 13 mV/G.

9.1.2 Měřící cívka L3

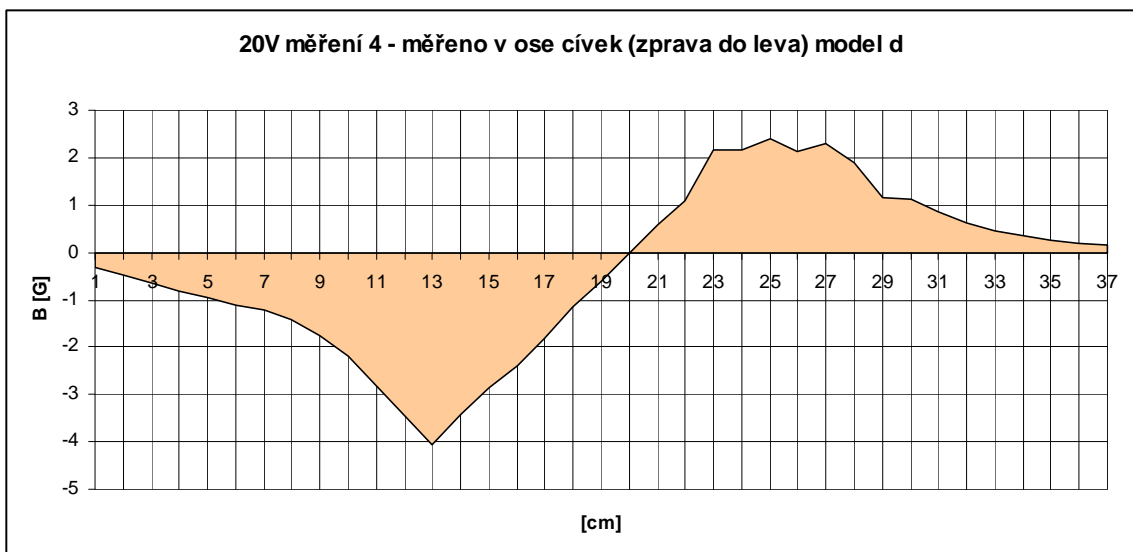
Měřenými při napájení cívek L1 a L2 stejnosměrným napětím bylo zjištěno, že výsledné magnetické pole nemá znatelný vliv na napětí indukované v cívce L3, které

je způsobeno rušivými vlivy z okolního prostředí. Jediným poznatkem je, že při měřeních, kdy cívka L3 měla ve svém středu zasunuté feritové jádro byla citlivost průměrně navýšena 1,04-krát.

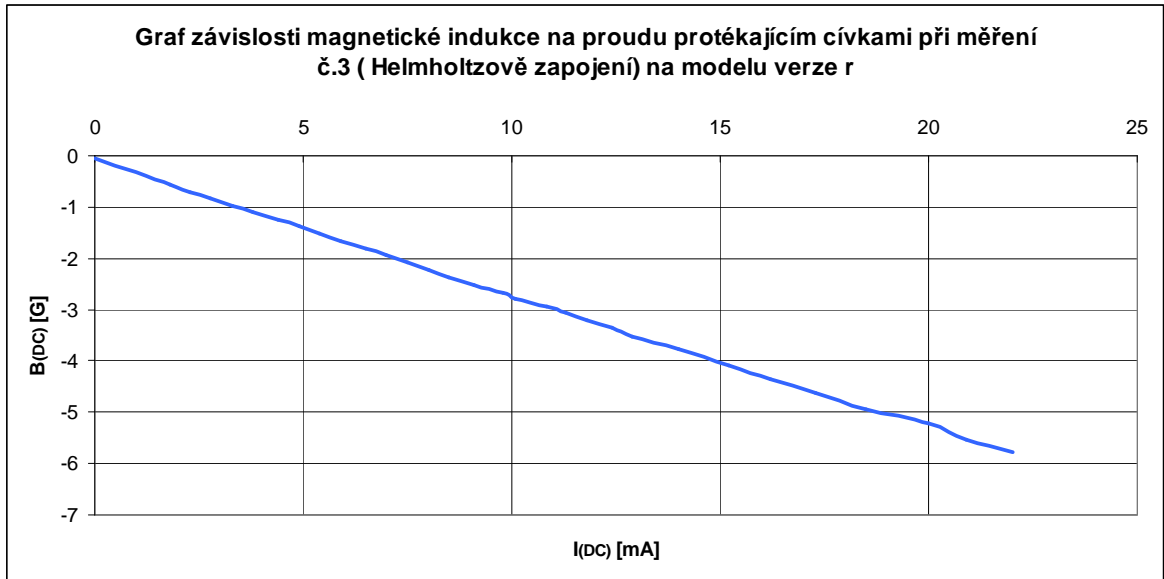
9.1.3 Statické magnetické pole



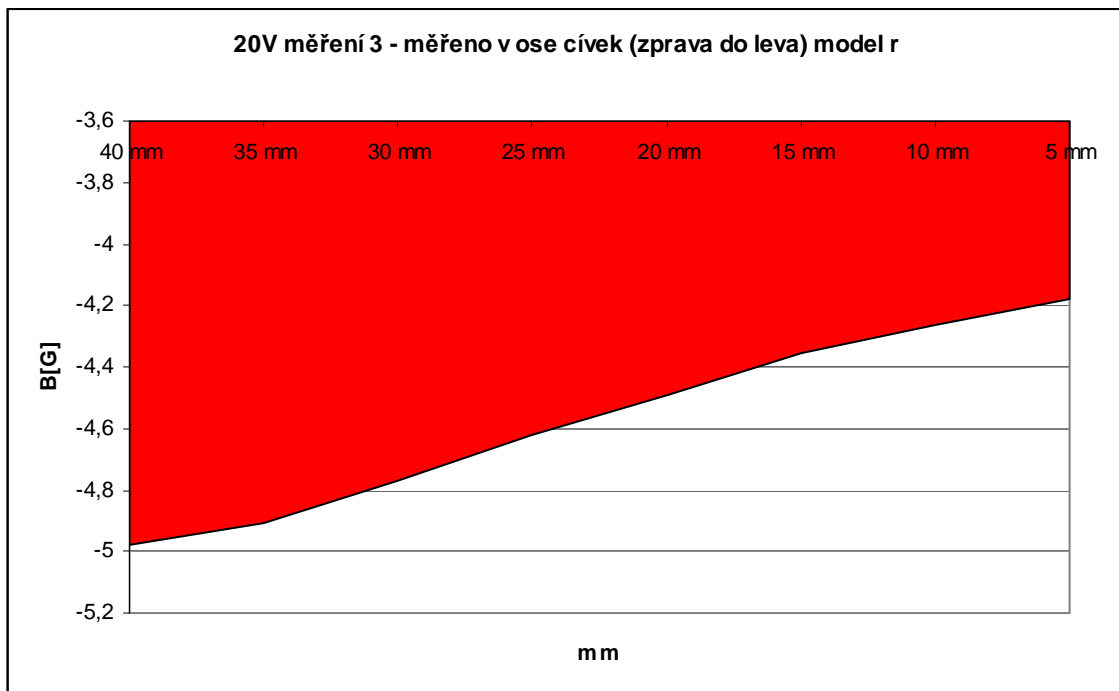
Obr. 48 Měření magnetické indukce B v ose cívek – Helmholtzovo zapojení s napětím $20V_{DC}$ (model verze d)



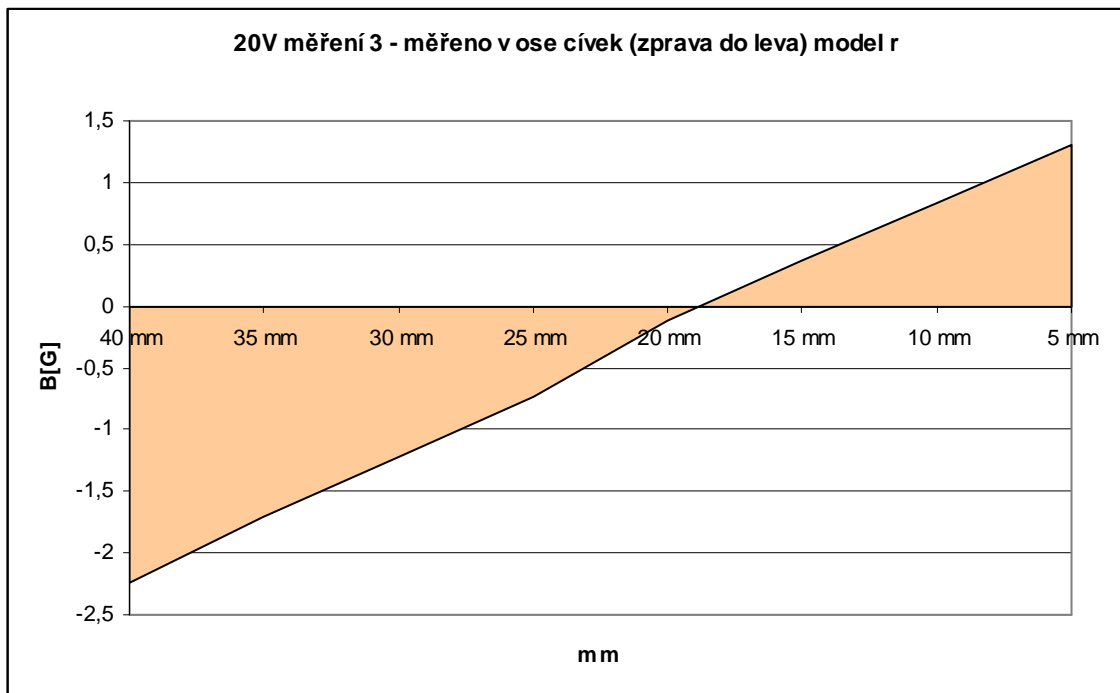
Obr. 49 Měření magnetické indukce B v ose cívek – zapojení č.4 (Obr.46) s napětím $20V_{DC}$ (model verze d)



Obr. 50 Graf závislosti magnetické indukce na proudu protékajícím cívkami při měření č.3 (Helmholtzově zapojení) na modelu verze r



Obr. 51 Měření magnetické indukce B v ose cívek – Helmholtzovo zapojení s napětím $20V_{DC}$ (model verze r)



Obr. 52 Měření magnetické indukce B v ose cívek – zapojení č.4 (Obr.46) s napětím $20V_{DC}$
(model verze r)

Z grafů je jasně vidět rozdíl v linearitě magnetického pole pro model d a model r (oproti modelu d je totiž navržen přesně podle Helmholtzových specifikací).

Navíc je také vidět jak se magnetická indukce B mezi cívkami lineárně zvyšuje – pro Helmholtzovo zapojení cívek a pro zapojení cívky L2 proti cívce L1 je vidět, že magnetická pole obou cívek působí proti sobě a nulové magnetické indukce dosáhneme cca v 18 cm mezi cívkami což odpovídá faktu, že cívka L2 má menší počet závitů a tím i menší indukčnost.

Pro model verze r byl dále stanoven koeficient k pro výpočet velikosti magnetické indukce mezi cívkami v závislosti na proudu jimi protékaném.

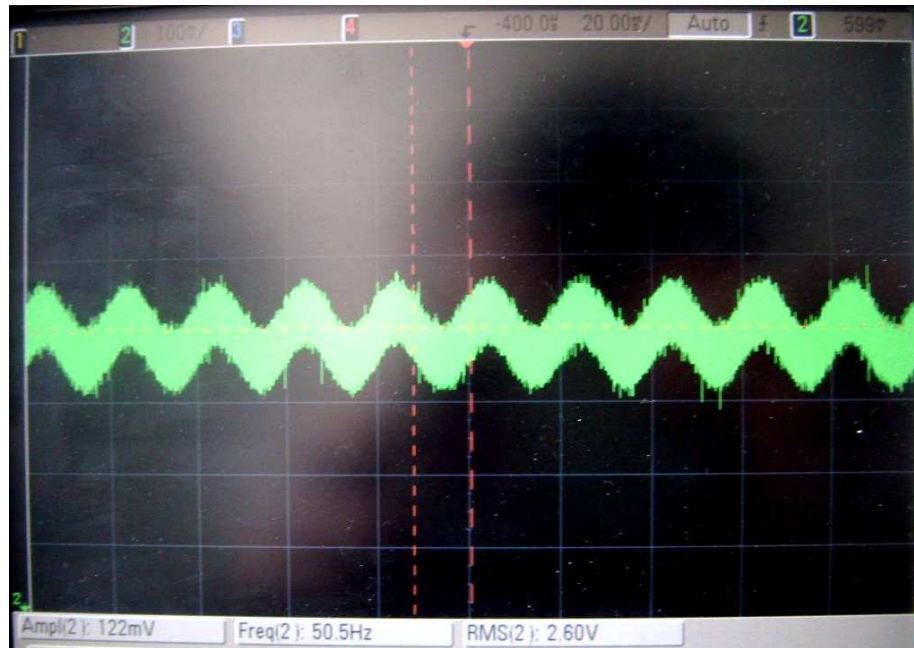
$$B = k \cdot I \quad (23)$$

model r	
Helmholtzovo zapojení	$k = -0,268880663$
L2 zapojena proti L1	$k = -0,214793187$

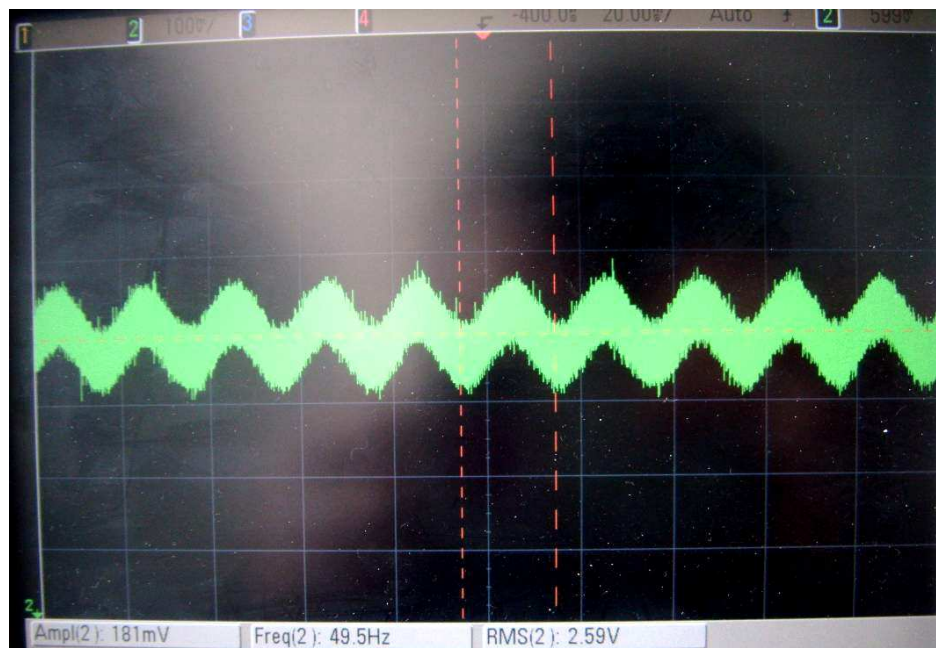
9.2 Střídavá měření 50Hz

9.2.1 Hallův senzor

Při umístění Hallova senzoru do střídavého magnetického pole Helmholtzových cívek je z obrázků osciloskopu patrné jak napětí kolísá s frekvencí 50 Hz.



Obr. 53 Průběhy napětí na Hallově senzoru ve střídavém magnetickém poli 50Hz



Obr. 54 Průběhy napětí na Hallově senzoru ve střídavém magnetickém poli 50Hz

9.2.2 Měřicí cívka L3

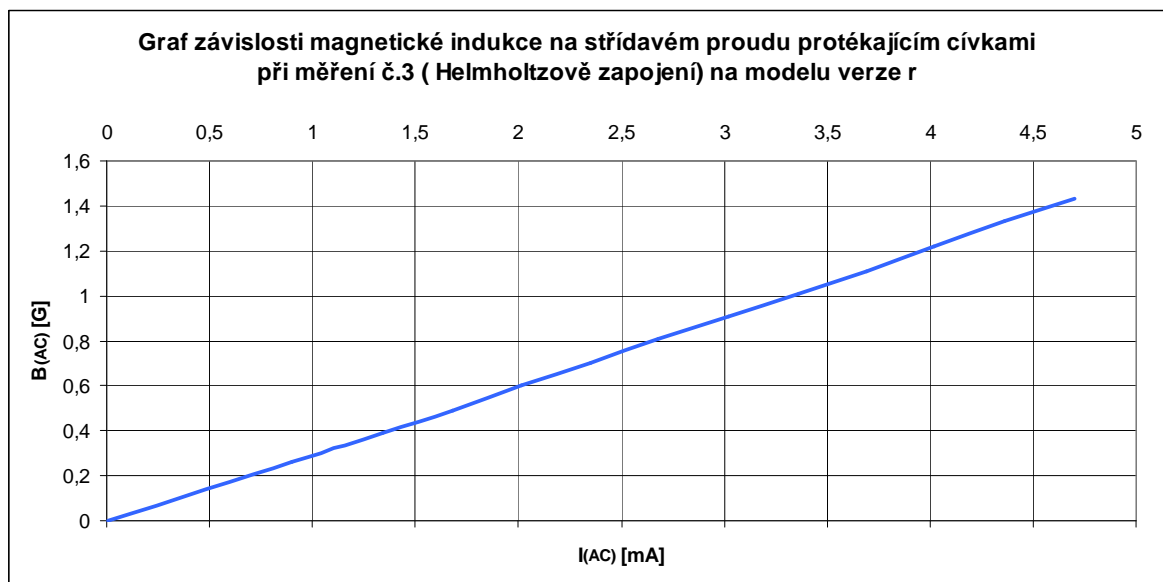
Měřeními při napájení cívek L1 a L2 střídavým napětím 50 Hz bylo zjištěno, že výsledné magnetické pole mezi cívkami, které způsobí indukci napětí v cívce L3 je při použití feritového jádra cca 2,1(Helmholtzovo zapojení cívek) až 2,2-krát větší než při použití vzduchového jádra (u měřicí sestavy verze d) u sestavy verze r – viz Tab. 15.

Tab. 15 Naměřené průměrné koeficienty vlivu feromagnetického jádra v měřicí cívce L3 na zvýšení velikosti indukovaného napětí

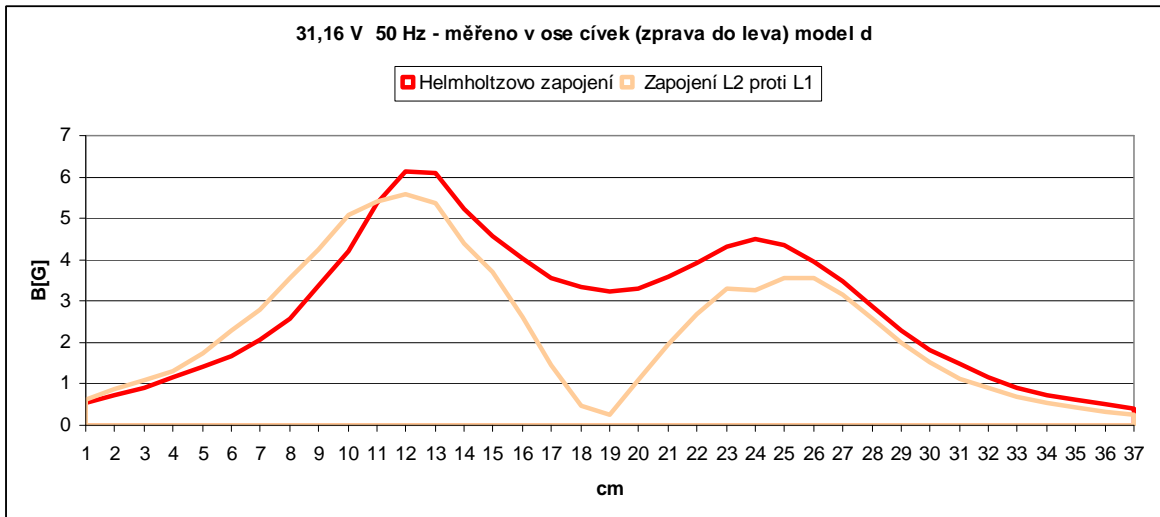
	model d	model r
Helmholtzovo zapojení	2,3	2,1
L2 zapojena proti L1	2,1	1,3

Pozn.: Bylo také zjištěno, že v cívce L3 se indukuje největší napětí pokud je natočena stejně jako cívky L1 a L2 (tzn. sousedé zapojení).

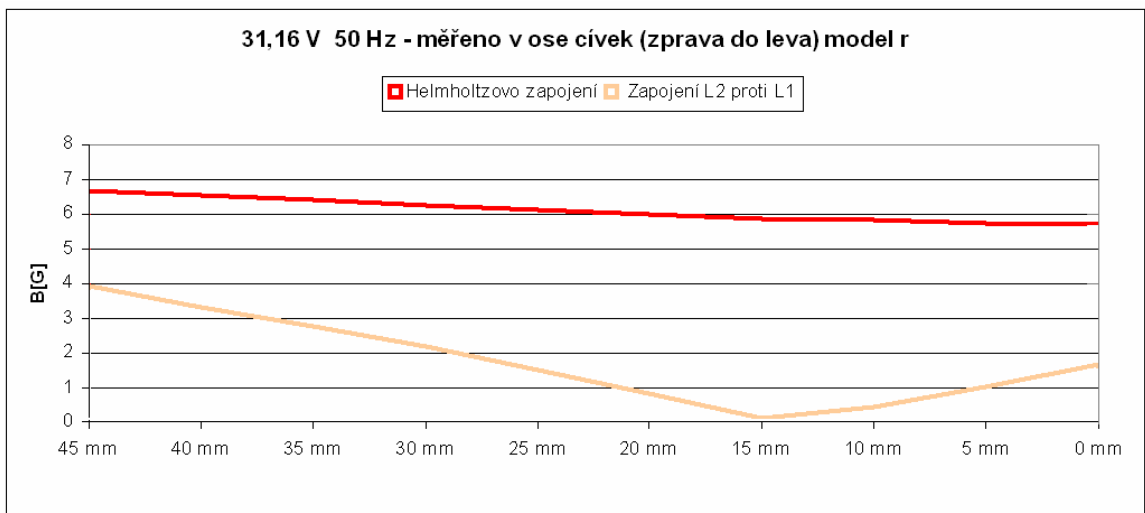
9.2.3 Střídavé magnetické pole



Obr. 55 Graf závislosti magnetické indukce na střídavém proudu protékajícím cívkami při měření č.3 (Helmholtzově zapojení) na modelu verze r



Obr. 56 Měření střídavé magnetické indukce B v ose cívek - 31,16 V 50 Hz
(model verze d)



Obr. 57 Měření střídavé magnetické indukce B v ose cívek - 31,16 V 50 Hz
(model verze r)

Z grafů je jasně vidět rozdíl v linearitě magnetického pole pro model d a model r (oproti modelu d je totiž navržen přesně podle Helmholtzových specifikací).

Navíc je také vidět jak se magnetická indukce B mezi cívkami lineárně zvyšuje při Helmholtzově zapojení cívek.

Pro zapojení cívky L2 proti cívce L1 je vidět, že magnetická pole obou cívek působí proti sobě a nulové magnetické indukce dosáhneme cca v 15 mm od cívky L2 což odpovídá faktu, že cívka L2 má menší počet závitů a tím i menší indukčnost.

Pro model verze r byl dále stanoven koeficient k pro výpočet velikosti magnetické indukce mezi cívkami v závislosti na proudu jimi protékaném.

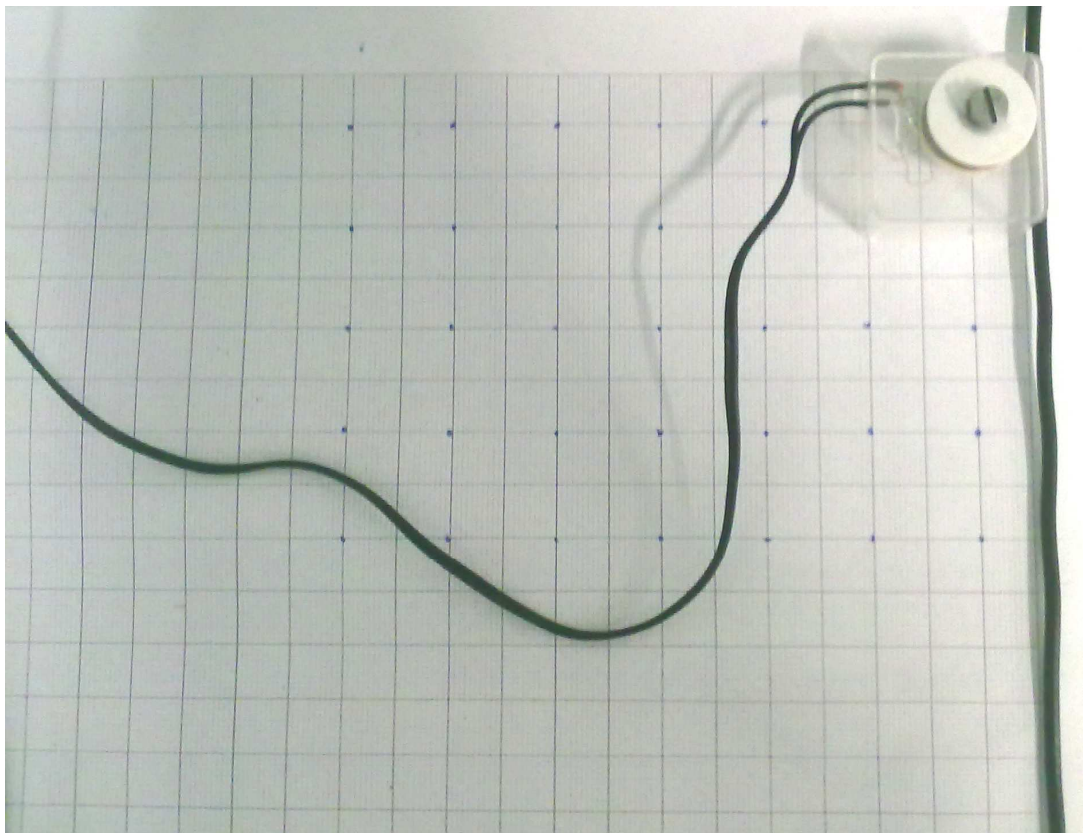
$$B = k \cdot I \quad (24)$$

	model r
Helmholtzovo zapojení	$k = 0,3019632472775$
L2 zapojena proti L1	$k = 0,149106034$

10 MĚŘENÍ MAGNETICKÉHO POLE V OKOLÍ ROVNÉHO VODIČE PROTÉKANÉHO STŘÍDAVÝM PROUDEM 50 HZ

10.1 Popis měření magnetického pole v okolí silového vodiče 50 Hz protékaného různými proudy

Měření byla prováděna v laboratoři C309 U5 FAI UTB. Použité měřicí přístroje byly totožné jako v kapitole 8.1.3 (Voltmetr) a 8.1.5 (Gaussmetr).



Obr. 58 Měřicí cívka na měřícím rastru vedle vodiče protékaného střídavým proudem(vpravo)

10.1.1 Postup

Na měřícím rastru bylo posouváno měřicí cívkou a pro různé vzdálenosti cívky od vodiče bylo zaznamenáváno střídavé napětí indukované v cívce, rovněž byla pro stejnou polohu Gaussmetrem zjištěna hodnota magnetické indukce ve středu měřicí cívky.

10.2 Zhodnocení výsledků

Měření byly provedeny na rastru 7 x 6 buněk, kde každá čtvercová buňka měla délku strany 20 mm (stejný byl i průměr měřicí cívky). Měření byly provedeny pro 3 různé proudy, které protékaly silovým vodičem a to pro $I_1 = 2,55$ A, $I_2 = 5,1$ A a $I_3 = 7,8$ A se síťovou frekvencí 50 Hz.

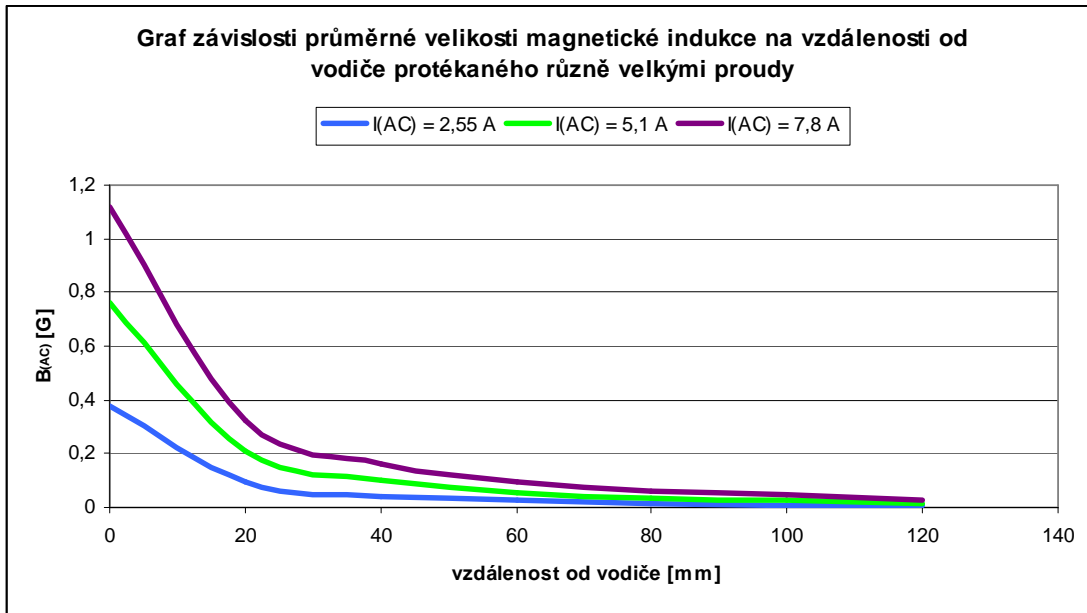
Tab. 16 Vzor měřicího rastru pro měření č.3 proud 7,8A – měření magnetické indukce

120	100	80	60	40	20	0	mm
0,02	0,04	0,05	0,08	0,13	0,27	1,01	B(AC) [G]
0,03	0,05	0,06	0,09	0,16	0,31	1,08	
0,03	0,04	0,06	0,09	0,16	0,33	1,09	
0,04	0,06	0,07	0,1	0,17	0,35	1,18	
0,03	0,04	0,07	0,1	0,18	0,35	1,22	

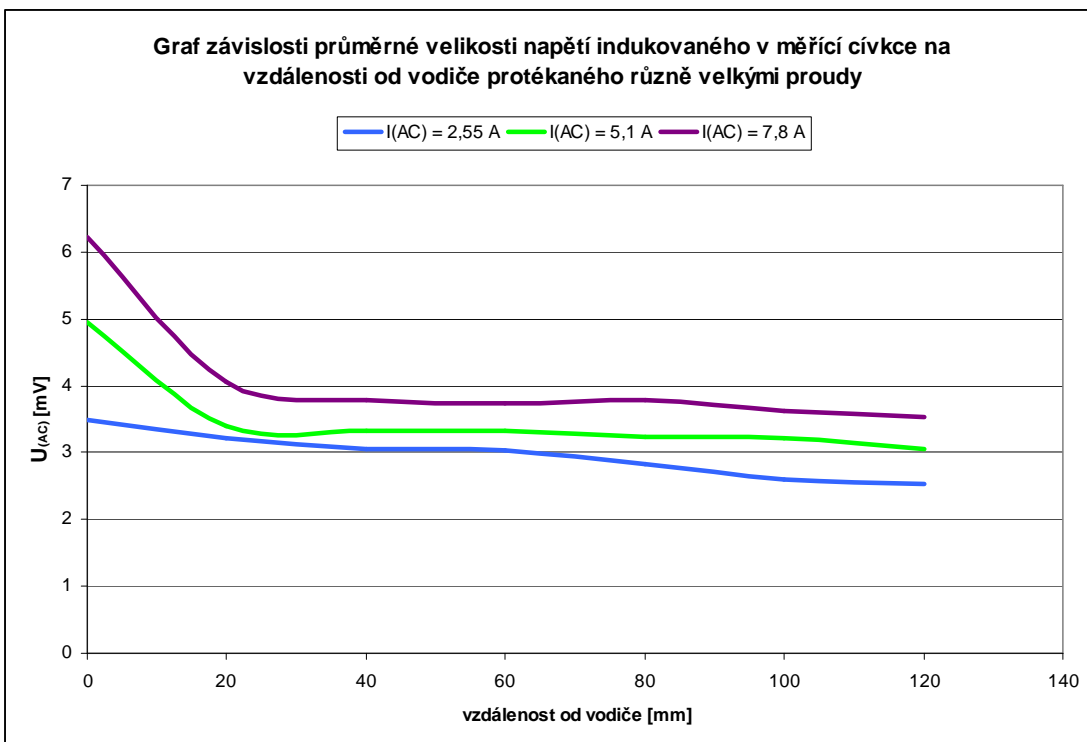
Předpoklad: Indukované napětí v měřicí cívce by se mělo úměrně měnit se změnou velikosti magnetické indukce v různé vzdálenosti od vodiče protékaného proudem.

Z grafu na Obr 59. je vidět, že rozdíly ve velikosti magnetické indukce (hustoty magnetického indukčního toku) pro různé proudy se s vyšší vzdáleností od vodiče zmenšují a pro vzdálenost cca 120 mm už jsou téměř shodné.

Z grafů pro průměrné hodnoty napětí indukovaného v cívce a magnetické indukce pro rastrem dané vzdálenosti od vodiče protékaného proudem však vyplývá, že použití měřicí cívky namísto gaussmetru pro měření magnetické indukce v okolí silového vodiče (s protékajícím proudem v jednotkách ampér a frekvencí 50 Hz) je značně nevhodné, neboť střídavé magnetické pole vytvořené kolem vodiče je natolik slabé, že zde dochází k indukci poměrně velkého napětí (vzhledem k velikosti napětí indukovaného těsně u vodiče cca 5mV) vlivem okolního působení interferenčních antropogenních a přírodních zdrojů rušení (magnetické indukce)



Obr. 59 Graf závislosti průměrné velikosti magnetické indukce na vzdálenosti od vodiče protékaného různě velkými proudy



Obr. 60 Graf závislosti průměrné velikosti napětí indukovaného v měřicí cívce na vzdálenosti od vodiče protékaného různě velkými proudy

ZÁVĚR

Cílem mé diplomové práce bylo přiblížit čtenářům problematiku elektromagnetického pole a také problematiku elektrického a magnetického pole – metody měření intenzity. Dále jsem pak také nastínil problematiku elektrosmogu s uvedením nejčastějších zdrojů statických a nízkofrekvenčních elektrických a magnetických polí. Začlenil jsem zde i problematiku elektromagnetické kompatibility – převážně z nízkofrekvenčního hlediska. Na konci teoretické části jsem pak popsal některé biologické dopady a účinky neionizujícího záření.

V praktické části jsem pak sestavil 2 verze zařízení pro modelové měření magnetického pole s využitím Helmholtzových cívek.

Na obou sestavách jsem provedl série stejnosměrných i 50Hz střídavých měření a vyhodnotil výsledky, přičemž jsem jednoznačně došel k závěru, že sestava verze r (která je realizována přesněji podle Helmholtzových specifikací na pár cívek, které dokážou vytvořit slabé homogenní magnetické pole) je vhodnější pro použití jako nástroj pro vytváření a měření stejnosměrného či střídavého téměř homogenního magnetického pole..

Na zařízení pro modelové měření magnetického pole s využitím Helmholtzových cívek sestavu verze r jsem pak navrhnul opatření, které by dále zlepšily vlastnosti stávajícího modelu - zvýšily citlivost Hallovy sondy použitím jiného typu integrovaného obvodu a dále také zvýšili homogenitu vzniklého pole mezi cívkami tím, že by cívky použité v modelu byly sestavené se shodnými parametry.

Provedl jsem celkem 24 sérii měření dohromady na obou modelech. Výsledky jsem zpracoval ve 2 souborech protokolů (s více listy pro různá zapojení a napájení), které jsou uloženy na přiloženém datovém médiu.

Jako poslední část praktického měření jsem provedl měření magnetického pole v okolí rovného silového vodiče 50 Hz protékaného různými proudy (v jednotkách ampér). Zde jsem došel k závěru, že použití měřicí cívky pro měření takového slabého magnetického pole obsahuje velkou chybu měření a proto je zde vhodnější měřit toto pole Gaussmetrem.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

The aim of my master thesis was to acquaint the readers with the basics of the theory of Electric and Magnetic Fields and also to explain the basic principles to measure them. Furthermore I focused on the problem of Electromagnetic Smog and main sources of ELF Electric and Magnetic fields. I also mentioned a few basics from Electromagnetic Compatibility – mainly the low frequencies. At the end of the theoretical part I described a few biological effects of non-Ionizing Radiation.

In the practical part I have built two versions of a device for model measurements of Magnetic Fields using a Helmholtz coil pair.

I carried out a series of DC and 50 Hz AC measurements on both versions and evaluated the results, where I came to the conclusion, that the model version r (that is built more precisely according to Helmholtz specifications for the coil pair, which can create a weak uniform Magnetic Field) is more suited for usage and the creation and measurements of static or alternating (nearly uniform) Magnetic Field.

I suggested a few improving alterations on the device for model measurements of Magnetic Fields using a Helmholtz coil pair – version r, so that the uniformity of the field produced is further increased by using exactly the same coils for the Helmholtz pair and that the sensitivity of the Hall sensor can be improved by selecting another type of IC.

I carried out a series of 24 measurement sets (together on both model versions). I saved the results in two measuring protocol files that are stored on the provided DVD.

As the last part of the practical measurements I have carried out measurements of Magnetic Field in the surroundings of a straight insulated Electric Power Cable that had various 50 Hz currents passing through it. Here I concluded that the usage of a normal small coil as the measuring coil for such low intensity Magnetic Field has large error in measurement and it is advised to use a Gaussmeter to measure this field instead.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] LOKAJ, Viktor. *Výskyt elektrostatického náboje a vyhodnocení rizikovosti poruch výpočetní techniky*. Zlín, 2010. Bakalářská práce. UTB ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky. Vedoucí práce Ing. Milan Navrátil, Ph.D.
- [2] MYSLÍK, Jiří. *Elektromagnetické pole : základy teorie*. 1.vydání. Praha : Nakladatelství BEN, 1998. 159 s. ISBN 80-86056-43-0.
- [3] FILIP, Jaroslav. *Elektromagnetický smog*. Zlín, 2007. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10563/2770>. Bakalářská práce. UTB ve Zlíně, Fakulta technologická.
- [4] KAZDEROVÁ, Jaroslava. *Elektromagnetická interference a její vyhodnocování*. Zlín, 2010. Diplomová práce. UTB ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky. Vedoucí práce doc. Ing. František Hruška, Ph.D.
- [5] STRNAD, Jan. *Využití volně dostupných programů pro výpočet pole v elektromagnetické kompatibilitě*. Zlín, 2009. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10563/9114>. Diplomová práce. UTB ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky. Vedoucí práce Ing. Stanislav Goňa, Ph.D.
- [6] HAVELKA, Radek. Frekvenční a vlnová pásma. *Forum.valka.cz* [online]. 2012 [cit. 2012-03-14]. Dostupné z: http://forum.valka.cz/attachments/5029/1241588173_Kmitoctove_spektrum.jpg
- [7] ĎAĎO, Stanislav a Marcel KREIDL. *Senzory a měřicí obvody*. Praha: ČVUT, 1996. ISBN 80-01-01500-9.
- [8] *Extremely low frequency (ELF) fields* [online]. Albany, NY: WHO Publications Centre USA [distributor], 1984, 131 s. [cit. 2012-03-21]. ISBN 92-415-4095-8. Dostupné z: <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc35.htm>
- [9] SVAČINA, Jiří. *Elektromagnetická kompatibilita : Principy a metody*. Vyd. 1. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2001. 156 s. ISBN 80-214-1873-7.
- [10] STEINMETZ, Martin. *EMC biologických systémů* [online]. Praha, 2005 [cit. 2012-03-22]. Dostupné z: www.comtel.cz/files/download.php?id=1771. ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra telekomunikační techniky.

- [11] HRUŠKA, František. *Přihláška užitého vzoru: Zařízení pro modelové měření magnetického pole*. UTB Zlín, 2012, 3 s.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

EMC	Elektromagnetická kompatibilita
EMI	Elektromagnetická interference
EMS	Elektromagnetická susceptibilita
FET	Tranzistor řízený polem
FAI	Fakulta aplikované informatiky
UTB	Univerzita Tomáše Bati
NMR	Nukleární magnetická rezonance
SQUID	Superconducting QUantum Interference Device
ELF	Extremely Low Frequency, velmi nízká frekvence
EMF	Elektromagnetické pole
SMF	Statické magnetické pole
MRI	Magnetic Resonance Imaging, magnetická rezonance
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, Mezinárodní komise pro ochranu před neionizujícím zářením
WHO	World Health Organization, Světová zdravotnická organizace
SAR	Měrný absorbovaný výkon
SA	Měrná absorbovaná energie
EAS	Electronic article surveillance, elektronická ochrana zboží
RFID	Vysokofrekvenční identifikace

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Polarizace a) polárního a b) nepolárního dielektrika	14
Obr. 2 Vzájemné silové působení elektricky nabitých částic	16
Obr. 3 Intenzita elektického pole v bodě v prostoru	17
Obr. 4 Elektrický náboj a jeho siločáry převzato z [4]	18
Obr. 5 Magnetické indukční siločáry permanentního magnetu	19
Obr. 6 Vodič v homogenním poli dvou permanentních magnetů převzato z [4]	20
Obr. 7 Flemingovo pravidlo levé ruky převzato z [4].....	21
Obr. 8 Rovinná elektromagnetická vlna	29
Obr. 9 Frekvenční oblasti elektromagnetického spektra převzato z [6]	31
Obr. 10 Dynamický kapacitor převzato z [7].....	32
Obr. 11 Zpětnovazební zapojení dynamického kapacitoru převzato z [7]	33
Obr. 12 Elektrooptický senzor pro měření intenzity elektrického pole převzato z [7]	34
Obr. 13 Snímací cívka s feromagnetickým jádrem převzato z [7].....	35
Obr. 14 Hallova sonda	36
Obr. 15 Princip feromagnetické sondy převzato z [7]	37
Obr. 16 Kompenzační zapojení feromagnetické sondy převzato z [7].....	38
Obr. 17 Podstata polovodičového magnetorezistoru převzato z [7].....	39
Obr. 18 Závislost intenzity elektrického pole na vzdálenosti od vedení 765 kV převzato z [8].....	45
Obr. 19 Závislost magnetické indukce na vzdálenosti od vedení vysokého napětí převzato z [3].....	47
Obr. 20 Základní řetězec EMC převzato z [1].....	48
Obr. 21 Základní členění problematiky EMC převzato z [1]	49
Obr. 22 Typické projevy rušivých signálů v síťovém napájecím napětí převzato z [9]	52
Obr. 23 Uzavírání proudových smyček v těle převzato z [10]	57
Obr. 24 Induktivní vazba při působení elektromagnetického pole na biologické systémy	60
Obr. 25 Galvanická vazba při působení elektromagnetického pole na biologické systémy	60
Obr. 26 Kapacitní vazba při působení elektromagnetického pole na biologické systémy	61

Obr. 27 Vazba vyzařováním při působení elektromagnetického pole na biologické systémy	61
Obr. 28 Schéma zařízení pro modelové měření magnetického pole.....	66
Obr. 29 Schematický pohled z boku převzato z [11].....	67
Obr. 30 Schematický pohled zepředu převzato z [11].....	68
Obr. 31 Měřicí sestava verze d - skutečné provedení	69
Obr. 32 Měřicí sestava verze d - pohled z boku	69
Obr. 33 Srovnání modelů sestavy Helmholtzových cívek verze d a verze r.....	70
Obr. 34 Měřicí sestava verze r - skutečné provedení.....	71
Obr. 35 Měřicí sestava verze r – detail otočného mechanismu	71
Obr. 36 Voltcraft model 2256.....	72
Obr. 37 Laboratorní zdroj ZM 1605U	72
Obr. 38 Funkční generátor Agilent 33220A	73
Obr. 39 Transformátor TR2 220/24V	73
Obr. 40 Multimetr Agilent 34410A	74
Obr. 41 Osciloskop Agilent DSO6104A	74
Obr. 42 LakeShore 421 Gaussmeter přední panel	75
Obr. 43 Zapojení cívy L1	76
Obr. 44 Zapojení cívy L2	76
Obr. 45 Helmholtzovo zapojení cívek	77
Obr. 46 Zapojení s cívkou L2 zaponenou proti cívce L1.....	77
Obr. 47 Srovnání přesnosti měřené a vypočtené hodnoty napětí Hallova senzoru.....	81
Obr. 48 Měření magnetické indukce B v ose cívek – Helmholtzovo zapojení s napětím $20V_{DC}$ (model verze d).....	82
Obr. 49 Měření magnetické indukce B v ose cívek – zapojení č.4 (Obr.46) s napětím $20V_{DC}$ (model verze d)	82
Obr. 50 Graf závislosti magnetické indukce na proudu protékajícím cívkami při měření č.3 (Helmholtzově zapojení) na modelu verze r.....	83
Obr. 51 Měření magnetické indukce B v ose cívek – Helmholtzovo zapojení s napětím $20V_{DC}$ (model verze r).....	83
Obr. 52 Měření magnetické indukce B v ose cívek – zapojení č.4 (Obr.46) s napětím $20V_{DC}$ (model verze r).....	84
Obr. 53 Průběhy napětí na Hallově senzoru ve střídavém magnetickém poli 50Hz.....	85

Obr. 54 Průběhy napětí na Hallově senzoru ve střídavém magnetickém poli 50Hz.....	85
Obr. 55 Graf závislosti magnetické indukce na střídavém proudu protékajícím cívkami při měření č.3 (Helmholtzově zapojení) na modelu verze r	86
Obr. 56 Měření střídavé magnetické indukce B v ose cívek - 31,16 V 50 Hz (model verze d)	87
Obr. 57 Měření střídavé magnetické indukce B v ose cívek - 31,16 V 50 Hz (model verze r).....	87
Obr. 58 Měřicí cívka na měřícím rastru vedle vodiče protékaného střídavým proudem(vpravo)	89
Obr. 59 Graf závislosti průměrné velikosti magnetické indukce na vzdálenosti od vodiče protékaného různě velkými proudy.....	91
Obr. 60 Graf závislosti průměrné velikosti napětí indukovaného v měřicí cívce na vzdálenosti od vodiče protékaného různě velkými proudy	91

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Příklad elektricky nabitých částic	13
Tab. 2 Fyzikální proměnné použité v Maxwellových rovnicích [2].....	25
Tab. 3 Vlastnosti základních senzorů magnetického pole	40
Tab. 4 Intenzita elektrického pole v blízkosti vedení vysokého napětí	45
Tab. 5 Indukce magnetického pole pro vybrané vzdálenosti od vedení vysokého napětí z [8].....	46
Tab. 6 Velikost magnetického pole indukovaného běžnými el. spotřebiči z [8].....	47
Tab. 7 Příklady ze základního řetězce EMC z [1]	49
Tab. 8 Kmitočtové spektrum některých zdrojů rušení z [9]	50
Tab. 9 Přehled elektromagnetického záření a elektrických a magnetických polí z [10].....	55
Tab. 10 Referenční úrovně limitů expozice elektrických a magnetických střídavých polí.....	63
Tab. 11 Parametry Gaussmetru	75
Tab. 12 Vzor protokolu ze stejnosměrného měření č.1	77
Tab. 13 Vzor protokolu ze střídavého měření č.5.....	79
Tab. 14 Část protokolu měření magnetického pole ze stejnosměrného měření č.3 – Helmholtzovo zapojení – měřeno na měřicí sestavě verze r	80
Tab. 15 Naměřené průměrné koeficienty vlivu feromagnetického jádra v měřicí cívce L3 na zvýšení velikosti indukovaného napětí.....	86
Tab. 16 Vzor měřicího rastru pro měření č.3 proud 7,8A – měření magnetické indukce	90

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č.1 – Příloha č.1 k nařízení vlády č. 1/2008 Sb.

Nejvyšší přípustné hodnoty a referenční hodnoty

1. Nejvyšší přípustné hodnoty pro modifikovanou proudovou hustotu indukovanou v centrálním nervovém systému elektrickým a/nebo magnetickým polem s frekvencí f v intervalu od 0 Hz do 10 MHz jsou stanoveny v tabulce č. 1.

Tabulka č. 1

Modifikovaná indukovaná proudová hustota J_{mod} * – nejvyšší přípustné hodnoty			
Zaměstnanci		Ostatní osoby	
frekvence f [Hz]	J_{mod} [A.m ⁻²]	frekvence f [Hz]	J_{mod} [A.m ⁻²]
300 - 10 ⁷	$\sqrt{2} \cdot 0.01$ ⁰⁾	0 - 10 ⁷	pětikrát nižší než nejvyšší přípustná hodnota pro zaměstnance

⁰⁾ Maximum absolutní hodnoty modifikované proudové hustoty v centrálním nervovém systému nesmí v žádném časovém okamžiku překročit nejvyšší přípustnou hodnotu; v ostatních částech trupu nesmí modifikovaná proudová hustota překročit pětinašobek nejvyšší přípustné hodnoty uvedené v tabulce č. 1 pokud je frekvence vyšší než 1 Hz.

* Modifikovaná proudová hustota J_{mod} je definována jako proudová hustota, tj. proud tekoucí kolmo k rovinné ploše s obsahem 100 mm² dělený obsahem této plochy, která je modifikována filtrem s frekvenční charakteristikou $\frac{\sqrt{2} \cdot \beta + j2\pi f}{2 \cdot 4\beta + j2\pi f} \cdot \frac{\alpha}{\alpha + j2\pi f}$, kde $\alpha = 2000\pi \text{ s}^{-1}$, $\beta = 7 \text{ s}^{-1}$ a j je imaginární jednotka, tedy $j = \sqrt{-1}$.

2. Nejvyšší přípustné hodnoty měrného absorbovaného výkonu (SAR) jsou stanoveny v tabulce č. 2. Tyto nejvyšší přípustné hodnoty se vztahují na celkovou absorpci všech přítomných složek elektromagnetického pole v tkáních těla v intervalu frekvencí od 100 kHz do 10 GHz.

Tabulka č. 2

Měrný absorbovaný výkon (SAR) ^{b)} - nejvyšší přípustné hodnoty			
Platí pro frekvence od 100000 Hz do 10 ¹⁰ Hz	Měrný absorbovaný výkon - SAR - průměrovaný přes kterýkoli šestiminutový interval a celé tělo	SAR průměrovaný přes kterýkoli šestiminutový interval a pro kterýchkoli 10 g ^{a)} tkáně s výjimkou rukou, zápěstí, chodidel a kotníků	SAR průměrovaný přes kterýkoli šestiminutový interval a pro kterýchkoli 10 g ^{a)} tkáně rukou, zápěstí, chodidel a kotníků
zaměstnanci	0,4 W/kg	10 W/kg	20 W/kg
ostatní osoby	0,08 W/kg	2 W/kg	4 W/kg

a) 10 g tkáně uvedené v tabulce č. 2 je třeba volit ve tvaru krychle, nikoli jako plochý útvar na povrchu těla.

b) Pro expozici osob pulsům kratším než 30 μs při frekvenci 300 MHz až 10 GHz se doporučuje zavést dodatečné omezení 10 mJ/kg průměrovaných pro 10 g tkáně pro měrnou absorbovanou energii.

Doba průměrování pro měrný absorbovaný výkon je 6 minut. Při krátkodobé expozici (kratší než 6 minut) není tedy nejvyšší přípustná hodnota měrného absorbovaného výkonu překročena, je-li pro zaměstnance splněna nerovnost

$$\sum_i (SAR_i t_i) \leq 2,4 \text{ W} \cdot \text{min} \cdot \text{kg}^{-1}$$

a pro ostatní osoby nerovnost

$$\sum_i (SAR_i t_i) \leq 0,48 \text{ W} \cdot \text{min} \cdot \text{kg}^{-1}$$

SAR_i je měrný absorbovaný výkon při i -té expozici ve $\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$ a t_i je doba trvání i -té expozice v minutách.

3. Nejvyšší přípustné hodnoty pro hustotu zářivého toku elektromagnetické vlny z intervalu frekvencí od 10 GHz do 300 GHz, dopadající na tělo nebo na jeho část, jsou stanoveny v tabulce č. 3.

Tabulka č. 3

Hustota zářivého toku S^* – nejvyšší přípustné hodnoty			
Zaměstnanci		Ostatní osoby	
frekvence f [Hz]	S [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]	frekvence f [Hz]	S [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]
$> 10^{10} - 3 \cdot 10^{11}$	50	$> 10^{10} - 3 \cdot 10^{11}$	10

Doba průměrování pro frekvence 10 GHz až 300 GHz je $T_{av} = 1,92 \cdot 10^{11} / f^{1,05}$; f je v hertzech, T_{av} v minutách. S je průměrná hodnota hustoty zářivého toku dopadajícího na plochu rovnou 20 cm^2 kterékoli části těla exponované fyzické osoby. Maximální průměrná hodnota S vztažená na 1 cm^2 exponovaného povrchu nesmí při tom překročit dvacetinásobek hodnot uvedených v tabulce č. 3.

4. Referenční úrovně pro intenzitu elektrického a magnetického pole (magnetickou indukci) a pro hustotu zářivého toku, případně pro hustotu zářivé energie, uvedené v tabulkách 4 až 9, platí pro pole neporušené přítomnosti osob v posuzovaném prostoru. Je-li pole prostorově silně nehomogenní, srovnává se s referenční úrovní buď intenzita pole průměrovaná přes oblast odpovídající poloze páteře nebo průměrovaná přes oblast odpovídající poloze hlavy exponované fyzické osoby, nebo se pro srovnání s referenční úrovní bere hodnota v geometrickém středu této oblasti. Nepřekročení referenční hodnoty kontaktního proudu se zjistí buď přímým měřením kontaktního proudu u příslušné fyzické osoby nebo měřením proudu rezistorem napodobujícím impedanci lidského těla.

Pokud není výslovně uvedeno jinak, jsou stanovené referenční úrovně v efektivních hodnotách příslušných veličin.

Tabulka č. 4

Referenční úrovně intenzity elektrického pole E – nepřetržitá expozice			
Zaměstnanci		Ostatní osoby	
frekvence f [Hz]	E [V.m ⁻¹]	frekvence f [Hz]	E [V.m ⁻¹]
< 1	– ^{a)}	< 1	– ^{a)}
1 – 8	20000	1 – 8	10000
8 – 25	20000	8 – 25	10000
25 – 820	$5 \cdot 10^5 / f$	25 – 800	$2,5 \cdot 10^5 / f$
50	10000	50	5000
820 – $3 \cdot 10^3$	610	800 – $3 \cdot 10^3$	$2,5 \cdot 10^5 / f$
$3 \cdot 10^3$ – $65 \cdot 10^3$	610	$3 \cdot 10^3$ – $150 \cdot 10^3$	87
$65 \cdot 10^3$ – 10^6	610	$150 \cdot 10^3$ – 10^6	87
10^6 – 10^7	$610 \cdot 10^6 / f$	10^6 – 10^7	$87 \cdot 10^3 / f^{0,5}$
10^7 – $4 \cdot 10^8$	61	10^7 – $4 \cdot 10^8$	28
$4 \cdot 10^8$ – $2 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^3 \cdot f^{0,5}$	$4 \cdot 10^8$ – $2 \cdot 10^9$	$1,375 \cdot 10^3 \cdot f^{0,5}$
$2 \cdot 10^9$ – $3 \cdot 10^{11}$	137	$2 \cdot 10^9$ – $3 \cdot 10^{11}$	61

^{a)} referenční úroveň pro statické elektrické pole není zavedena; při pobytu v silném statickém elektrickém poli je však třeba snížit vliv nepříjemného pocitu způsobeného elektrickým nábojem indukovaným na povrchu těla a zabránit srážení výbojů z povrchu těla.

Je-li současně přítomné i pole magnetické, je pro srovnání s referenční hodnotou nutné použít vztahy uvedené v bodu 5.

Tabulka č. 5

Referenční úrovně pro magnetickou indukci B – nepřetržitá expozice			
Zaměstnanci		Ostatní osoby	
frekvence f [Hz]	B [T]	frekvence f [Hz]	B [T]
< 1	0,28 *	< 1	0,056 *
1 – 8	$0,2 / f^2$	1 – 8	$0,04 / f^2$
8 – 25	$0,025 / f$	8 – 25	$0,005 / f$
25 – 820	$25 \cdot 10^{-3} / f$	25 – 800	$0,005 / f$
50	$500 \cdot 10^{-6}$	50	$100 \cdot 10^{-6}$
820 – $3 \cdot 10^3$	$30,7 \cdot 10^{-6}$	800 – $3 \cdot 10^3$	$6,25 \cdot 10^{-6}$
$3 \cdot 10^3$ – $65 \cdot 10^3$	$30,7 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^3$ – $150 \cdot 10^3$	$6,25 \cdot 10^{-6}$
$65 \cdot 10^3$ – 10^6	$2 / f$	$150 \cdot 10^3$ – 10^6	$0,92 / f$
10^6 – 10^7	$2 / f$	10^6 – 10^7	$0,92 / f$
10^7 – $4 \cdot 10^8$	$0,2 \cdot 10^{-6}$	10^7 – $4 \cdot 10^8$	$0,092 \cdot 10^{-6}$
$4 \cdot 10^8$ – $2 \cdot 10^9$	$10^{-11} \cdot f^{0,5}$	$4 \cdot 10^8$ – $2 \cdot 10^9$	$4,6 \cdot 10^{-12} \cdot f^{0,5}$
$2 \cdot 10^9$ – $3 \cdot 10^{11}$	$0,45 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^9$ – $3 \cdot 10^{11}$	$0,20 \cdot 10^{-6}$

* amplituda

Při expozici jen rukou nebo nohou je přípustné referenční hodnoty zvýšit nepřímo úměrně poměru lineárního rozměru exponované části těla k lineárnímu rozměru trupu.

Je-li současně přítomné i pole elektrické, je pro srovnání s referenční hodnotou nutné použít vztahy uvedené v bodu 5.

Tabulka č. 6

Referenční úrovně pro hustotu zářivého toku* S – nepřetržitá expozice			
Zaměstnanci		Ostatní osoby	
Frekvence f [Hz]	S [W.m ⁻²]	frekvence f [Hz]	S [W.m ⁻²]
10^7 – $4 \cdot 10^8$	10	10^7 – $4 \cdot 10^8$	2
$4 \cdot 10^8$ – $2 \cdot 10^9$	$f / 4 \cdot 10^7$	$4 \cdot 10^8$ – $2 \cdot 10^9$	$f / 2 \cdot 10^8$
$2 \cdot 10^9$ – $3 \cdot 10^{11}$	50 **	$2 \cdot 10^9$ – $3 \cdot 10^{11}$	10 **

* Tato veličina je použitelná jen pro postupnou vlnu. V reaktivní zóně zdroje je nutné použít referenční úrovně pro E a B uvedené v tabulkách č. 1 a 2.

** V intervalu frekvencí od hodnoty 10 GHz do hodnoty 300 GHz je hustota zářivého toku nejvyšší přípustnou hodnotou. Doba průměrování pro frekvence 10 GHz až 300 GHz je $T_s = 1,92 \cdot 10^{11} / f^{1,05}$; f je v hertzech, doba průměrování v minutách.

5. Expozice polím s několika frekvencemi

Pro posouzení expoziční situace podle zjištěných referenčních úrovní při působení elektrického a/nebo magnetického pole s více různými frekvence se uvažuje odděleně přímá

stimulace, která se uplatňuje v intervalu frekvencí od 0 Hz do 10 MHz, a tepelné působení pole, které se uplatňuje v intervalu frekvencí od 100 kHz do 300 GHz.

Elektrická stimulace vyvolaná hustotou indukovaného elektrického proudu v tkáni nepřekračuje referenční hodnoty, splňují-li zjištěné úrovně polí nerovnosti:

$$\sum_{1 \text{ Hz}}^{1 \text{ MHz}} \frac{E_i}{E_{L,i}} + \sum_{f > 1 \text{ MHz}}^{10 \text{ MHz}} \frac{E_i}{a} \leq 1$$

a

$$\sum_{1 \text{ Hz}}^{65 \text{ kHz}} \frac{B_j}{B_{L,j}} + \sum_{f > 65 \text{ kHz}}^{10 \text{ MHz}} \frac{B_j}{b} \leq 1 .$$

E_i označuje intenzitu elektrického pole s frekvencí i ,

$E_{L,i}$ – referenční úroveň intenzity elektrického pole pro i -tou frekvenci,

B_j – magnetickou indukci s frekvencí j ,

$B_{L,j}$ – referenční hodnotu magnetické indukce pro j -tou frekvenci,

$a = 610 \text{ V/m}$ pro expozici zaměstnance a 87 V/m pro expozici ostatních osob,

$b = 30,7 \cdot 10^{-6} \text{ tesla}$ pro expozici zaměstnance a $6,25 \cdot 10^{-6} \text{ tesla}$ pro expozici ostatních osob.

(Konstantní hodnoty a a b jsou v tomto případě použity i pro frekvence vyšší než 65 kHz resp. 1 MHz, protože součet se týká hustot indukovaných proudů a nezahrnuje tepelné působení pole.)

Tepelné působení, které se uplatňuje při frekvencích vyšších než 100 kHz, nepřekračuje přípustnou hodnotu, jsou-li splněny nerovnosti:

$$\sum_{100 \text{ kHz}}^{1 \text{ MHz}} \left(\frac{E_i}{c} \right)^2 + \sum_{f > 1 \text{ MHz}}^{300 \text{ GHz}} \left(\frac{E_i}{E_{L,i}} \right)^2 \leq 1$$

a

$$\sum_{100 \text{ kHz}}^{1 \text{ MHz}} \left(\frac{B_j}{d} \right)^2 + \sum_{f > 1 \text{ MHz}}^{300 \text{ GHz}} \left(\frac{B_j}{B_{L,j}} \right)^2 \leq 1 .$$

$c = 610 \cdot 10^6 / f \text{ V/m}$ pro expozici zaměstnance a $87 \cdot 10^3 / f^{0,5} \text{ V/m}$ pro expozici ostatních osob, a
 $d = 2 / f \text{ tesla}$ pro expozici zaměstnance a $0,92 / f \text{ tesla}$ pro expozici ostatních osob.

Frekvence f je v hertzech.

6. Krátkodobá expozice

Tepelné působení expozice elektrickému a magnetickému poli kratší než je doba určená pro průměrování, případně série krátkodobých expozic působících v době kratší než je doba určená pro průměrování, nepřekračuje referenční hodnotu, jestliže doby expozice t_i a zjištěné úrovně polí E_i a B_i z intervalu frekvencí od 100 kHz do 10 GHz splňují nerovnosti

$$\sum_i \left(E_i^2 \cdot t_i \right) \leq \left(6 \cdot E_{L,i}^2 \right) \text{ v jednotkách } (\text{V} \cdot \text{m}^{-1})^2 \cdot \text{min.}$$

a

$$\sum_i (B_i^2 \cdot t_i) \leq (6 \cdot B_{L,i}^2) \text{ v jednotkách } T^2 \cdot \text{min. (T = tesla),}$$

případně splňuje-li hustota zářivého toku téhož intervalu frekvencí nerovnost

$$\sum_i (S_i \cdot t_i) \leq (6 \cdot S_{L,i}) \text{ v jednotkách } W \cdot m^{-2} \cdot \text{min.}$$

t_i je doba i -té expozice v minutách.

Použitými symboly byly označeny:

E_i – intenzita elektrického pole během i -té expozice v jednotkách $V \cdot m^{-1}$,

B_i – magnetická indukce během i -té expozice v jednotkách tesla (T),

S_i – hustota zářivého toku během i -té expozice v jednotkách $W \cdot m^{-2}$,

$E_{L,i}$, $B_{L,i}$, $S_{L,i}$ – referenční úrovně intenzity elektrického pole, magnetické indukce a hustoty zářivého toku pro nepřetržitou expozici uvedené v tabulkách č. 1, 2 a 3.

Pro frekvence vyšší než 10 GHz se pro hodnocení krátkodobé expozice použije doba průměrování T_m uvedená pod tabulkou č. 6.

Okamžité hodnoty polí a zářivých toků však nesmějí překročit mezní referenční úrovně uvedené v tabulkách č. 7, 8 a 9.

Tabulka č. 7

Mezní referenční intenzita elektrického pole E_{mez} (amplituda)			
Zaměstnanci		Ostatní osoby	
frekvence f [Hz]	E [$V \cdot m^{-1}$]	frekvence f [Hz]	E [$V \cdot m^{-1}$]
10^5	915	10^5	130
$10^5 - 10^6$	$0,438 \cdot f^{0,67}$	$10^5 - 10^6$	$0,0605 \cdot f^{0,67}$
10^6	4226	10^6	603
$10^6 - 10^7$	$4,3514 \cdot 10^5 / f^{0,2335}$	$10^6 - 10^7$	$56,03 \cdot f^{0,17}$
10^7	1952	10^7	896
$10^7 - 4 \cdot 10^8$	1952	$10^7 - 4 \cdot 10^8$	896
$4 \cdot 10^8$	1952	$4 \cdot 10^8$	896
$4 \cdot 10^8 - 2 \cdot 10^9$	$0,098 \cdot f^{1/2}$	$4 \cdot 10^8 - 2 \cdot 10^9$	$0,0448 \cdot f^{1/2}$
$2 \cdot 10^9$	4384	$2 \cdot 10^9$	1952
$2 \cdot 10^9 - 3 \cdot 10^{11}$	4384	$2 \cdot 10^9 - 3 \cdot 10^{11}$	1952

Tabulka č. 8

Mezní referenční hodnota magnetické indukce B_{mez} (amplituda)			
Zaměstnanci		Ostatní osoby	
frekvence f [Hz]	B [T]	frekvence f [Hz]	B [T]
10^5	$30 \cdot 10^{-6}$	10^5	$9,375 \cdot 10^{-6}$
$10^5 - 10^6$	$1,427 \cdot 10^{-3} / f^{0,335}$	$10^5 - 10^6$	$0,1619 \cdot 10^{-3} / f^{0,247}$
10^6	$1,385 \cdot 10^{-5}$	10^6	$5,3 \cdot 10^{-6}$
$10^6 - 10^7$	$0,001427 / f^{0,335}$	$10^6 - 10^7$	$0,1619 \cdot 10^{-3} / f^{0,247}$
10^7	$6,4 \cdot 10^{-6}$	10^7	$3 \cdot 10^{-6}$
$10^7 - 4 \cdot 10^8$	$6,4 \cdot 10^{-6}$	$10^7 - 4 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^{-6}$
$4 \cdot 10^8$	$6,4 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^{-6}$
$4 \cdot 10^8 - 2 \cdot 10^9$	$3,2 \cdot 10^{-10} f^{1/2}$	$4 \cdot 10^8 - 2 \cdot 10^9$	$1,5 \cdot 10^{-10} f^{1/2}$
$2 \cdot 10^9$	$14,4 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^9$	$6,4 \cdot 10^{-6}$
$2 \cdot 10^9 - 3 \cdot 10^{11}$	$14,4 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^9 - 3 \cdot 10^{11}$	$6,4 \cdot 10^{-6}$

Tabulka č. 9

Mezní referenční hustota zářivého toku * S_{mez} (amplituda)			
Zaměstnanci		Ostatní osoby	
frekvence f [Hz]	S [$W \cdot m^{-2}$]	frekvence f [Hz]	S [$W \cdot m^{-2}$]
$10^7 - 4 \cdot 10^8$	10000	$10^7 - 4 \cdot 10^8$	2000
$4 \cdot 10^8 - 2 \cdot 10^9$	$25 \cdot 10^{-6} f$	$4 \cdot 10^8 - 2 \cdot 10^9$	$5 \cdot 10^{-6} f$
$2 \cdot 10^9$	50000	$2 \cdot 10^9$	10000
$2 \cdot 10^9 - 3 \cdot 10^{11}$	50000	$2 \cdot 10^9 - 3 \cdot 10^{11}$	10000

* Tato veličina je použitelná jen pro postupnou vlnu. V indukční zóně zdroje je třeba použít mezní referenční úrovně pro E a B uvedené v tabulkách č. 4 a 5.

7. Mezní referenční úrovně pro expozici polím s několika frekvencemi

Při expozici polím s více frekvencemi musí okamžité hodnoty intenzity elektrického pole E_i , magnetické indukce B_j a hustoty zářivého toku S_i splňovat pro všechna i nerovnosti

$$\sum_i E_i / E_{mez} \leq 1 \quad \text{a} \quad \sum_j B_j / B_{mez} \leq 1, \text{ případně}$$

$$\sum_i S_i / S_{mez} \leq 1.$$

E_{mez} , B_{mez} a S_{mez} jsou mezní referenční úrovně uvedené v tabulkách č. 7, 8 a 9.

8. Referenční úrovně pro efektivní hodnotu kontaktního proudu s frekvencí f , vznikajícího při dotyku fyzické osoby s elektricky vodivým předmětem, přičemž buď předmět nebo fyzická osoba se nacházejí v elektrickém poli nebo v časově proměnném magnetickém poli, jsou stanoveny v tabulce č. 10.

Tabulka č.10

Kontaktní proud I – referenční úrovně			
Zaměstnanci		Ostatní osoby	
frekvence f [Hz]	proud I [A]	frekvence f [Hz]	proud I [A]
< 2500	0,001	< 2500	0,0005
2500 – 10^5	$4 \cdot 10^{-7} \cdot f$	2500 – 10^5	$2 \cdot 10^{-7} \cdot f$
10^5 – $1,1 \cdot 10^8$	0,04	10^5 – $1,1 \cdot 10^8$	0,02

9. Indukovaný proud

Tabulka č.11

Referenční úrovně pro indukovaný proud i *			
Zaměstnanci		Ostatní osoby	
frekvence f [Hz]	indukovaný proud i [A]	frekvence f [Hz]	indukovaný proud i [A]
10^7 – $1,1 \cdot 10^8$	0,1	10^7 – $1,1 \cdot 10^8$	0,045

* proud tekoucí kteroukoli končetinou

10. Nepřesnost zjištěných hodnot, způsobená nepřesností výpočtu, přibližností teoretického modelu nebo nepřesností měření použitým přístrojem a podmínkami měření se pro srovnání s nejvyššími přípustnými hodnotami nebo s referenčními úrovněmi započte takto:

10.1 Je-li střední relativní chyba výpočtu nebo měření příslušné veličiny menší než 1 dB (tj. přibližně 25 % u výkonových veličin a 12,5 % u ostatních), pokládá se nejvyšší přípustná hodnota nebo referenční úroveň za dodrženu, je-li vypočtená nebo naměřená hodnota rovna nejvyšší přípustné hodnotě nebo referenční úrovni, nebo je-li nižší.

10.2 Je-li střední relativní chyba zjišťované veličiny větší než 1 dB, pokládá se nejvyšší přípustná hodnota nebo referenční úroveň za splněnou, je-li vypočtená nebo změřená hodnota příslušné veličiny nižší než její nejvyšší přípustná hodnota nebo referenční úroveň aspoň o tolik decibelů, o kolik decibelů přesahuje střední relativní chyba 1 dB. Stejně pravidlo platí, je-li pro zjištění, zda nejsou překročeny nejvyšší přípustné hodnoty nebo referenční úrovně, nutné použít kombinace dvou nebo více zjištěných hodnot podle vztahů uvedených v této příloze.

11. Upozornění: při dodržení stanovených referenčních úrovní nelze vyloučit ovlivnění některých elektronických zařízení implantovaných do těla, například kardiostimulátorů, protéz obsahujících feromagnetické materiály a podobně.