

Elektromagnetická interference a její vyhodnocování

Electromagnetical interference and its evaluation

Bc. Martin Koláček

Diplomová práce
2011



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin KOLÁČEK**
Osobní číslo: **A09373**
Studijní program: **N 3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**

Téma práce: **Elektromagnetická interference a její vyhodnocování**

Zásady pro vypracování:

1. Rozpracujte problematiku elektromagnetické kompatibility obecně a teoreticky.
2. Popište podrobně metody měření a vyhodnocování elektromagnetické interference a elektromagnetické susceptibility.
3. Provedte základní členění oboru EMC.
4. Popište zdroje rušivých signálů a jejich vazební mechanismy při přenosu a způsoby a prostředky k omezení uvedeného rušení.
5. Uvedte problematiku normalizace v oblasti EMC.
6. Provedte měření magnetické interference některých reálných přístrojů jako zdrojů rušení, asynchronní motor, frekvenční měnič ap.
7. Vyhodnoťte výsledky měření.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. KAZDEROVÁ, Jaroslava . Elektromagnetická interference a její vyhodnocování. Zlín, 2010. 102 s. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky. Vedoucí diplomové práce Hruška František, doc. Ing. Ph.D.
2. SVAČINA, Jiří. Elektromagnetická kompatibilita : Přednášky. Brno : Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně, 2002. 171 s.
3. DYER, Stephen A. Survey of instrumentation and measurement. New York : John Wiley & Sons, 2001. 1096 s. ISBN 047139484X.
4. ČSN IEC 61000-1-2 . Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 1-2: Všeobecně – Metodika pro dosažení funkční bezpečnosti elektrického a elektronického zařízení s ohledem na elektromagnetické jevy. Praha : ÚNMZ, 1.11.2002. 60 s.
5. KOVÁČ, Dobroslav; KOVÁČOVÁ, Irena; KAŇUCH, Ján. EMC z hlediska teorie a aplikace. Praha : BEN – technická literatura, 2006. 216 s. ISBN 8073002027.
6. SVAČINA, Jiří. Elektromagnetická kompatibilita : principy a poznámky. Brno : Vysoké učení technické, 2001 . 156 s. ISBN 8021418737.
7. HRUŠKA, F. Projektování řídicích a informačních systémů. Učební texty. 1.vyd. Zlín: UTB ve Zlíně, 2010, s.175. ISBN 9788073189792.
8. HRUŠKA, F. Senzory pro systémy informatiky a automatizace. Učební texty. 1.vyd. Zlín: UTB ve Zlíně, prosinec 2007, s.177. ISBN 9788073186302.

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. František Hruška, Ph.D.

Ústav elektroniky a měření

Datum zadání diplomové práce:

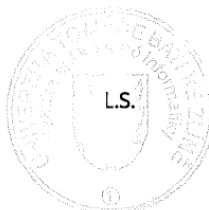
25. února 2011

Termín odevzdání diplomové práce:

27. května 2011

Ve Zlíně dne 25. února 2011


prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan




doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce je seznámení čtenáře s teorií týkající se problematiky elektromagnetické kompatibility, protože tato problematika je především v mysli netechnické veřejnosti záhadný pojem. Málokdo si umí představit, o co se jedná, i když se přímo setkal s přímými projevy elektromagnetické kompatibility či nekompatibility. Praktická část popisuje způsob měření elektromagnetické interference reálného zařízení s následným vyhodnocením a prostorovou vizualizací naměřených dat.

Klíčová slova: elektromagnetická kompatibilita, zařízení, systém, rušivé elektromagnetické pole, filtr, měření.

ABSTRACT

The aim of the thesis is to introduce readers to the theory of electromagnetic compatibility problems, because this issue is still a mystery term in the minds of non-technical public. Few can imagine what it is, even if they directly experienced the manifestation of electromagnetic compatibility or incompatibility. The practical part describes the method of measuring electromagnetic interference of a real device with subsequent evaluation and spatial data visualization.

Keywords: electromagnetic compatibility, device, system, interfering electromagnetic fields, filter, measurements.

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Františku Hruškovi, Ph.D. za odborné vedení, věcné připomínky a cenné rady. Také bych poděkoval svým rodičům a všem známým, kteří mě podporovali při psaní této diplomové práce.

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/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 diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské 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/bakalářskou 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/bakalářskou 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/bakalářské 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/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské 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.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně 25.5.2011

.....
podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD.....	10
I TEORETICKÁ ČÁST.....	11
1 ROZPRACUJTE PROBLEMATIKU ELEKTROMAGNETICKÉ KOMPATIBILITY OBECNĚ A TEORETICKY.....	12
2 PROVEĎTE ZÁKLADNÍ ČLENĚNÍ OBORU EMC.....	13
2.1 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA BIOLOGICKÝCH SYSTÉMŮ.....	13
2.1.1 Elektromagnetický smog a jeho působení na lidský organismus.....	14
2.1.2 Elektromagnetická kompatibilita technických systémů.....	15
2.1.3 Elektromagnetická interference a susceptibilita.....	16
3 POPIŠTE ZDROJE RUŠIVÝCH SIGNÁLŮ A JEJICH VAZEBNÍ MECHANISMUSY PŘI PŘENOSU A ZPŮSOBY A PROSTŘEDKY K OMEZOVÁNÍ UVEDENÉHO RUŠENÍ.....	18
3.1 VAZEBNÍ ČLENY RUŠIVÝCH SIGNÁLŮ.....	20
3.1.1 Galvanická vazba.....	21
3.1.2 Kapacitní vazba.....	21
3.1.3 Induktivní vazba.....	23
3.1.4 Elektromagnetická vazba.....	24
3.2 ZPŮSOBY A PROSTŘEDKY K OMEZENÍ UVEDENÉHO RUŠENÍ.....	25
3.2.1 Odrušovací tlumivky.....	25
3.2.2 Odrušovací kondenzátory.....	26
3.2.3 Odrušovací filtry.....	27
3.3 STÍNĚNÍ.....	27
3.3.1 Základní vlastnosti.....	28
3.3.2 Rozbor účinnosti elektromagnetického stínění.....	28
3.3.3 Útlum odrazem.....	29
3.3.4 Útlum absorpcí.....	29
3.3.5 Útlum zapříčiněný mnohonásobnými odrazy.....	30
4 POPIŠTE PODROBNĚ METODY MĚŘENÍ A VYHODNOCOVÁNÍ ELEKTROMAGNETICKÉ INTERFERENCE A ELEKTROMAGNETICKÉ SUSCEPTIBILITY.....	31
4.1 ŠÍŘENÍ INTERFERENCE SIGNÁLŮ PO VEDENÍ.....	32
4.1.1 Měření s umělou zátěží vedení.....	32
4.1.2 Napěťová sonda.....	33
4.1.3 Proudová sonda.....	33
4.1.4 Absorpční kleště.....	35
4.2 MĚŘÍCÍ ANTÉNY.....	36
4.2.1 Rámová anténa.....	37
4.2.2 Prutová anténa.....	38
4.2.3 Symetrický půlvlnný dipól.....	38
4.2.4 Složená širokopásmová anténa.....	39
4.2.5 Trychtýřová anténa.....	39
4.3 PŘÍSTROJE PRO MĚŘENÍ RUŠIVÝCH SIGNÁLŮ.....	40
4.4 ELEKTROMAGNETICKÁ ODOLNOST.....	40
4.4.1 Obecná metodika testování elektromagnetické odolnosti zařízení.....	42

5	UVEĎTE PROBLEMATIKU NORMALIZACE V OBLASTI EMC	44
5.1	EVROPSKÁ LEGISLATIVA EMC.....	44
5.2	LEGISLATIVA V ČESKÉ REPUBLICE	44
5.3	MEZINÁRODNÍ NORMALIZAČNÍ ORGÁNY	44
5.4	EVROPSKÉ NORMALIZAČNÍ ORGÁNY	45
5.4.1	CEN & CENELEC.....	46
5.4.2	ETSI	46
5.5	NORMALIZAČNÍ ORGÁNY V ČESKÉ REPUBLICE.....	46
5.6	CIVILNÍ NORMY EMC	47
5.7	VOJENSKÉ NORMY EMC	48
II	PRAKTICKÁ ČÁST	49
6	MĚŘENÍ MAGNETICKÉ INTERFERENCE ASYNCHONNÍCH MOTORŮ.....	50
6.1	POPIS MĚŘENÉHO ZAŘÍZENÍ	50
6.1.1	Konfigurace otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster	52
6.1.2	Vyhodnocení konfigurace otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster.....	56
6.2	POPIS MĚŘÍCÍCH ZAŘÍZENÍ	57
6.2.1	Hallova sonda A1321	57
6.2.2	Lineární tříosá Hallova sonda AD22151.....	58
6.2.3	Regulovatelný stejnosměrný napájecí zdroj Voltcraft 2256	61
6.2.4	Digitální analyzátor elektrosmogu ME 3851A	62
6.2.5	Gaussmetr LakeShore 421	63
6.2.6	Digitální multimetr Agilent 34410A	65
6.2.7	Digitální osciloskop Agilent DSO 6104A.....	66
7	MĚŘENÍ CHARAKTERISTIKY HALLOVY SONDY A1321	69
7.1	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ CHARAKTERISTIKY HALLOVY SONDY A1321.	74
8	MĚŘENÍ INTENZITY ELEKTROSMOGU	75
8.1	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ INTENZITY ELEKTROSMOGU.....	76
9	KOMPARATIVNÍ MĚŘENÍ MAGNETICKÉHO POLE ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ	77
9.1	VYHODNOCENÍ KOMPARATIVNÍHO MĚŘENÍ	84
9.1.1	Separátní měření cívkou se vzduchovým jádrem.....	85
9.1.2	Vyhodnocení separačního měření cívkou se vzduchovým jádrem	87
10	MĚŘENÍ MAGNETICKÉHO POLE ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ M1 COMBIMASTER – M2 MICROMASTER.....	88
10.1	MĚŘENÍ A PROSTOROVÁ VIZUALIZACE MAGNETICKÉHO POLE ASYNCHRONNÍHO MOTORU M1 COMBIMASTER.....	90
10.2	MĚŘENÍ A PROSTOROVÁ VIZUALIZACE MAGNETICKÉHO POLE ASYNCHRONNÍHO MOTORU M2 MICROMASTER.....	109
10.2.1	Porovnání naměřených hodnot magnetické indukce v bodě X1 až X3	124
10.2.2	Porovnání naměřených hodnot magnetické indukce v bodě Y1 až Y4	128
10.2.3	Porovnání naměřených hodnot magnetické indukce v bodě Z1 až Z4	132
10.2.4	Porovnání naměřených hodnot magnetické indukce v souřadnici bodů X2, Y1, Z2.....	136
10.2.5	Výpočet polárních úhlů	138

11 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ MAGNETICKÉHO POLE ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ M1 COMBIMASTER – M2 MICROMASTER.....	145
ZÁVĚR	146
ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ.....	147
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	148
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	150
SEZNAM OBRÁZKŮ	151
SEZNAM TABULEK.....	155
SEZNAM GRAFŮ	159
SEZNAM PŘÍLOH.....	163

ÚVOD

Elektrotechnika je velice široký vědní obor, který je založen na fyzikálních zákonech elektrického proudu a napětí. Předmětem zájmu elektrotechniky je výroba, rozvod elektrické energie, konstrukce sdělovacích, zabezpečovacích, výpočetních a dalších elektronických zařízení. Nedílnou součástí tohoto vědního oboru je elektromagnetická kompatibilita, dále EMC, která řeší vznik, šíření a příjem neustále většího množství nežádoucích rušivých druhů elektromagnetických signálů. Tento ustavičně zvyšující se počet rušivých signálů souvisí s rostoucím počtem využívaných elektrotechnických a elektronických zařízení. Působení rušivých elektromagnetických signálů se snažíme EMC co nejvíce omezovat, protože mohou ovlivňovat či úplně znemožnit činnost okolních citlivých elektronických systémů nebo zařízení.

EMC v sobě integruje finanční a ekonomické aspekty, které ovlivňují vývoj a konstrukci výrobku do takové míry, aby splňovaly legislativní a technické požadavky. Splnění těchto legislativních a technických požadavků EMC předurčují prodejnost daného výrobku na všech trzích, na kterých jsou tyto legislativní a technické požadavky platné.

Tato diplomová práce bude rozdělena na teoretickou a praktickou částí. Teoretická část obecně přiblíží problematiku EMC a následně bude uvedeno její základní rozdělení. Nedílnou součástí této problematiky jsou i zdroje rušivých vlivů, které budou podrobně popsány spolu s různými variantami vazebních mechanismů, které přenášejí tyto rušivé vlivy do okolních systémů a zařízení. Z tohoto důvodu bude zmíněno také o nejrůznějších metodách, které zajišťují omezování uvedeného rušení. Dále budou podrobně popsány využívané metody měření a vyhodnocování elektromagnetické interference a elektromagnetické susceptibility. Na závěr teoretické části bude zmíněno o způsobu normalizace v rámci EMC.

Praktická část se věnuje měřením elektromagnetického pole kolem asynchronních motorů M1 Combimaster – M2 Micromaster. Na úvod praktické části budou popsány měřené zařízení, měřicí přístroje a jejich komponenty, se kterými bylo pracováno. Na základě změřených hodnot posléze budou vyhodnoceny výsledky měření a bude prostorově vymodelován tvar magnetického pole kolem měřeného zařízení. Praktická část diplomové práce bude přínosem pro rozšíření laboratorní úlohy DE 4 Řízení otáček motorů, projektu Laboratoře integrované automatizace.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ROZPRACUJTE PROBLEMATIKU ELEKTROMAGNETICKÉ KOMPATIBILITY OBECNĚ A TEORETICKY

Název „elektromagnetická kompatibilita“ pochází z anglického „Electromagnetic Compatibility“, z něhož je vytvořena i mezinárodně užívaná zkratka EMC. Elektromagnetickou kompatibilitu můžeme definovat jako schopnost zařízení správně fungovat v elektromagnetickém prostředí, aniž by samo způsobovalo nepřijatelné elektromagnetické rušení jiného zařízení v tomto prostředí.

Vznik samostatné vědecko - technické disciplíny s názvem elektromagnetická kompatibilita se uskutečnil v 60. letech minulého století ve vyspělejších Spojených státech amerických. Tato disciplína byla ze začátku předmětem zájmu omezeného okruhu elektrotechniků, kteří pracovali ve vojenském a kosmickém průmyslu. S pozdějším velkým nárůstem mikroprocesorové a komunikační techniky ztratila elektromagnetická kompatibilita na své exkluzivitě a začala se uplatňovat i u zařízení, se kterými se dostáváme do styku dnes a denně.

Elektromagnetická kompatibilita je disciplína, která v sobě zahrnuje vědní, technické a aplikační poznatky ze všech oblastí elektrotechniky a elektroniky. Mezi tyto oblasti konkrétně patří elektroenergetika, silnoproudá elektrotechnická, rádiová komunikační a telekomunikační technika, technika antén, šíření a příjem elektromagnetických vln, vysokofrekvenční a mikrovlnná technika, analogová, měřicí a automatizační technika, číslicová a mikroprocesorová technika spolu s informační technikou včetně softwarového inženýrství a mnoho dalších.

Elektromagnetická kompatibilita reprezentuje širší význam než pojem spolehlivost daného zařízení, systému či přístroje, s kterým byl v počátcích rozvoje tohoto vědeckotechnického oboru ztotožňován. Již v roce 1968 jeden ze zakladatelů tohoto oboru H.M.Schlike řekl: *„Systém sám o sobě může být dokonale spolehlivý – bude však prakticky bezcenný v provozu, pokud současně nebude elektromagneticky kompatibilní. Spolehlivost a elektromagnetická kompatibilita jsou neoddělitelné požadavky na systém, který má fungovat v každé době a za všech okolností“*. [1]

Dnes můžeme říci, že se Schlikeho slova potvrdila. To vše v současnosti dokazuje nepřehledné množství zařízení a systémů, které jsou zdroji rušení v kmitočtových pásmech od 1 Hz do desítek až stovek GHz.

2 PROVEĎTE ZÁKLADNÍ ČLENĚNÍ OBORU EMC

Rušivé elektromagnetické vlny obklopují nejen nejrůznější elektrotechnické zařízení, ale i živé organismy. Z toho vyplývá, že můžeme problematiku EMC rozdělit na dvě základní části:

- EMC biologických systémů
- EMC technických systémů a zařízení

2.1 Elektromagnetická kompatibilita biologických systémů

Hlavním předmětem zájmu EMC biologických systémů je veškeré elektromagnetické pole, kterému se naše tělo stále vystavuje nejen na pracovišti (obsluha vysílačů, radiolokátorů, výpočetních středisek a jiných zařízení a systémů), ale i doma v přítomnosti nejrůznějších elektrospotřebičů.

Rád bych zmínil, že problematika elektromagnetické kompatibility biologických systémů je ošetřena vyhláškou ministerstva zdravotnictví č. **480/2000 Sb.**, která stanovuje velikost ozáření zaměstnanců, kteří pracují v blízkosti elektromagnetického záření, tak i u běžného obyvatelstva, z čehož vyplývá, že odborníci nepochybují o škodlivém působení elektromagnetických vln na lidský organismus.

Tab. 1. Nejvyšší přípustné hodnoty indukovaných proudů, absorbovaných výkonů a hustoty ozáření podle vyhlášky Ministerstva zdravotnictví ČR č. 480/2000 Sb. [2]

Veličina	Zaměstnanci				Ostatní osoby			
	Kmitočet f [Hz]				Kmitočet f [Hz]			
Indukovaná proudová hustota [A/m ²]	< 1	1 ÷ 4	4 ÷ 10 ³	10 ³ ÷ 10 ⁷	< 1	1 ÷ 4	4 ÷ 10 ³	10 ³ ÷ 10 ⁷
	0,057	$\frac{0,04}{f}$	0,01	$\frac{f}{10^5}$	0,011	$\frac{0,008}{f}$	0,002	$\frac{f}{5 \cdot 10^5}$
Měrný absorbovaný výkon [W/kg]	10 ⁵ ÷ 10 ¹⁰				10 ⁵ ÷ 10 ¹⁰			
	0,4				0,08			
Plošná hustota zářivého toku [W/m ²]	10 ¹⁰ ÷ 3·10 ¹¹				10 ¹⁰ ÷ 3·10 ¹¹			
	50				10			

Hustota indukovaného proudu je zde definována jako efektivní hodnota elektrického proudu tekoucího kolmo k rovinné ploše s obsahem 100 mm² dělená obsahem této plochy. Pro kmitočty nad 1 kHz se bere časová střední hodnota této hustoty za dobu 1 s. Při současné expozici elektrickým a magnetickým polem o stejném kmitočtu se výsledná proudová hustota určí jako součet hustoty proudu indukovaného elektrickým polem a proudu indukovaného magnetickým polem. **Měrným absorbovaným výkonem**

v 1. tabulce se rozumí výkon absorbovaný v celém těle vztažený na 1 kg hmotnosti a časově průměrovaný na dobu 6 minut. **Hustota zářivého toku** se uvažuje jako průměrná hodnota hustoty na ploše 20 cm² libovolné části těla ozařované osoby. Maximální průměrná hodnota této hustoty přitom nesmí překročit dvacetinásobek uvedených tabulkových hodnot. [6]

2.1.1 Elektromagnetický smog a jeho působení na lidský organismus

Toto téma je tak kontroverzní, že rozděluje společnost. Jedna polovina si stojí za názorem, že elektromagnetické vlny výrazně neovlivňují lidské zdraví a druhá polovina tvrdí přesný opak.

Elektromagnetický smog je tvořen jedním či více elektromagnetickými poli a drží se spíše při zemi, protože je těžký a také může neustále zvětšovat svůj objem. V případě překročení intenzity elektromagnetického smogu (viz Tab. 2, Tab. 3) může docházet k negativnímu působení na lidský organismus, které se projevuje jako bolest kloubů, svalů, únava, bolest hlavy. Projevování těchto nepříznivých vlivů je velmi individuální záležitost, protože každý jedinec má na elektrosmog rozdílnou citlivost.

Tab. 2. Zavedené limity okamžitých hodnot E_{max} a P_{max} hygienikem ČR pro běžné obyvatelstvo.

Kmitočtové pásmo [MHz]	E_{max} [V/m]	P_{max} [mW.cm ⁻²]
f < 30	80	1,70
30 < f < 300	30	0,24
300 < f	10	0,025

Tab. 3. Zavedené limity okamžitých hodnot E_{max} a P_{max} pro lékařsky kontrolovanou skupinu lidí pracujících na vysokofrekvenčních zařízeních.

Kmitočtové pásmo [MHz]	E_{max} [V/m]	P_{max} [mW.cm ⁻²]
f < 30	300	23,8
30 < f < 300	100	2,65
300 < f	31,6	0,265

Elektromagnetické pole ve spojitosti s působením na lidský organismus se obecně rozděluje na netepelné a tepelné účinky:

Netepelnými účinky se vyznačují nízkofrekvenční pole od kmitočtu 0 Hz až 100kHz, z důvodu nízké intenzity elektrického proudu indukující se v lidském těle, který je z krátkodobého hlediska pro lidský organismus neškodný. Důležité je, že se vzrůstající vzdáleností například od síťového transformátoru intenzita elektromagnetického pole rychle klesá. Při dlouhodobé expozici lidského těla tímto nízkofrekvenčním polem dochází k oslabení imunity a poruše krevního oběhu.

Tepelné účinky se projevují u vysokofrekvenčních elektromagnetických polí s kmitočtem nad 100kHz a výše, přičemž nejúčinnější absorpce do lidského těla se uskutečňuje od kmitočtu 100 MHz. Tyto kmitočty zapříčiňují ohřev lidské tkáně.

Jeden z prvních teoretických odborníků, který se zabýval škodlivými účinky poměrně slabých fyzikálních polí přirozeného i technického původu byl prof. Dr. Ing. Konstantin Meyl, který pracoval jako vedoucí pracovník Transférového centra St. George ve Schwarzwaldu. Meyl a svým bádáním zjistil, že v místech křížení přirozených a technických polí, například geomagnetických a elektromagnetických polí, dochází k vzájemné interakci a vzniku různých fyzikálních polí vyznačující se jinými vlastnostmi. Tyto nově vzniklé vlny mění podmínky prostředí, na které je lidské tělo navyklé. [12]

Lidské tělo funguje pro fyzikální pole jako anténa, kdy na vrchní části těla, která je zasažená elektromagnetickým zářením se vytvoří zóna s kladným elektrickým potenciálem a spodní část těla představuje zónu se záporným elektrickým potenciálem. Tím pádem proud protéká celou nervovou soustavou a dochází ke změnám procesu lidského těla vyznačující se bolestí kloubů, hlavy, únavou, duševní nepohodou, oslabením imunitního systému, vzniku různých chorob (Parkinsonovy nemoci, sklerózy) či alergií.

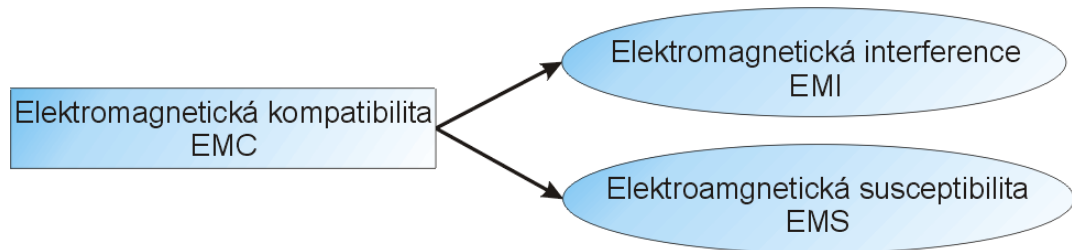
Z výše uvedeného vyplývá, že elektromagnetický smog nepříznivě působí na životní prostředí. Jak před 20 lety byl problém s kouřovým smogem vypouštěným z neodsířených komínů tepelných elektráren, tak dnes je na pořadu dne problematika elektromagnetického smogu, který stále narůstá.

2.1.2 Elektromagnetická kompatibilita technických systémů

U elektromagnetické kompatibility technických systémů musíme brát v potaz skutečnost, že nejen konkrétní zařízení může ovlivňovat rušivými signály nejen okolní zařízení, ale také může negativně ovlivňovat sama sebe.

2.1.3 Elektromagnetická interference a susceptibilita

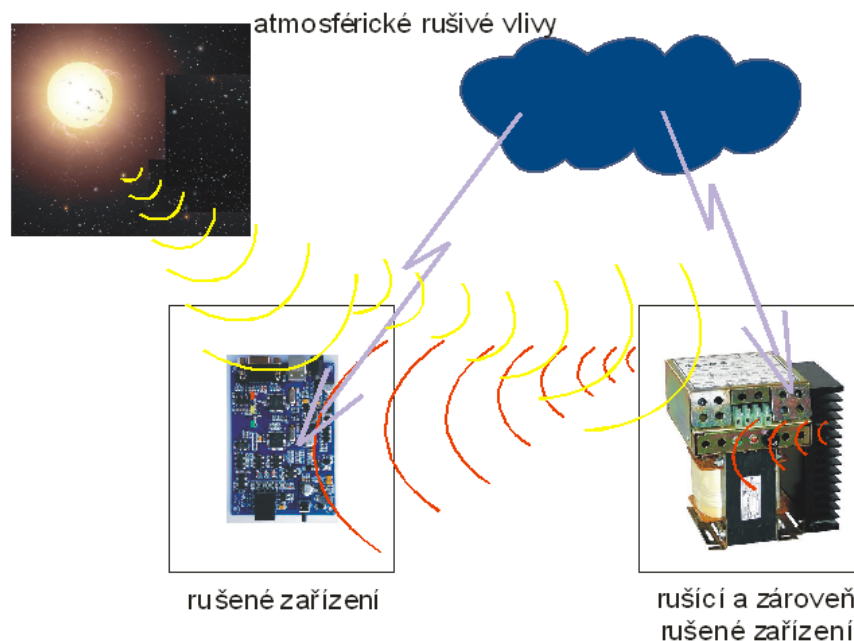
Elektromagnetickou kompatibilitu technických systémů lze rozdělit do dvou základních skupin, jak znázorňuje obrázek 1.



Obr. 1. Základní členění problematiky EMC.

Elektromagnetická interference (EMI) představuje proces, při kterém se signál generovaný zdrojem rušení přenáší prostřednictvím elektromagnetické vazby do rušených prvků systémů. [2]

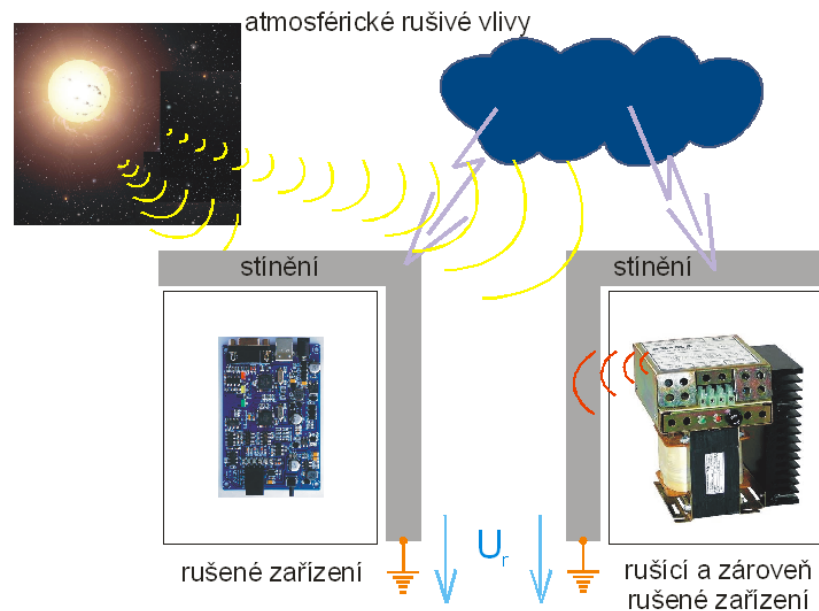
Z definice EMI plyne, že cílem zájmu EMI je hlavně identifikace zdrojů rušení, analyzování rušivých signálů a identifikace parazitních přenosových cest a následné odstraňování příčin rušení.



Obr. 2 Interferenční vlivy různých zdrojů rušení působící na zařízení.

Elektromagnetická susceptibilita (EMS) je definována jako schopnost zařízení a systému pracovat bez poruch nebo s přesně definovaným přípustným vlivem v prostředí, v němž se vyskytuje elektromagnetické rušení. [2]

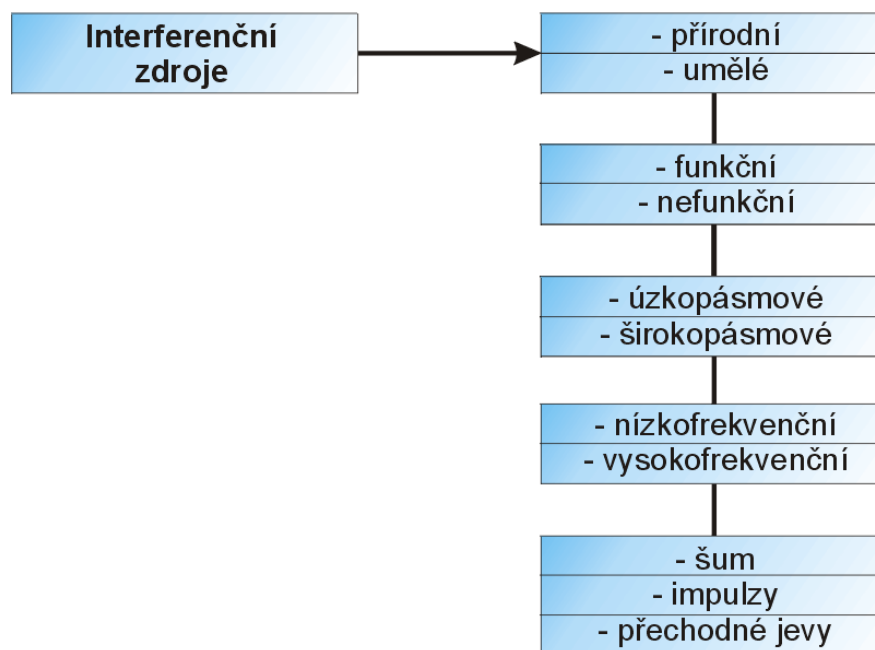
EMS se zabývá odstraňováním vlivů rušivých signálů pomocí různých technických opatření, například stíněním, užití různých filtrů, které zvyšují u zařízení elektromagnetickou odolnost vůči parazitnímu působení rušivých signálů.



Obr. 3. Zařízení vystavené rušivým zdrojům a jejich ochrana před těmito rušivými vlivy, U_r – rušivé napětí.

3 POPIŠTE ZDROJE RUŠIVÝCH SIGNÁLŮ A JEJICH VAZEBNÍ MECHANISMUSY PŘI PŘENOSU A ZPŮSOBY A PROSTŘEDKY K OMEZOVÁNÍ UVEDENÉHO RUŠENÍ

Zdroje elektromagnetického rušení neboli interferenční zdroje zastupují první blok v základním řetězci elektromagnetické kompatibility. Tyto zdroje generují rušivé signály, které mají mnoho podob a charakteristických znaků. Abychom se v široké škále zdrojů elektromagnetického rušení dobře orientovali, uvedl jsem níže základní klasifikaci interferenčních zdrojů.



Obr. 4. Základní klasifikace interferenčních zdrojů.

Přírodní interferenční zdroje - nelze předpokládat výskyt, mají transientní charakter (slunce, blesk).

Umělé interferenční zdroje - vytvořeny činností člověka, lze elektromagnetické rušení ve většině případů odstranit nebo aspoň omezit na přijatelnou úroveň (veškeré elektrotechnické či elektronické systémy a zařízení).

Funkční interferenční zdroje - zajišťují požadovanou funkci konkrétního systému, ale svou funkcí mohou ovlivnit funkčnost jiného systému (signály televizních či rozhlasových vysílačů, signály mobilních telefonů).

Nefunkční interferenční zdroje - zařízení, které při své činnosti je zdrojem parazitních signálů nejen pro svůj vlastní systém, ale i pro okolní systémy (napájecí zdroje systémů, řízené polovodičové měniče).

Úzkopásmové interferenční zdroje - jedná se hlavně o signály vysílačů určené pro mobilní operátory nebo pro radiové a televizní vysílání.

Širokopásmové interferenční zdroje - patří sem většina umělých i přírodních rušivých jevů.

Energetické nízkofrekvenční rušení - působí na elektrickou napájecí síť ve frekvenčním pásmu od 0 Hz do 2 kHz. V tomto pásmu dochází k deformaci průběhu střídavého elektrického napětí v důsledku změn výkonu odebíraného z rozvodné sítě spotřebiči, vyznačujícími se velkým odebíraným proudem (pohony s velkými výkony, obloukové pece). Deformace průběhu střídavého elektrického napětí se projevuje u zařízení, které potřebují pro svou činnost nenarušený tvar křivky napájecího elektrického napětí (osvětlení, ovládací a sdělovací systémy).

Akustické nízkofrekvenční rušení - působí do pásma, jehož nejvyšší kmitočet činí 9 kHz. Toto rušení produkují napájecí zdroje či nejrůznější radary. Například dochází k negativnímu ovlivňování informačních systémů, které jsou v tomto pásmu standardně provozovány.

Vysokofrekvenční rušení - se projevuje v pásmu od 9kHz do 400 GHz. Vysokofrekvenční rušení má oproti nízkofrekvenčnímu rušení rozdílný způsob šíření. Při vhodných podmínkách se může vysokofrekvenční rušivý signál šířit po vedení, které může zároveň využít jako vysílací anténu, díky níž se může rušivý signál volně šířit prostorem prostřednictvím elektromagnetických vln. Za zdroje vysokofrekvenčního rušení můžeme považovat spínané zdroje, vysokofrekvenční polovodičové měniče apod..

Rušivé signály generované umělými interferenčními zdroji můžeme obecně rozdělit podle povahy do třech kategorií:

Šum - má periodický charakter. Působí na tvar křivky napětí. Možnými zdroji šumu jsou svářečky či motory.

Impulsy - jsou krátkodobé rušivé signály, které se superponují na užitečný signál ve formě kladných nebo záporných špiček. Zdrojem těchto impulsů často bývají obvody, které zajišťují kontaktní spínání elektrických zařízení.

Přechodné jevy - jedná se o tzv. transientní rušivé signály ve formě impulsů s náhodnou dobou trvání od jednotek milisekund do několika sekund. Přechodné jevy vznikají například v napájecí soustavě, kde dochází k deformaci křivky napětí při připojování či odpojování elektrických zařízení velkých výkonů do rozvodné sítě.

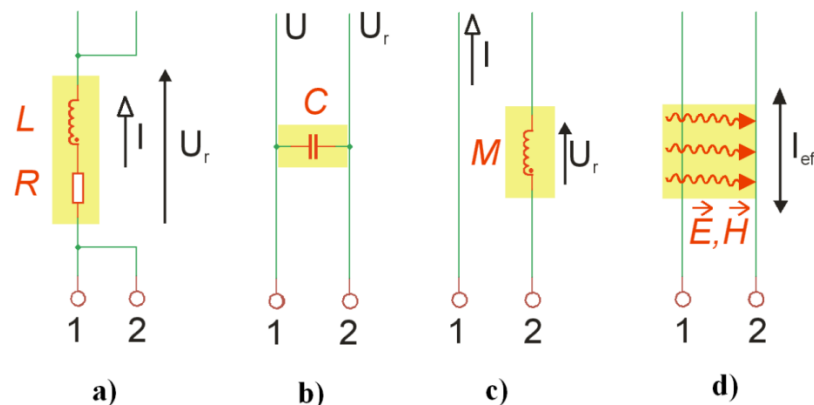
Výběr některých zdrojů rušení s charakteristickým rušivým kmitočtovým pásmem a způsobem šíření jejich rušivých signálů jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 4. Kmitočtové spektrum některých zdrojů rušení.

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
<u>koronový výboj</u>	0,1 Hz – 10 MHz	po vedení
klopné obvody	15 kHz – 400 MHz	prostorem

3.1 Vazební členy rušivých signálů

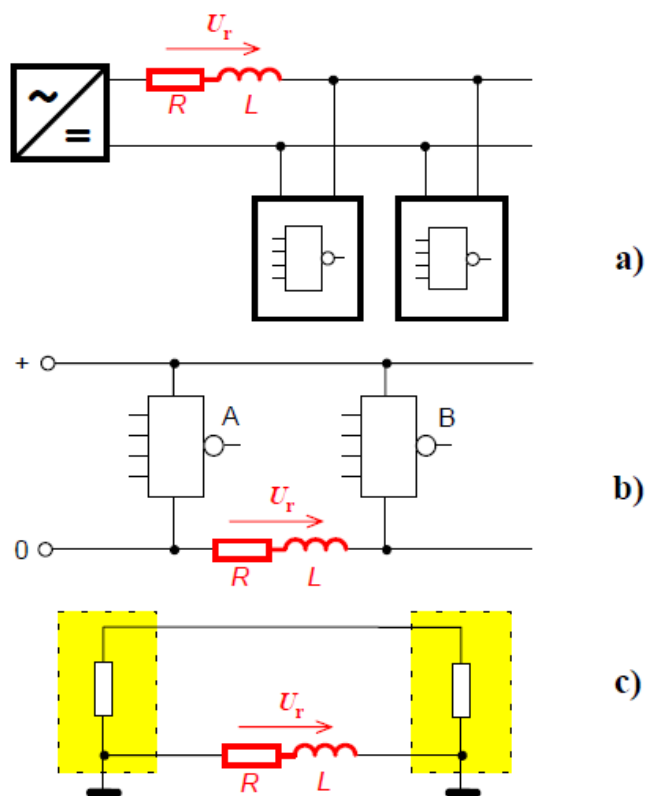
Základ pro šíření elektromagnetického rušení je dán vazbou, která má podle fyzikálních vlastností mnoho podob. Jednotlivé druhy vazebních členů jsou znázorněny na 5. obrázku.



Obr. 5. Elektromagnetická vazba: a) galvanická, b) kapacitní, c) induktivní, d) vyzařováním.

3.1.1 Galvanická vazba

Galvanická vazba představuje spojení dvou systému nebo bloků prostřednictvím společných úseků spojovacího vedení. Tedy pomocí společné impedance představující sériový obvod RL, na kterém je rušivé napětí U_r vznikající protékajícími proudy obou galvanicky spojených bloků. Na nižších kmitočtech v řádu kHz se v sériovém obvodu RL uplatňuje odporová složka R, na vyšších kmitočtech se projevuje spíše induktivní složka L. Na 6. obrázku vidíme možné varianty vzniku galvanické vazby společnou impedancí v napájecím vedení.

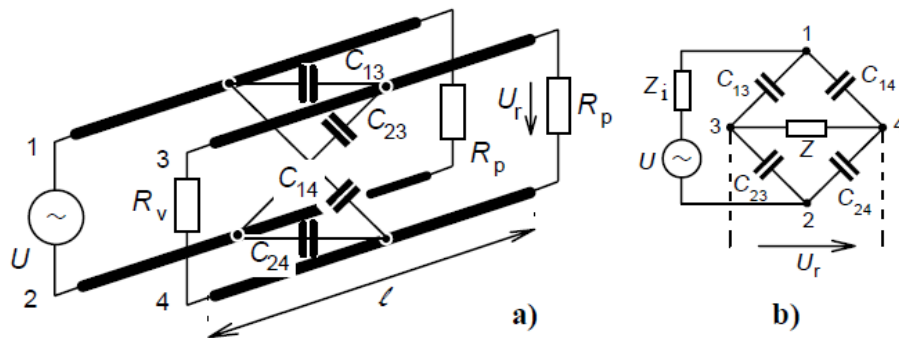


Obr. 6. Galvanická vazba společnou impedancí: a) v napájecím vedení, b) řídicím, c) zemnicím.[2]

3.1.2 Kapacitní vazba

Kapacitní vazba vzniká díky parazitní kapacitě vyskytující se mezi dvěma souběžně vedenými vodiči, například napájecími a signálovými vodiči nebo mezi jednotlivými částmi obvodů. Prakticky existuje nepřeberné množství parazitních kapacitních vazeb. Za zmínku stojí kapacitní vazba galvanickým oddělením obvodů a kapacitní vazba vůči zemi.

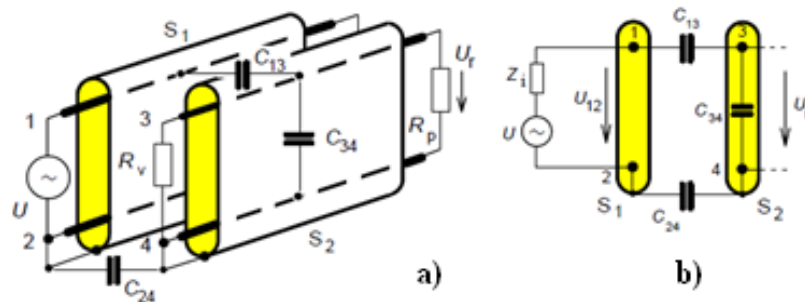
Kapacitní vazba galvanickým oddělením obvodů



Obr. 7. Nežádoucí kapacitní vazba galvanicky oddělených obvodů. [16]

Ze schématu je zřejmé, že výstupní rušivé napětí U_r rušeného obvodu bude nejmenší při vyvážení kapacitního můstku $C_{13} \approx C_{23}$ a $C_{14} \approx C_{24}$.

Vyvážení lze například dosáhnout vzájemným zkroucením obou párů vodičů 1, 2 a 3, 4.



Obr. 8. Zmenšení nežádoucí kapacitní vazby oboustranným stíněním.[16]

Z náhradního obvodu na 8. obrázku vyplývá, že velikost přeneseného rušivého napětí U_r je úměrná poměru kapacit C_{13}/C_{34} a C_{24}/C_{34} podle vztahu:

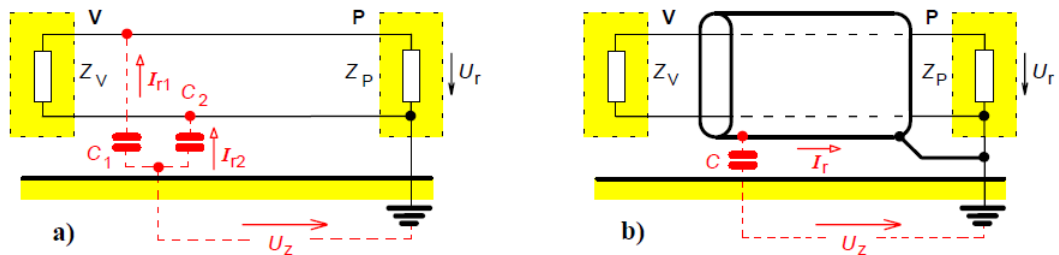
$$U_r = U_{12} \cdot \frac{1}{1 + C_{34}/C_{13} + C_{34}/C_{24}} \quad (1)$$

Ze vztahu je zřejmé, že stínicí účinek je tím lepší, čím větší je kapacita C_{34} mezi živým vodičem 3 rušeného obvodu a jeho stíněním ve srovnání s kapacitami C_{13} a C_{24} .

Parazitní kapacitní vazba vůči zemi

Tato vazba může vzniknout díky velké kapacitě vodičů vůči zemi, která díky rušivým proudům I_r přenáší rušivé napětí země U_z na stranu přijímače rušení ve formě napětí U_r . V případě využití stíněného přívodu odstraníme pouze nižší kmitočty rušivého signálu

z důvodu nedokonalé vodivosti stínění na vyšších kmitočtech. Díky těmto vlastnostem stínícího prvku nám vzniká rušivý proud I_r , který se dostává na vstup přijímače P.



Obr. 9. Parazitní kapacitní vazba: a) vůči zemi, b) odstranění parazitní kapacity vůči zemi.[2]

3.1.3 Induktivní vazba

Induktivní vazbu vytváří proměnné magnetické pole kolem primární cívky, kterou protéká elektrický proud. Pokud se v magnetickém poli nachází sekundární vodič, indukuje se v něm parazitní napětí U_r , jehož velikost je závislá na velikosti kmitočtu protékajícího proudu v primárním vodiči. Napětí U_r se vypočítá Faradayovým indukčním zákonem:

$$U_r = -\frac{d\Phi}{dt} \approx -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -S \cdot \frac{\Delta B}{\Delta t} = -\mu_0 \cdot S \cdot \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad (2)$$

$d\Phi$ – časová změna magnetického toku

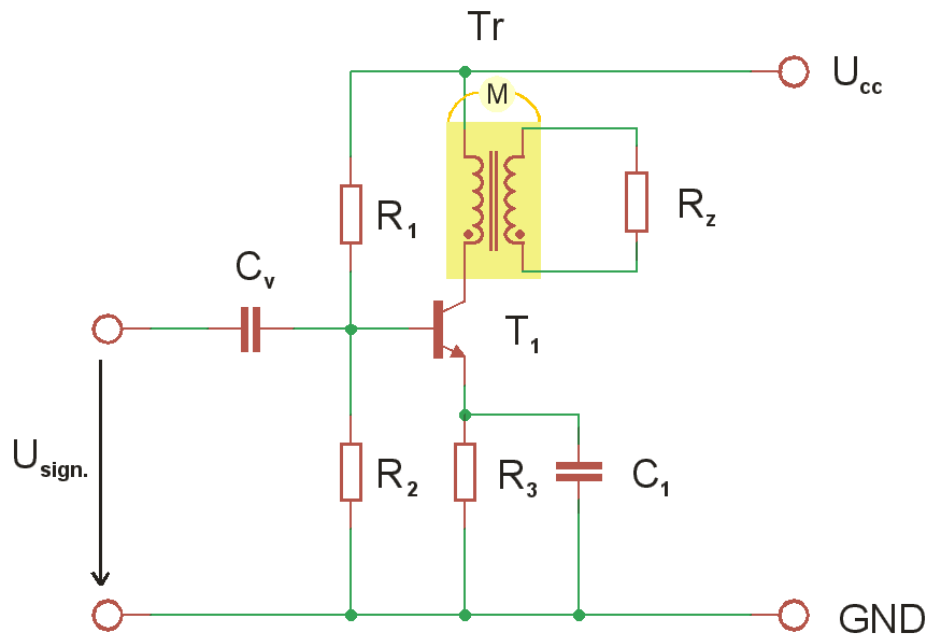
S – plocha smyčky, ve které se indukuje parazitní napětí U_r .

Předpokládáme kruhový průřez primárního vodiče, kolem něj je intenzita H ve vzdálenosti r , takže podle Ampérova zákona můžeme psát:

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (3)$$

Indukované napětí je dáno konečným vztahem:

$$U_r \approx -\frac{\mu_0 S}{2\pi r} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (4)$$



Obr. 10. Příklad indukční vazby M u výstupního transformátoru.

3.1.4 Elektromagnetická vazba

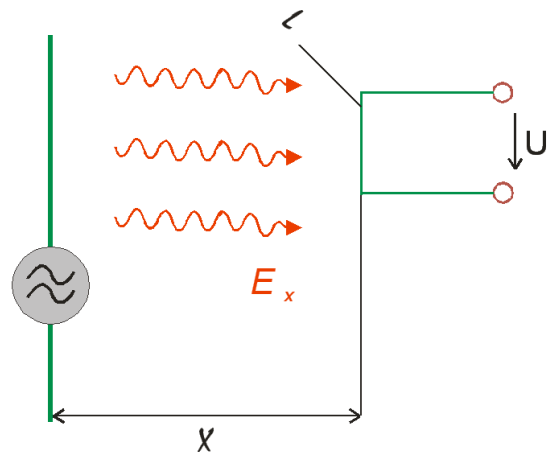
Tato vazba se projevuje na větší vzdálenosti, kde se neuplatňuje kapacitní či indukční vazba. Parazitní vliv elektromagnetické vazby mají elektromagnetické vlny, které jsou přírodními či umělými zdroji vyzářené určitým výkonem do prostředí a indukují ve vodičích přijímače parazitní napětí U_r , které se sčítá s užitečným signálem. Intenzita vzdáleného elektrického pole ($x \gg \lambda/2\pi$) ve vzdálenosti x od vysílače, který vysílá s výkonem P , lze vyjádřit vztahem:

$$E_x \approx 0,3 \cdot \frac{\sqrt{P}}{x} \quad [\text{V/m ; kW, km}] \quad (5)$$

Elektrické pole pak indukuje ve vodiči přijímače rušivé napětí:

$$U_r = E_x \cdot l_{ef} \quad (6)$$

l_{ef} (efektivní délka antény) – délka vodiče přijímače na který se indukují elektromagnetické vlny. Její hodnota závisí na tvaru a rozměrech antény přijímače a na vlnové délce (kmitočtu) přijímaného signálu.



Obr. 11. Působení elektromagnetické vazby.

3.2 Způsoby a prostředky k omezení uvedeného rušení

Technické odrušovací prostředky jsou určeny nejen pro potlačení rušivých signálů u jejich zdroje, ale i pro zvýšení odolnosti potenciálně rušených zařízení. Mezi odrušovací prostředky patří:

- odrušovací tlumivky a jednoprvkové tlumivkové filtry
- odrušovací kondenzátory a kondenzátorové filtry
- odrušovací filtry LC
- přepěťové ochranné prvky (bleskojistky, plynové výbojky)
- konstrukční stínící prvky

Důležité je vyzdvihnout, že **efektivní potlačení rušení závisí na aplikaci konkrétního odrušovacího prvku v závislosti na mnoha okolnostech**. Nejdůležitější je si uvědomit, **zda chceme omezit rušení šířící se vyzařováním do okolí nebo po vedení**.

3.2.1 Odrušovací tlumivky

Odrušovací tlumivky se vyznačují relativně velkými rozměry, které se odvíjejí od velikosti protékajícího proudu v proudových obvodech, ve kterých bývají zapojeny jako pasivní filtry. Pro názornost máme na 12. obrázku uvedené zapojení tlumivky mezi napájecí síť s impedancí Z_s , která je považována za zdroj rušení a vstup odrušovaného zařízení s impedancí Z_z . Vložný útlum v [dB] vypočítáme podle vztahu:

$$L = 20 \cdot \log \left| \frac{U_{20}}{U_2} \right| = 20 \cdot \log \left| 1 + \frac{j\omega L}{Z_s + Z_z} \right| \quad (7)$$

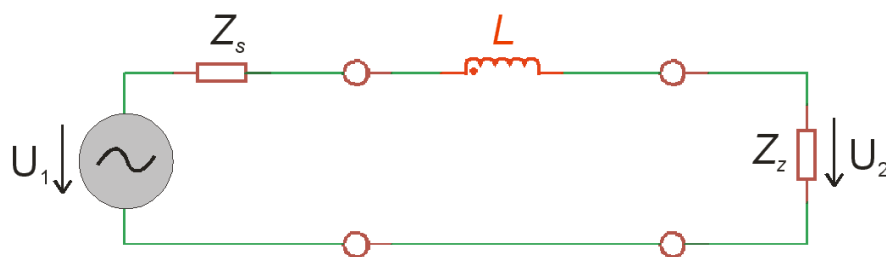
U_2 – napětí na výstupu filtru

U_{20} – napětí na straně zařízení bez filtru

Induktivní reaktance cívky představuje kmitočtově závislý odpor cívky, která je dána vztahem:

$$X_L = \omega L \quad [\Omega] \quad (8)$$

Z výše uvedeného vyplývá, že tlumivku můžeme použít pouze pro systémy s nízkou impedancí, která je menší než reaktance tlumivky ($Z_S + Z_Z \ll \omega L$).



Obr. 12. Zapojení odrušovací tlumivky do vedení.

3.2.2 Odrušovací kondenzátory

Odrušovací kondenzátor se vždy zapojuje paralelně a používá se samostatně nebo je součástí LC filtrů. Na 13. Obrázku je uvedeno paralelní zapojení odrušovacího kondenzátoru mezi napájecí síť s impedancí Z_s , která je považována za zdroj rušení a vstup odrušovaného zařízení s impedancí Z_z . Vložný útlum v [dB] vypočítáme vztahem:

$$C = 20 \cdot \log \left| \frac{U_{20}}{U_2} \right| = 20 \cdot \log \left| 1 + j\omega C \cdot \frac{Z_s \cdot Z_z}{Z_s + Z_z} \right| \quad (9)$$

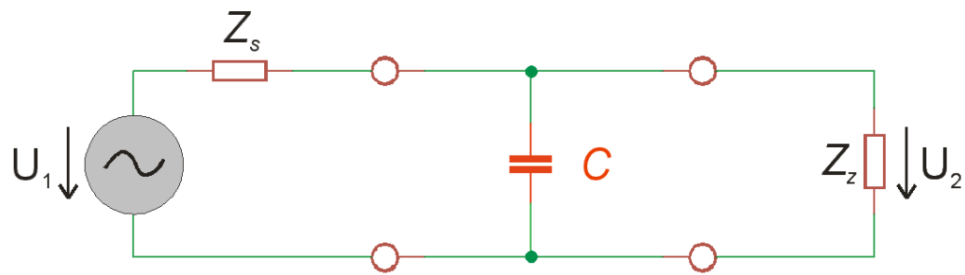
U_2 – napětí na výstupu jednovrstvého kondenzátorového filtru

U_{20} – napětí na straně zařízení bez filtru

Kapacitní reaktance kondenzátoru tvoří kmitočtově závislou impedanci, pro kterou platí vztah:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad [\Omega] \quad (10)$$

Efektivní využití kondenzátorového filtru je u systémů s vyšší impedancí, než je reaktance kondenzátoru. V opačném případě účinnost kondenzátorového filtru má klesající tendenci s klesající impedancí systému.



Obr. 13. Zapojení odrušovacího kondenzátoru do vedení.

Pro zajímavost uvádím v 5. Tabulce přibližné hodnoty kapacity odrušovacích kondenzátorů k daným kmitočtovým pásmům.

Tab. 5. Doporučené kapacity k odrušení daných kmitočtových pásem.

Kmitočtové pásmo [MHz]	Doporučené hodnoty odrušovacích kondenzátorů
10 kHz – 0,5 MHz	5 – 4 – 2 – 1 – 0,5 μF
0,5 – 6 MHz	0,5 – 0,25 – 0,1 μF
6 – 30 MHz	100 nF až 1000 pF
nad 30 MHz	méně než 1000 pF

3.2.3 Odrušovací filtry

Zde bych chtěl jen krátce zmínit, že odrušovací filtry v EMC slouží k odstranění rušení šířící se po vedení. Tyto filtry bývají složeny z více odrušovacích součástí nejčastěji v kombinaci LC (tlumivka, kondenzátor) nebo RC (rezistor, kondenzátor).

3.3 Stínění

Elektromagnetické stínění je jedním z nejdůležitějších odrušovacích prostředků EMC umožňujících jak zmenšení rušivého vyzařování na straně zdrojů rušivých signálů, tak i zvýšení elektromagnetické odolnosti na straně přijímačů rušivých signálů. Stínění je konstrukčním prostředkem k zeslabení pole rušivých signálů ve vymezené části prostoru. Technické prostředky (konstrukce), kterými dosahujeme uvedených cílů, nazýváme stínícími kryty či stíněním. Stínění se užívá k ochraně jak jednotlivých součástí a funkčních bloků, tak i celých elektronických zařízení, která mohou být současně zdroji i

přijímači elektromagnetického rušení. Stínění je jedním z vysoce efektivních způsobů elektromagnetické ochrany před výkonovým rušením kontinuálního či impulzního charakteru. Současně je třeba si uvědomit, že ke stínění každého zařízení by mělo být přikročeno vždy až po vyčerpání ostatních metod zajištění jeho elektromagnetické kompatibility, zejména metod optimálního návrhu a konstrukce zařízení z hlediska EMC.

[6]

3.3.1 Základní vlastnosti

Elektromagnetické stínění lze popsat koeficientem stínění K_S :

$$K_S = \frac{E_t}{E_i} \quad \text{nebo} \quad K_S = \frac{H_t}{H_i} \quad (11)$$

E_t – intenzita elektrického pole v daném bodě stíněného prostoru

H_t – intenzita magnetického pole v daném bodě stíněného prostoru

E_i – intenzita elektrického pole dopadající na stínící přepážku

H_i – intenzita magnetického pole dopadající na stínící přepážku

Účinnost stínění je dána logaritickým vyjádřením koeficientu stínění:

$$SE = 20 \cdot \log \frac{1}{|K_S|} = 20 \cdot \log \left| \frac{E_i}{E_t} \right| \quad \text{nebo} \quad SE = 20 \cdot \log \left| \frac{H_i}{H_t} \right| \quad [\text{dB}] \quad (12)$$

SE – útlum stínění (Shielding Effectiveness)

3.3.2 Rozbor účinnosti elektromagnetického stínění

Celková účinnost elektromagnetického stínění lze stanovit vztahem:

$$SE [\text{dB}] = R [\text{dB}] + A [\text{dB}] + M [\text{dB}] \quad (13)$$

R – útlum odrazem

A – útlum absorpcí

M – útlum zapříčiněný mnohonásobnými odrazy

3.3.3 Útlum odrazem

Útlum odrazem R se projevuje při částečném odrazu elektromagnetické vlny na rozhraní vzduch – stínící přepážka a stínící přepážka – vzduch, který tvoří dielektrikum. Útlum odrazem je vyjádřen vztahem:

$$R = 20 \cdot \log \left| \frac{(Z_0 + Z_M)^2}{4Z_0 Z_M} \right| \quad [\text{dB}] \quad (14)$$

Z_0 – impedance mezi vzduchem a kovovou stínící přepážkou

Z_M – impedance na rozhraní stínící přepážky a vzduchu (dielektrika)

3.3.4 Útlum absorpcí

Útlum absorpcí je charakterizován vstřebáním části elektromagnetické vlny během průchodu kovovou stínící plochou. Velikost útlumu především závisí na druhu a tloušťce materiálu, ze kterého je stínící přepážka vyrobena. Pro absorbovaný útlum platí:

$$A = 20 \cdot \log |e^{\gamma t}| = 20 \cdot \log e^{\alpha t} = 20 \cdot \log e^{\frac{t}{\delta}} \quad [\text{dB}] \quad (15)$$

Kde:

t – tloušťka kovové stínící přepážky

γ – vlnové číslo rovinné elektromagnetické vlny ve vodivém prostředí stínící přepážky je vyjádřeno vztahem:

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu\sigma} = (1 + j) \cdot \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} = \alpha + j\beta \quad (16)$$

δ – hloubka průniku elektromagnetické vlny do kovové stínící přepážky lze vyjádřit vztahem:

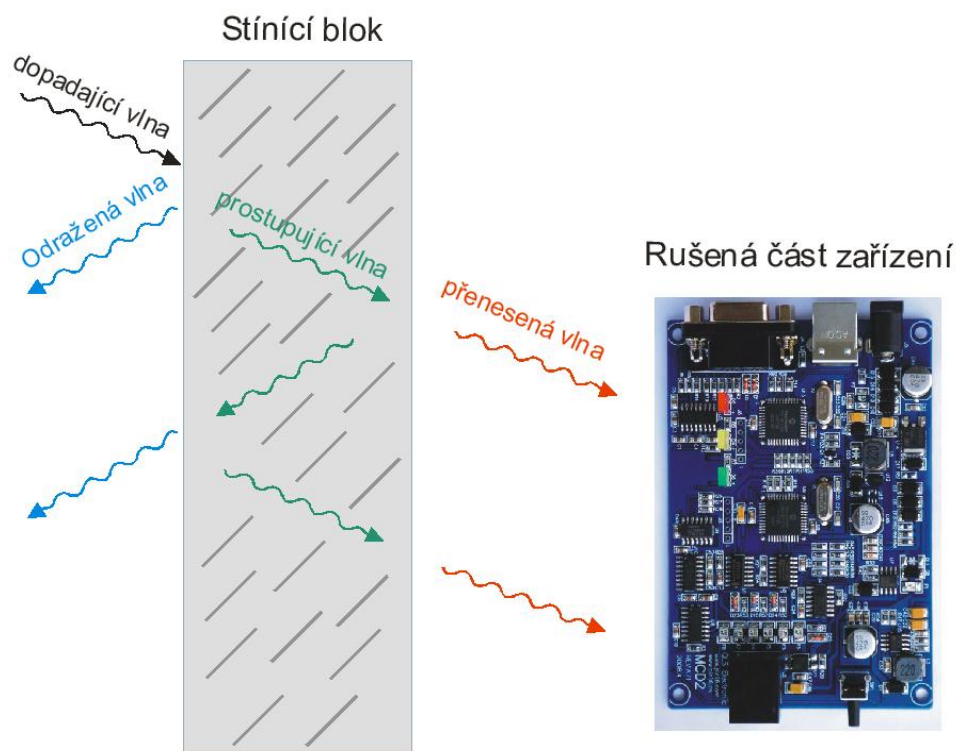
$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (17)$$

3.3.5 Útlum zapříčiněný mnohonásobnými odrazy

Při dopadu elektromagnetických vln na stínící přepážku, jak je naznačeno na 14. obrázku, vznikají mnohonásobné odrazy, které mají významný vliv na celkový útlum stínící plochy.

Velikost útlumu mnohonásobnými odrazy je vyjádřena vztahem:

$$M = 20 \cdot \log \left| 1 - \left(\frac{Z_0 - Z_M}{Z_0 + Z_M} \right)^2 \cdot e^{-\frac{2t}{\delta}} \cdot e^{-j\frac{2t}{\delta}} \right| \quad [\text{dB}] \quad (18)$$

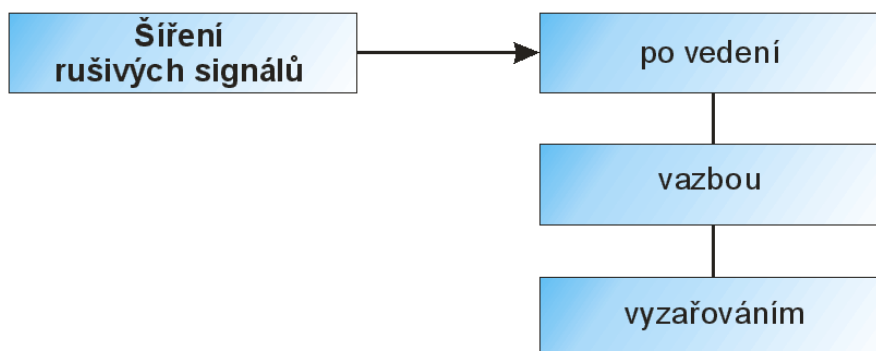


Obr. 14. Mnohonásobné odrazy vznikající na stínícím bloku.

4 POPIŠTE PODROBNĚ METODY MĚŘENÍ A VYHODNOCOVÁNÍ ELEKTROMAGNETICKÉ INTERFERENCE A ELEKTROMAGNETICKÉ SUSCEPTIBILITY

Problematika měření rušivých signálů je jednou ze základních součástí elektromagnetické kompatibility, která ověřuje míru interference zkoušených zařízení použitím vhodných metod a principů měření u kterých je dobré si uvědomit, že měřicí či měřené zařízení může zároveň být vysílačem tak i přijímačem rušivého signálu a tím následně může dojít ke zkreslení výsledků měření.

Použitá metoda měření elektromagnetické interference se odvíjí od charakteru šíření rušivých signálů. V praxi se setkáváme se třemi způsoby šíření rušivých signálů:

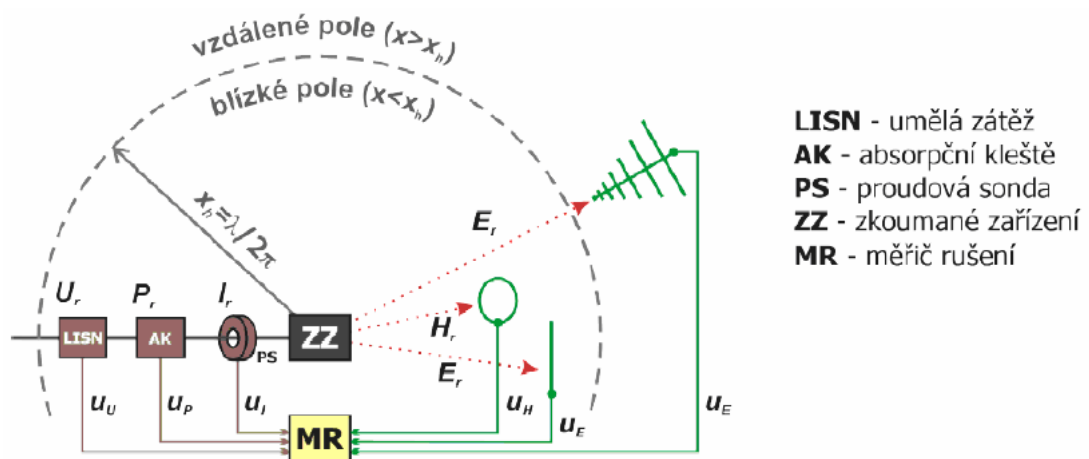


Obr. 15. Způsoby šíření rušivých elektromagnetických signálů.

Šíření rušivých signálů vedením – rušivé signály se mohou šířit například po napájecím či řídicím vedení ve formě rušivého napětí U_r , proudu I_r nebo rušivého výkonu P_r .

Šíření rušivých signálů vazbou – vzniká mezi blízkými objekty pomocí elektrického nebo magnetického pole. Předmětem zájmu je zde parazitní intenzita elektrického E_r nebo magnetického pole H_r .

Šíření rušivých signálů vyzařováním – jedná se zde opět o měření elektromagnetického rušení složek E_r , H_r či výkonu P_r vyšších kmitočtů, které jsou vyzářeny do prostoru a projevují se u vzdálených zařízení od zdroje rušení.



Obr. 16. Způsoby měření rušení vedením a vyzářováním.[6]

Aby měření proběhlo bez rušivých vlivů okolního prostředí, je nutné použití nejen kvalitní přístrojové vybavení, ale je důležité zajistit i vhodné uspořádání měřicího pracoviště a jeho nejbližšího okolí.

4.1 Šíření interferenčních signálů po vedení

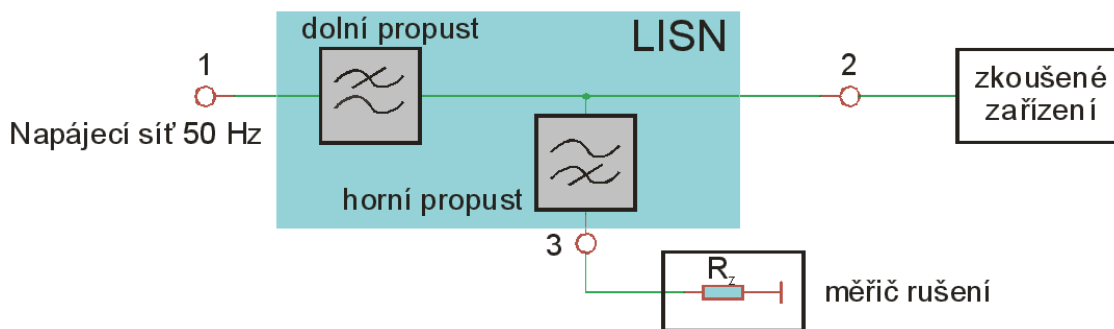
Pro měření rušení šířící se prostřednictvím vedení se využívají metody:

- měření s umělou zátěží vedení
- měření s napěťovou sondou
- měření s proudovou sondou
- měření s absorpčními kleštěmi

4.1.1 Měření s umělou zátěží vedení

Umělá zátěž vedení (LISN) se používá k měření rušivého signálu vznikající ve zkoumaném zařízení a následně šířící se po napájecím vedení. U umělé zátěže vedení jsou nejdůležitější dolní a horní pásmové propusti.

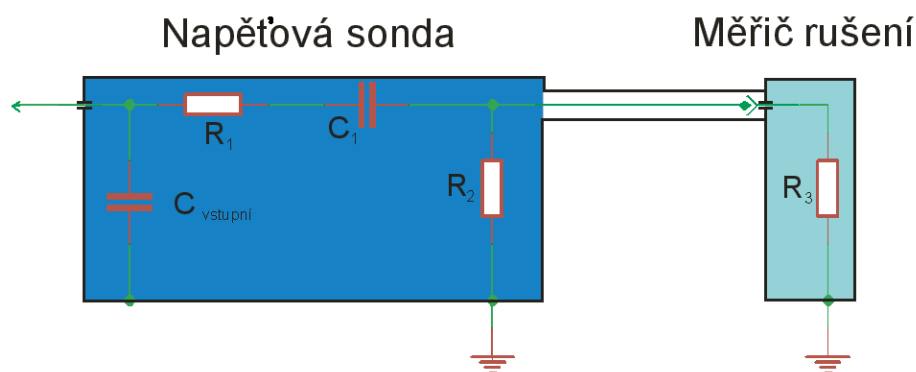
- Dolní pásmová propust zabraňuje před nežádoucím ovlivňováním měření vysokofrekvenčními rušivými signály přicházející z napájecí sítě.
- Horní pásmová propust umožňuje přivést na vstup měřiče rušení jen vysokofrekvenční signály, které vznikají ve zkoušeném zařízení.



Obr. 17. Blokové schéma pro měření rušení s umělou zátěží vedení.

4.1.2 Napěťová sonda

Jak název napovídá, tato sonda se využívá k měření rušivého napětí, které je snímáno přímo z daného měřícího bodu ve zkoušeném zařízení. Na 18. obrázku je schéma napěťové sondy, která je tvořena kapacitně vázaným odporovým děličem napětí.

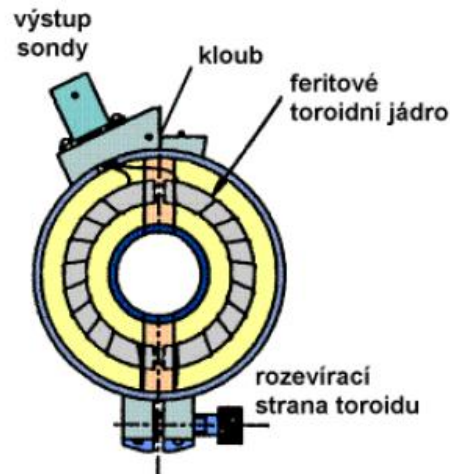


Obr. 18. Schéma zapojení napěťové sondy.

Rád bych na závěr poznamenal, že velká přednost napěťové sondy spočívá ve vysoké vstupní impedanci, která umožňuje bezproblémové měření rušivých vysokofrekvenčních napětí. Maximální vstupní střídavé napětí uvedené napěťové sondy je 250 V a zároveň dokáže zpracovat rušivé napětí s počáteční hodnotou 60 dB μ V.

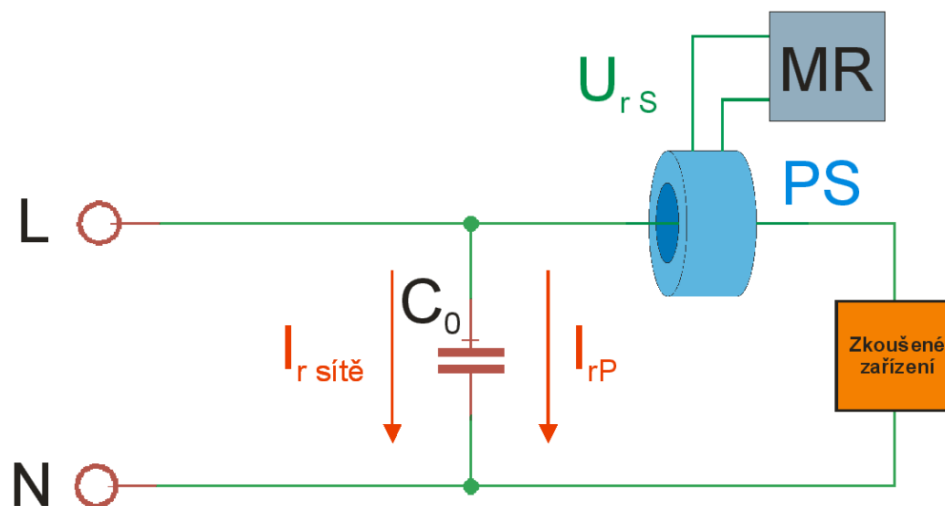
4.1.3 Proudová sonda

Proudová sonda se vyrábí ve formě klešťového proudového transformátoru, který při měření obepíná vodič, jímž protéká rušivý proud. Jak víme, transformátor se skládá s primárního a sekundárního vinutí. V případě proudové transformátorové sondy představuje primární jednozávitové vinutí měřený vodič a sekundární vinutí je tvořeno toroidním transformátorem proudové sondy. V praxi proudové sondy jsou schopny měřit rušivé proudy v rozsahu od 30 Hz do 100 MHz, výjimečně až do 1000 MHz.



Obr. 19. Konstrukce proudové sondy.[6]

Způsob měření proudovou širokopásmovou vysokofrekvenční sondou je naznačeno na 20. obrázku.



Obr. 20. Měření rušivého proudu proudovou sondou.

C_0 – kondenzátor zkratuje vysokofrekvenční rušivé signály vycházející ze strany napájecí sítě, tak i ze strany měřeného zařízení.

I_{rP} – měřený rušivý proud je sekundárním vinutím proudové sondy převeden na napětí U_{rS}

.

I_r – střídavý elektrický proud napájecí sítě

U_{rS} – rušivé napětí sondy

L – fázový (živý) vodič napájecí sítě

N – nulový (neživý) vodič napájecí sítě

MR – měřicí zařízení zpracující napětí U_{rS}

PS – proudová sonda



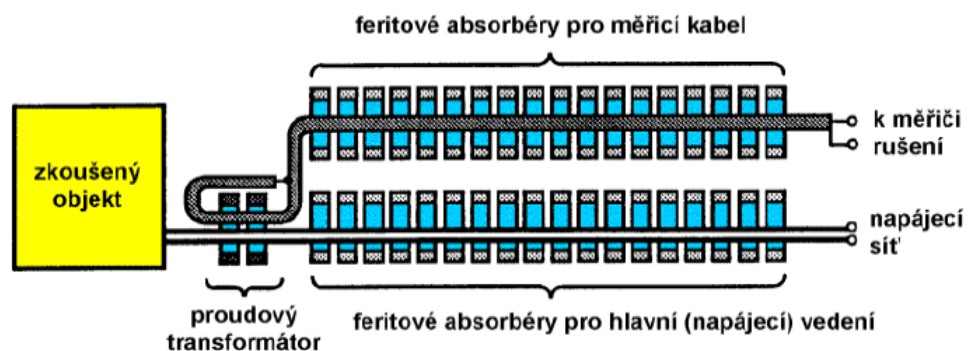
Obr. 21. Proudové sondy při měření rušivého proudu.[12]

4.1.4 Absorpční kleště

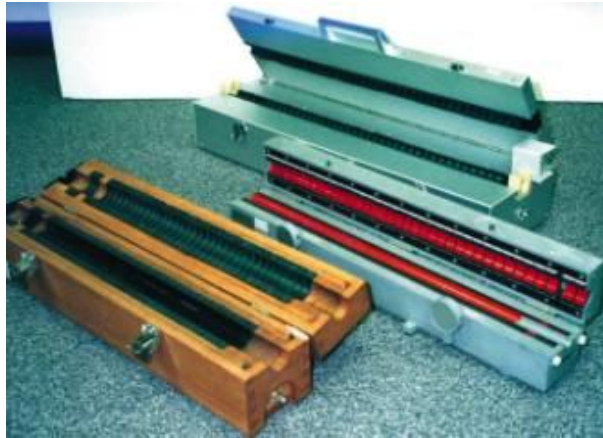
Absorpční kleště slouží k měření výkonu rušivého signálu P_r vyzařovaného z vodičů u zkoušeného zařízení ve frekvenčním pásmu 30 až 1000 MHz. Po konstrukční stránce se absorpční kleště skládají ze dvou systémů:

- vysokofrekvenčního širokopásmového proudového transformátoru
- feritového absorbéru

Základ feritového absorbéru tvoří feritové kroužky, které obklopují podle 22. Obrázku napájecí (zkoušený) vodič a vstupní vodič měřicího zařízení. Hlavní funkce feritových kroužků je nejen **zajištění absorpce vysokofrekvenčních rušivých proudů** vyskytující se na povrchu vodičů, ale i **impedanční přizpůsobení vedení** k vysokofrekvenčním signálům.



Obr. 22. Konstrukce absorpčních kleští.[13]



Obr. 23. Absorpční kleště.[14]

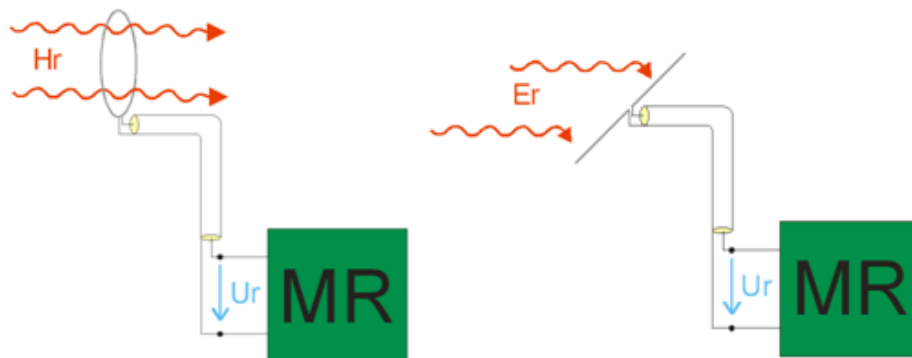
4.2 Měřicí antény

Rušivé signály pohybující se od kmitočtu 9 kHz až do desítek GHz, které jsou do okolního prostředí vyzařovány pomocí elektromagnetických vln, se dají zachytit pomocí různých typů měřících antén. Využití konkrétního typu měřící antény závisí na měřeném kmitočtovém pásmu, jak vyplývá z následující tabulky.

Tab. 6. Přehled měřících antén pro systém EMI.

Druhy antény	Rozsah kmitočtů [MHz]	Měřená složka
Rámová anténa	0,009 – 30	H
Prutová anténa	0,009 – 30	E
Symetrický dipól	30 – 1000	E
Bikónická anténa	20 – 300	E
Logaritmicko – periodická anténa	200 – 3000	E
Kónicko-logaritmická anténa	200 – 3000	E
Složená širokopásmová anténa	30 – 2000	E
Trychtýřová anténa	1000 – 40000	E, H

Měřicí antény, které se uplatní při měření EMI a EMS, měří složku magnetickou H_r nebo elektrickou E_r . Složky jsou dále anténou lineárně přetransformovány na napětí U_r , které se přivádí do měřiče rušení k dalšímu zpracování.



Obr. 24. Měření magnetické a elektrické složky.

Závislost výstupního napětí antény U_r na vstupní intenzitě elektrického pole E_r je dána vztahem:

$$AF = \frac{E_r}{U_r} \quad [1/m ; V/m, V] \quad (19)$$

AF představuje **anténní faktor**¹, který se častěji vyjadřuje v logaritmickém tvaru:

$$AF [dB/m] = E_r [dB/m] - U_r [dBV] \quad (20)$$

Pro magnetické pole H_r platí:

$$AF_H [dBS/m] = H_r [dBA/m] - U_r [dBV] \quad (21)$$

4.2.1 Rámová anténa

Využívá se pro měření magnetické složky H_r rušivých signálů v kmitočtovém pásmu 9 kHz až 150 kHz. Po konstrukční stránce je rámová anténa tvořena kovovou smyčkou, která může mít maximální rozměry 600 x 600 mm a anténní cívkou, která je uzavřena do stínícího bloku zajišťující ochranu před rušivými vlivy elektrické složky. Rámové antény se dělí na:

- Pasivní
- Aktivní obsahující měřicí zesilovače.

¹ Anténní faktor AF (občas označovaný jako **přijímací anténní faktor**) je základním parametrem každé antény pro EMC, současně jeho kmitočtový průběh je základním údajem výrobce antény.



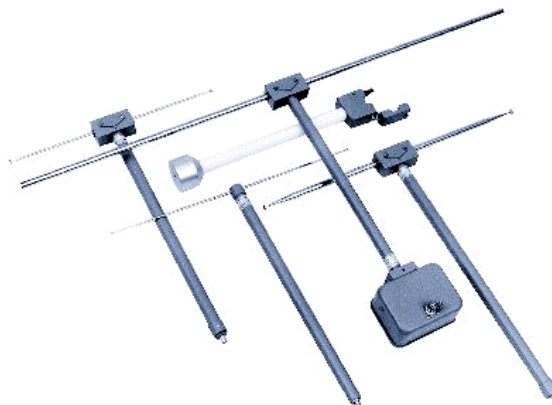
Obr. 25. Rámová anténa.[6]

4.2.2 Prutová anténa

Rušivé elektrické pole E_r v kmitočtovém pásmu 150 kHz – 30 MHz lze přijímat vertikální prutovou anténou. Základ antény tvoří tyč o ideální délce 1m. Prutová anténa nelze použít pro měření blízkého elektrického pole E_r z důvodu vzniku rušivé přímé kapacitní vazby mezi zdrojem rušení a rámovou anténou.

4.2.3 Symetrický půlvlnný dipól

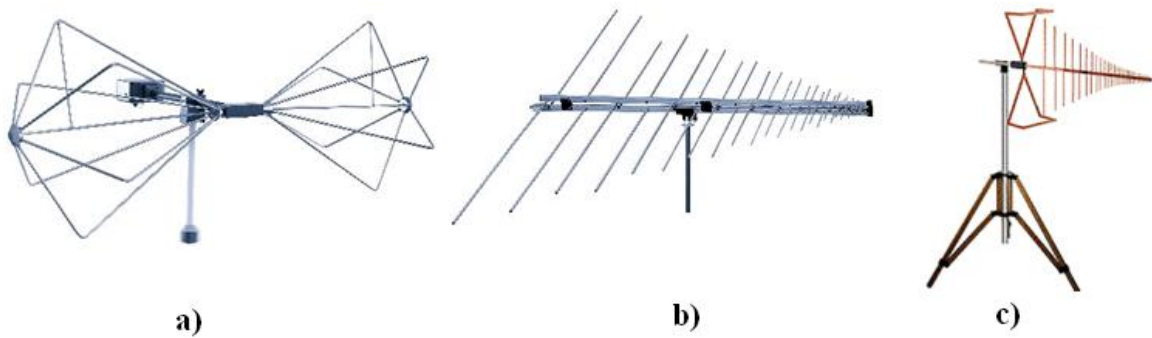
Symetrický dipól je schopen přijímat rušivé signály v kmitočtovém pásmu 30 MHz až 1 GHz. Symetrický znamená, že dipól je složen ze dvou stejně dlouhých ramen, které přijímají rušivé signály ve formě elektrické složky E_r . Samostatný symetrický půlvlnný dipól je určen pouze pro laboratorní měření kvůli jeho malé efektivní výšce.



Obr. 26. Symetrický půlvlnný dipól.[6]

4.2.4 Složená širokopásmová anténa

Pro efektivní měření EMI je nejideálnější použít jedinou anténu, která dokáže zachytit rušivé signály ve velmi širokém pásmu kmitočtů od 30 MHz až do 2 GHz. Pro tyto účely jsou určeny složené širokopásmové antény spojující vlastnosti bikónické a logaritmicke – periodické antény.



Obr. 27. Širokopásmové antény: a) bikónická anténa 30 – 300 MHz; b) logaritmicke-periodická anténa 200 – 1000 MHz; c) Složená širokopásmová anténa typu „Bilog“ pro pásmo 30 – 2000 MHz.[2]

4.2.5 Trychtýřová anténa

Pro měření gigahertzových kmitočtů jsou určeny trychtýřové antény, které mají poměrně úzkopásmovou charakteristiku. Z tohoto důvodu se tyto antény při měření používají v sadě 8 až 10 antén a každé anténě v sadě je přidělen určitý kmitočtový rozsah.



Obr. 28. Soustava trychtýřových antén.[2]

4.3 Přístroje pro měření rušivých signálů

Výše uvedené sondy a antény zachycují rušivý signál a převádí jej na vhodnou veličinu, která se díky připojenému přístroji určený pro měření rušivých signálů dále zpracovává, vyhodnocuje a graficky znázorňuje. V 99% rušivých signálů se v praxi měří rušivé signály s neharmonickým průběhem, které obsahují ve svém kmitočtovém pásmu velké množství složek, a proto výsledky měření jsou velice závislé na vlastnostech měřicího přístroje, které vyplývají z normy ČSN CISPR 16-1.

Pro měření elektromagnetické interference se používají:

- spektrální analyzátoři
- selektivní μV -metr
- speciální měřicí přijímač pracující s kmitočtem od 9 kHz do 2 GHz

Z výše uvedených měřicích zařízení se nejvíce využívají pro svou oblíbenost spektrální analyzátoři, protože vynikají rychlostí měření s následným vizuálním zobrazením kmitočtového spektra, širokou škálou funkcí a relativně nízkou cenou.

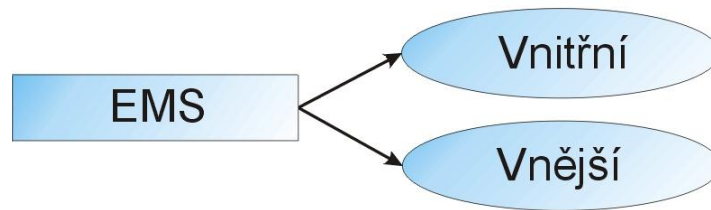


Obr. 29. Spektrální analyzátor Agilent N1996A.[15]

4.4 Elektromagnetická odolnost

Elektromagnetická odolnost (citlivost EMS) tvoří druhou část zkoumání elektromagnetické kompatibility technických systémů. Úkolem elektromagnetické odolnosti je zajistit, aby systém byl schopen své správné funkce za přítomnosti rušivých signálů působících zevnitř systému či z vnějšího okolí.

EMS rozdělujeme na dvě základní části:



Obr. 30. Základní rozdělení EMS.

Vnitřní EMS – představuje odolnost proti elektromagnetickým zdrojům rušení nacházející se v testovaném systému, závisí hlavně na technologických vlastnostech subsystémů, například:

- umístění stínících bloků
- rozložení pasivních a aktivních obvodů
- trasy kabeláže
- umístění zdroje napájení apod.

Vnější EMS – znamená odolnost systému vůči vnějším elektromagnetickým zdrojům rušení. Existuje velké množství vnějších rušivých vlivů, a proto při testování vnější odolnosti systému zkoumáme pouze takové zdroje elektromagnetického rušení, které jsou pro zkoumaný systém nejpravděpodobnější a nejnebezpečnější. Maximální hranice vnější odolnosti je dána charakteristikou konkrétního rušení a prostředím, pro které je zařízení určeno.

Problematiku EMS dále členíme podle druhu systému do třech kategorií:

Rozlehlé systémy – systém je tvořen subsystémy, mezi nimiž může být vzdálenost až několik kilometrů. Z hlediska vnitřní odolnosti můžou jednotlivé subsystémy svou činností vnášet do systému rušivé signály. Vnější odolnost je ohrožována atmosférickými vlivy, popřípadě energetickou rozvodnou sítí. Jako příklad rozlehlého systému může posloužit síť mobilních operátorů skládající se z vysílačů a retranslačních stanic.

Lokální systémy – jsou situovány do budov či místností. Zdroje rušení zde představují kabelové rozvody pro napájení cizích systémů, které se také dají považovat za zdroje vnějšího rušení. Vše je uvažováno v rámci budovy či místnosti.

Systémy přístrojového typu – zde zařazujeme přístroje spotřební elektroniky, měřicí přístroje apod., které reprezentují individuální kompaktní celky.

Pro posouzení celkové elektromagnetické odolnosti systému platí tři základní systémová pravidla:[6]

1. Interní elektromagnetická odolnost systému je závislá na interní odolnosti jeho subsystémů.
2. Výsledná interní elektromagnetická odolnost elektronického systému je určena odolností jeho „nejslabšího článku“, tj. subsystému s nejnižší vlastní elektromagnetickou odolností.
3. Výsledná externí elektromagnetická odolnost systému může záviset na jeho interní odolnosti, neboť může dojít ke skládání rušivých vlivů, a tím ke snížení celkové odolnosti systému.

4.4.1 Obecná metodika testování elektromagnetické odolnosti zařízení

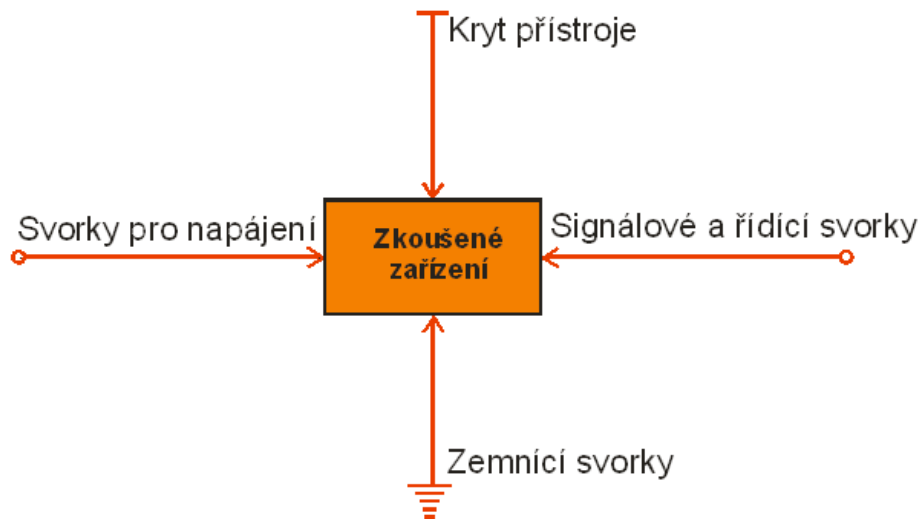
Každé testování elektromagnetické odolnosti se provádí v prostorech, které jsou pro testování odolnosti přizpůsobeny, kde se bere na zřetel upořádání a možnost využití různých simulátorů elektromagnetického rušení.

Před testováním elektromagnetické odolnosti musíme u konkrétního zařízení určit tyto předpoklady:

- rušivé elektromagnetické vlivy, které se vyskytují v prostředí, pro které je dané zařízení určeno
- potenciální vstupní části rušivých vlivů
- třída odolnosti, kterou bude dané zařízení splňovat

U stanovení druhu rušivých signálů musíme brát na zřetel, které rušivé vlivy mohou mít největší vliv na správnou funkci zařízení. Odolnost zařízení se musí prokázat během všech funkčních režimů, které lze na zařízení nastavit.

Během testování elektromagnetické odolnosti se musíme rovněž zaměřit na potenciální vstupní části nežádoucích rušivých signálů. Jak 31. obrázek napovídá, mezi možné brány vstupu rušivých signálů zařazujeme napájecí, signálové či řídicí svorky, ale i kryt přístroje.



Obr. 31. Základní druhy vstupních signálů do zkoušeného zařízení.

Třída odolnosti vychází z normy ČSN EN 61000-4, která stanovuje pět úrovní elektromagnetické odolnosti v závislosti na elektromagnetickém prostředí. Pro zjednodušení lze říci, že zařízení pracující v prostředí se standardními rušivými vlivy, například byty, kanceláře se kategorizují do nižší úrovně odolnosti. Naopak zařízení pracující v průmyslu, kde se předpokládá výskyt velkého množství rušivých signálů, spadají do nejvyšší třídy odolnosti.

5 UVEĎTE PROBLEMATIKU NORMALIZACE V OBLASTI EMC

5.1 Evropská legislativa EMC

Když Evropská unie 1. 1. 1993 otevřela trh s volným pohybem osob, zboží a služeb mezi členskými státy Evropské Unie, bylo podmínkou, aby členské státy Evropské unie měly splněnou harmonizaci své legislativy dle doporučení Rady EU.

Směrnice Rady EU, která se týká elektromagnetické kompatibility č. 89/336/EEC zajišťuje sbližování technických norem elektromagnetické kompatibility (dále jen EMC) jednotlivých členských států. Technická norma představuje soubor doporučených nařízení, které by měl výrobek splňovat, aby mohl být distribuován nejen na trhu dané země, ale i na evropských i světových trzích. Technická norma klade velký důraz na kvalitu, slučitelnost, bezpečnost zařízení či systému za účelem ochrany zdraví a života osob nebo životního prostředí.

Je důležité podotknout, že technická norma není pro výrobce závazná, má pouze doporučující charakter. Výrobce, který usiluje o to, aby jeho elektrotechnické výrobky byly konkurenceschopné, musí jako základ brát v potaz splnění technických norem, které jsou platné na území daného státu, na jehož trhu je výrobek distribuován.

5.2 Legislativa v České republice

Legislativa týkající se EMC je v České republice ošetřena zákonem 22/1997 Sb., o technických požadavcích na výrobky, který nabyl platnosti 1.9.1997. Tento zákon byl od jeho platnosti několikrát novelizován a doplněn zákony **71/2000 Sb., 102/2001 Sb., 205/2002 Sb., 226/2003 Sb., 277/2003 Sb., 229/2006 Sb., 186/2006 Sb., 481/2008 Sb., 490/2009 Sb., 155/2010 Sb.** Na zákon 22/1997 Sb. navazuje nařízení vlády 169/1997 Sb., kterým se stanoví technické požadavky na výrobky z hlediska jejich EMC v pozdějším znění nařízení vlády č. 282/2000 Sb. Uvedená nařízení vlády č. 169/1997 Sb. a 282/2000 Sb. se již v základních rysech shodují se Směrnicí Rady Evropské unie č. 89/336/EEC.

5.3 Mezinárodní normalizační orgány

Mezi nejvýznamnější normalizační ústav řadíme **Mezinárodní elektrotechnickou komisi ICE (International Electrotechnical Committee)**, která vytváří veškeré elektrotechnické normy a předpisy. Jak název napovídá, **ICE** se problematikou norem zabývá na

mezinárodní úrovni a s celosvětovou působností. Její činnosti je řízena a koordinována **Mezinárodní organizací pro normalizaci ISO** (International Standard Organization).

ICE se člení podle oborů do několika technických komisí a subkomisí. Mezi komise, které se zabývají problematikou EMC, jsou následující:

- TC 41
- TC 65
- TC 77

Velký význam v oblasti EMC má komise TC 77, která zpracovává základní dokumenty řešící elektromagnetickou interferenci, susceptibilitu mezi elektrickými zařízeními, měřicí techniku, postupy apod.

Pod záštitou **ICE** se normami z oblasti EMC věnuje zvláštní mezinárodní komise **CISPR** (Comité International Spécial des Perturbations Radioelectriques). Od 60 let minulého století se věnuje tvorbě televizních a radiových standardů. V současnosti se zabývá rušením, které způsobuje zařízení výpočetní techniky.



Obr. 32. Logo ICE a ISO.[6]

5.4 Evropské normalizační orgány

V rámci Evropské unie existují tři nejvýznamnější normalizační orgány. Jejich úkolem je tvorba evropských norem a evropských technických specifikací. Svou činností pomáhají evropské normalizační orgány ke správnému fungování a upevňování vnitřního trhu Evropské unie a ke zvyšování její konkurenceschopnosti. Mezi normalizační orgány Evropské unie patří:

- **CEN** - Evropský výbor pro normalizaci (Comité Européen de Normalisation),
- **CENELEC** - Evropský výbor pro normalizaci v elektrotechnice (Comité Européen de Normalisation Electrotechnique)
- **ETSI** - Evropský ústav pro telekomunikační normy (European Telecommunications Standards Institute).

5.4.1 CEN & CENELEC

Obě tyto komise, které jsou součástí evropské unie a společně se zabývají technickou přípravou evropských norem EN. **CEN a CENELEC** jsou vytvořeny z normalizačních organizací každého členského státu a ze států Evropského sdružení volného obchodu **EFTA** (European Free Trade Association).



Obr. 33. Logo CEN a CENELEC.[6]

5.4.2 ETSI

Evropský institut pro normalizaci v telekomunikacích vytváří své normy určené pro oblast spojovací techniky. Normy EMC v **ETSI** zpracovává technická komise TC-EE 4 pod označením **ETS**.



Obr. 34. Logo ETSI.[6]

5.5 Normalizační orgány v České republice

V České republice je prací v oblasti všech norem pověřen Český normalizační institut **ČNI** v Praze. Jeho technická normalizační komise **TNK 47** zabývající se problematikou EMC, postupně reviduje existující české normy **ČSN** v oblasti EMC a harmonizuje je s normami **IEC**, **CISPR** a **EN**. Přebíráním a překladem těchto světových a evropských norem tak vznikají harmonizované normy **ČSN** s označením **ČSN IEC**, **ČSN CISPR** či **ČSN EN**.
Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.



Obr. 35. Logo ČSI.[6]

5.6 Civilní normy EMC

V oblasti civilních norem má důležité postavení **CENELEC**, jehož komise TC 110 přebírá na základě dohody od **ICE** existující normy s označením **ICE** a **ICE CISPR** a zároveň **ICE** předkládá návrhy na vypracovávání nových norem, které se dělí do tří skupin:

Základní normy (Basic standards) – stanovují pouze všeobecné podmínky pro dosažení EMC libovolného technického zařízení.

Kmenové normy (Generic standards) – stanovují minimální soubor požadavků a metod pro testování EMC u veškerých technických zařízení dle typu elektromagnetického prostředí.

Předmětové normy (Product standards) – určují podrobné požadavky a testovací metody EMC pro konkrétní technické zařízení a skupiny podobných zařízení, například:

- Zařízení informační techniky a telekomunikační zařízení
- Dopravní a podobná zařízení
- Lékařská zařízení

Výše uvedené normy lze dále rozčlenit na závazné a doporučené:

Závazné normy (Regulatory, mandatory standards) - mají povahu zákona, tzn., že výroba a prodej výrobků, které nesplňují tyto normy je nelegální. V Evropské unii patří mezi závazné normy Směrnice Rady Evropské unie č. 89/336/EEC. Zásady, které směrnice obsahuje, musí být respektovány.

Doporučené normy (Voluntary standards) - mají pouze doporučený charakter, ale ve skutečnosti mají stejný vliv jako závazné normy. Doporučené normy vznikají ve spolupráci s výrobcem zařízení a normalizační organizací.

5.7 Vojské normy EMC

Vojské normy jsou užívány ve vojské sféře a po stránce historické představují první normy a předpisy týkající se EMC. Vojské normy byly z počátku dlouhou dobu jako jediné normy EMC používané v civilním sektoru, které se zabývaly testováním imunity. Z vojských norem EMC se později odvodily civilní normy EMC. Velký podíl na vznik soustavy vojských norem EMC měly americké ozbrojené síly. Tato soustava vojských norem EMC **Military Standards** (dále jen MIL-STD) se později rozšířila do armád západní Evropy.

Rozdíl mezi vojskými a civilními normami EMC je značný. Například civilní normy **CISPR** se zaměřují na ochranu radiového příjmu a zvukového signálu před rušivými vlivy. **MIL-STD** se zabývají vyhodnocením špičkových hodnot rušení a jejich vlivy na vojské zařízení. Další rozdíl spočívá v jiných doporučených mezních hodnotách elektromagnetického vyzařování, či v používání jiných měřících kmitočtových rozsahů.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

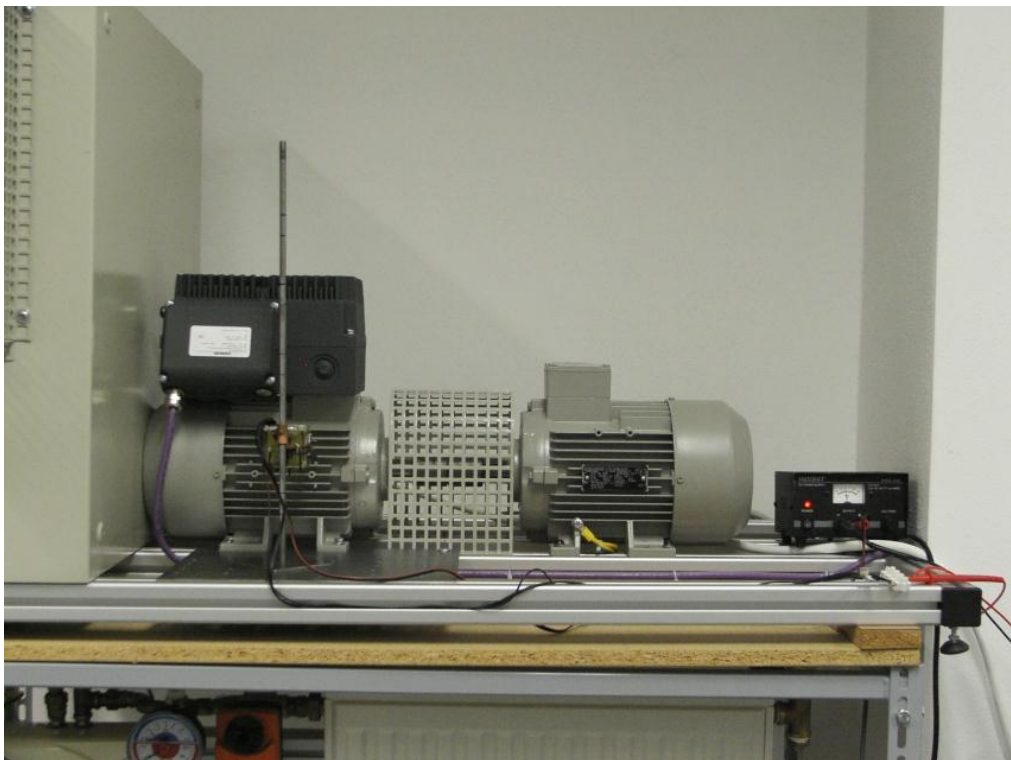
6 MĚŘENÍ MAGNETICKÉ INTERFERENCE ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ

Praktická část diplomové práce se zabývá měřením magnetického pole i elektrického pole. Bylo provedeno několik metod měření, z nichž hlavním pilířem bylo měření magnetického pole kolem asynchronních motorů 3osou Hallovoou sondou AD22151.

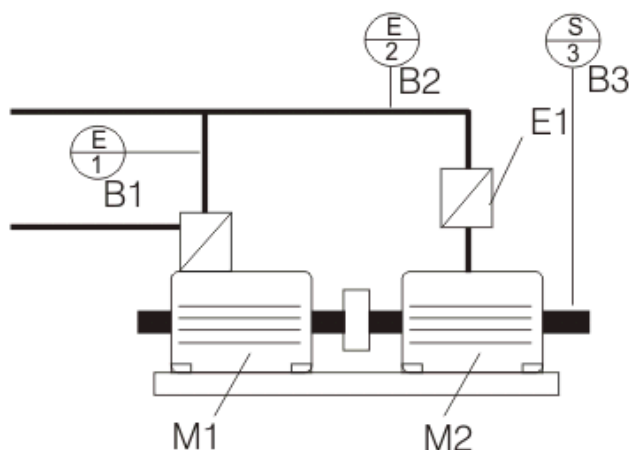
Měření interference asynchronních motorů bylo provedeno na měřícím pracovišti, které se nachází v laboratoři Fakulty aplikované informatiky UTB ve Zlíně. Měřící pracoviště se skládalo z měřeného zařízení a měřících přístrojů.

6.1 Popis měřeného zařízení

Měřené zařízení představuje soustava asynchronních motorů, které jsou součástí laboratorní úlohy DE 4 řízení otáček motorů.



Obr. 36. Měřené zařízení – soustava asynchronních motorů.



Obr. 37. Schéma měřeného zařízení.[17]

Laboratorní úloha **DE 4** umožňuje spojitě řízení otáček asynchronních motorů. Základ laboratorní úlohy tvoří hnací motor **M1** Combimaster s integrovaným frekvenčním měničem. Motor **M2** Micromaster překonává odporový točivý moment hnacího motoru **M1**. Motor **M2** je doplněn externím frekvenčním měničem **E2**. Elektronika frekvenčních měničů umožňuje měřit otáčky a příkony jednotlivých motorů **M1**, **M2**. Frekvenční měniče jsou napojeny na centrální jednotku typu SIMATIC S7-300 prostřednictvím sběrnice **B1 – B3 PROFIBUS**. Centrální jednotka umožňuje dálkové řízení otáček motorů na webových stránkách labi.fai.utb.cz.

Samotný experiment lze řídit ve dvou režimech:

Automat – umožňuje uživateli postupné zvyšování otáček od minima do maxima.

Identifikace – umožňuje ruční nastavení poměru otáček v rozsahu 5% až 100% a zároveň nesmí být rozdíl otáček u obou motorů větší než 15%. Maximální doba experimentu je 30 minut.

Tab. 7. Seznam součástí měřeného zařízení.[17]

Centrální jednotka	Parametr	Input	Output	Dodavatel
SIMATIC S7-300, CPU 313C-2D P	CPU SIMATIC	16DI	16 DO	Siemens
SIMATIC NET, CP 343-1	protokol TCP/IP			Siemens
SIMATIC S7-300, ANALOG INPUT SM 331		4-20mA		Siemens
SIMATIC S7-300, ANALOG OUTPUT SM 332			0-10V	Siemens
SIMATIC S7-300, POWER SUPPLY PS 307				Siemens
M1-COMBIMASTER 411 Profibus	DN25			Siemens
M2-Motor 1,5 KW, patkový, termistor ve vinutí	230VD/400, 1420ot/min.			Siemens
E1-Měnič MM 440 s příslušenstvím, Profibus	1,5kW, 400V			Siemens

6.1.1 Konfigurace otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster

Pro měření magnetického pole asynchronních motorů byl použit řídicí režim identifikace, ve kterém byly zvoleny následující **tři režimy konfigurace otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster**:

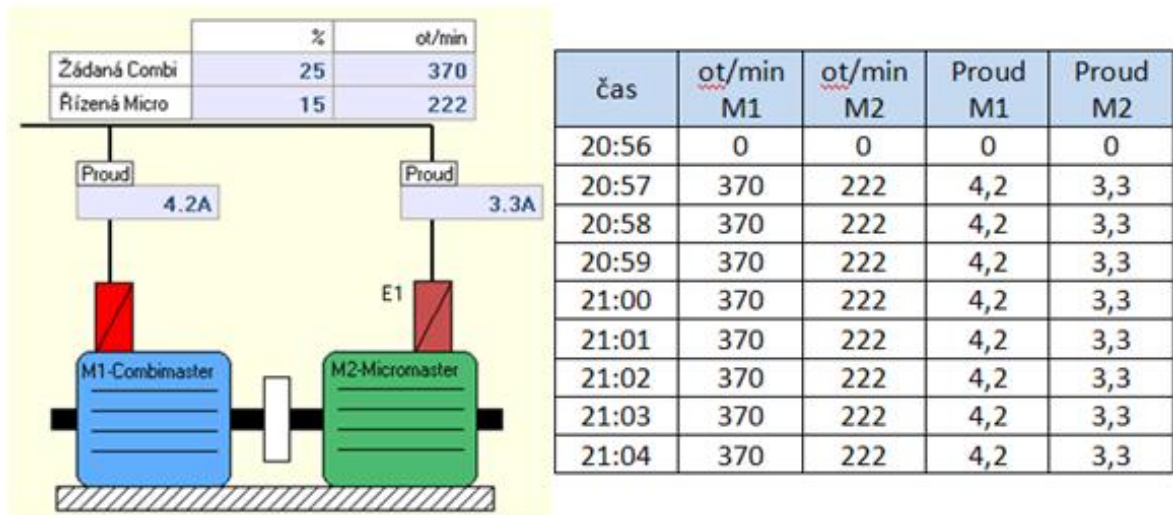
1. 25% - 15%
2. 60% - 50%
3. 90% - 85%

Při spuštění úlohy DE4 v režimu identifikace se při každém nastaveném experimentu ukládal do databáze laboratorní úlohy soubor EXCEL obsahující příkony, počet otáček motorů a dobu běhu konkrétního experimentu. Na základě těchto tabulkových hodnot byly vytvořeny následující grafy.

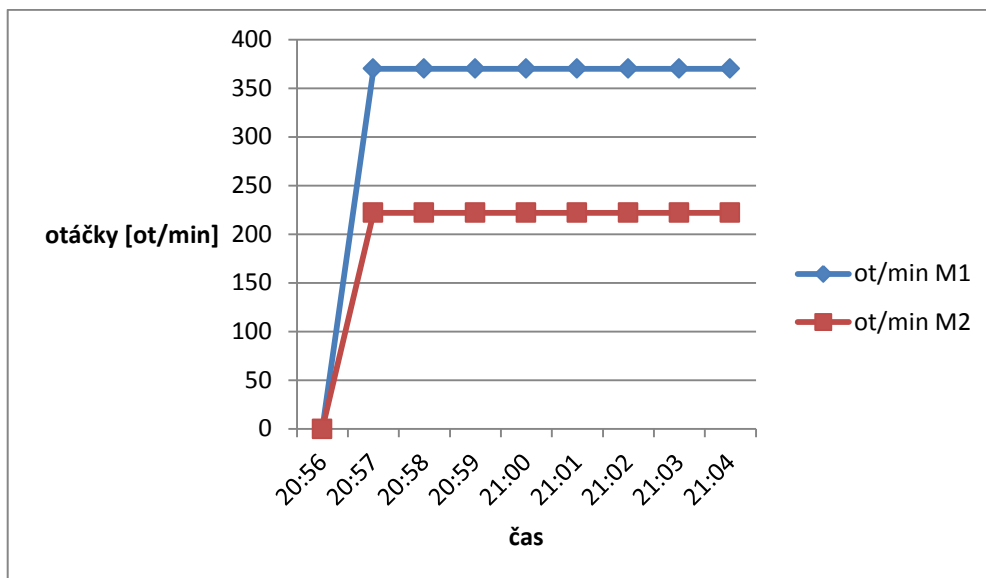
1. konfigurace otáček

M1 Combimaster – 25%

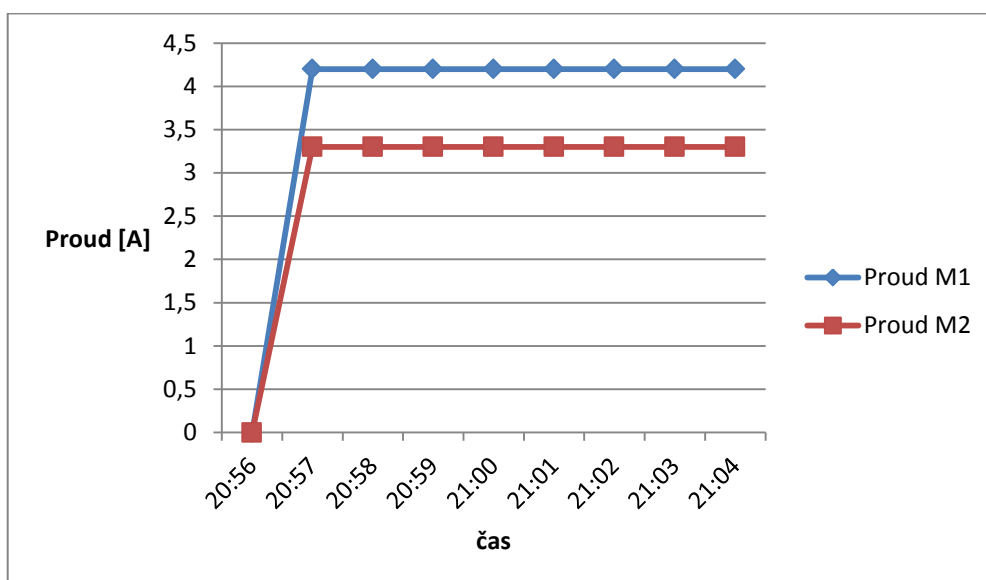
M2 Micromaster – 15%



Obr. 38. Skutečné hodnoty otáček a odebíraného proudu motorů M1 Combimaster – M2 Micromaster u první varianty konfigurace otáček.



Graf 1. Závislost velikosti otáček motorů M1, M2 na čase.

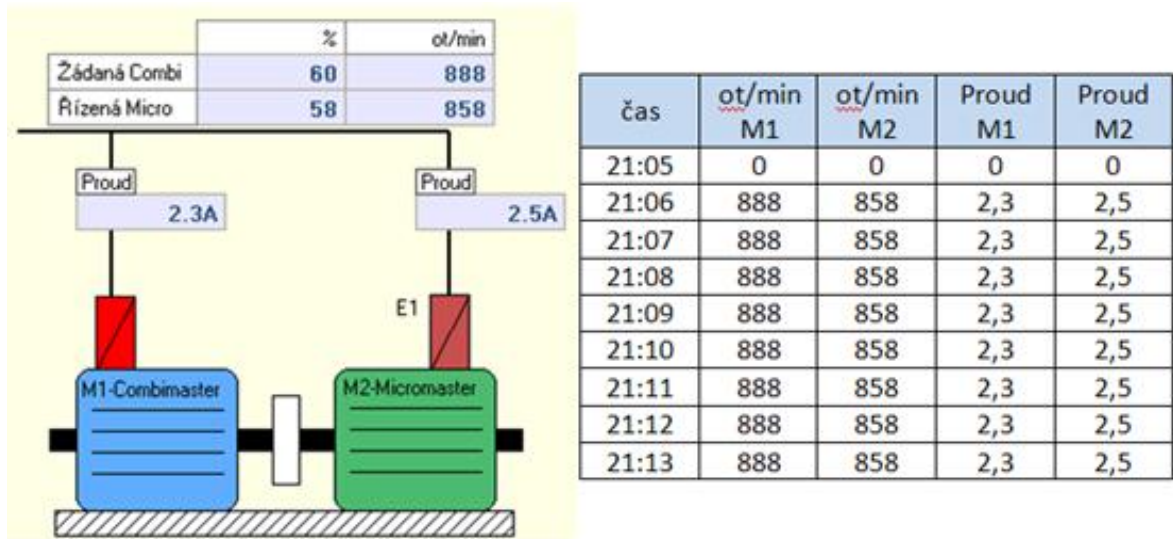


Graf 2. Závislost odebíraného proudu motorů M1, M2 na čase.

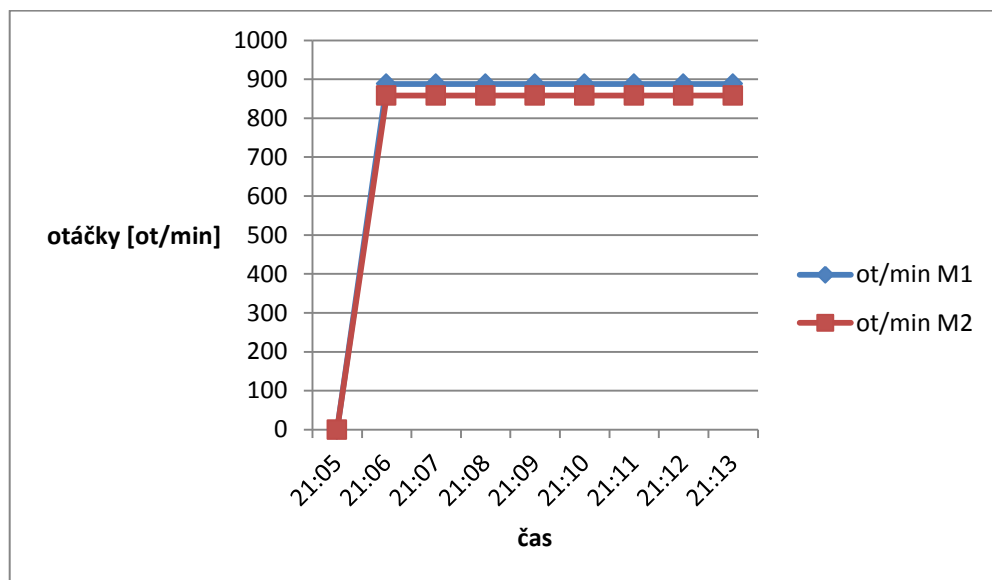
2. konfigurace otáček

M1 Combimaster – 60%

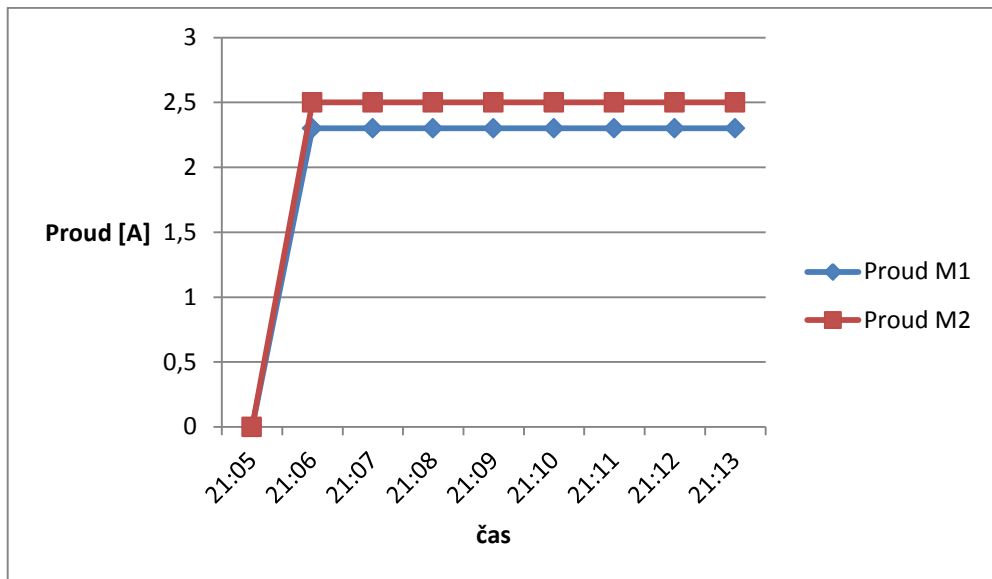
M2 Micromaster – 50%



Obr. 39. Skutečné hodnoty otáček a odebíraného proudu motorů M1 Combimaster – M2 Micromaster u druhé varianty konfigurace otáček.



Graf 3. Závislost velikosti otáček motorů M1, M2 na čase.

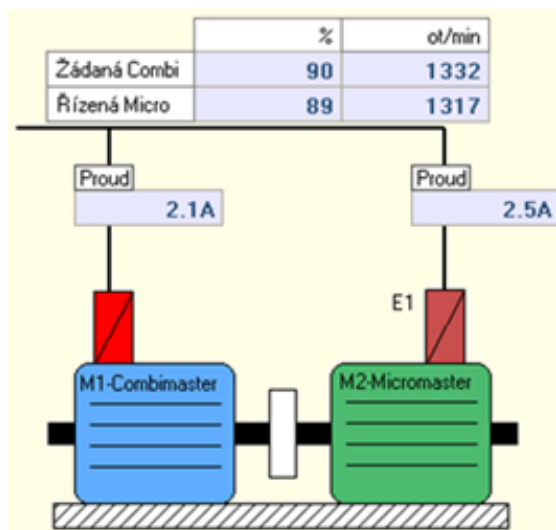


Graf 4. Zavislost odebiraneho proudu motoru M1, M2 na case.

3. konfigurace otacek

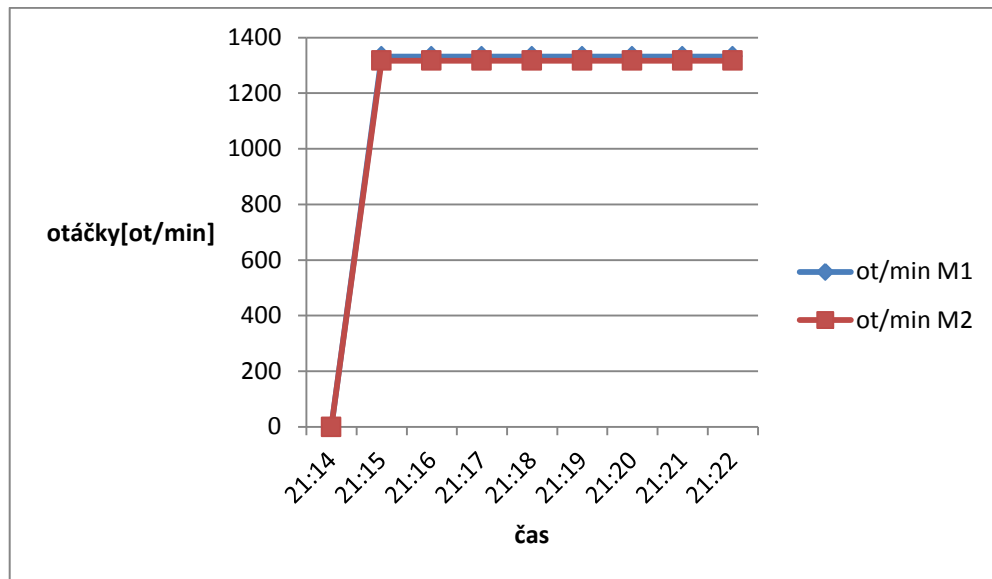
M1 Combimaster – 90%

M2 Micromaster – 85%

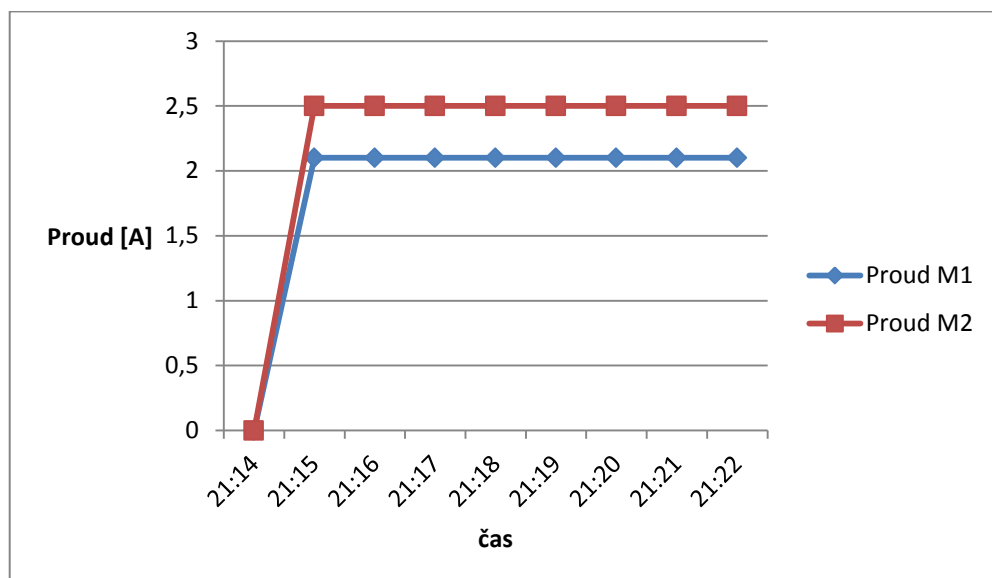


čas	ot/min M1	ot/min M2	Proud M1	Proud M2
21:14	0	0	0	0
21:15	1332	1317	2,1	2,5
21:16	1332	1317	2,1	2,5
21:17	1332	1317	2,1	2,5
21:18	1332	1317	2,1	2,5
21:19	1332	1317	2,1	2,5
21:20	1332	1317	2,1	2,5
21:21	1332	1317	2,1	2,5
21:22	1332	1317	2,1	2,5

Obr. 40. Skutečné hodnoty otacek a odebiraneho proudu motoru M1 Combimaster – M2 Micromaster u treti varianty konfigurace otacek.



Graf 5. Závislost velikosti otáček motorů M1, M2 na čase.



Graf 6. Závislost odebíraného proudu motorů M1, M2 na čase.

6.1.2 Vyhodnocení konfigurace otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster

Při analyzování velikosti odebíraného proudu a počtu ot/min při třech variantách konfigurace otáček motorů M1 Combimaster – M2 Micromaster vyplynulo, že hodnoty odebíraného proudu a počet ot/min jsou v závislosti na čase konstantní, což je žádoucí. U první konfigurace otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster 25% - 15% elektronika frekvenčních měničů pracovala s přednastaveným rozdílem otáček 10%. Motor M1 Combimaster odebíral proud 4,2A jehož hodnota byla o 0,9A vyšší než proud protékající motorem M2 Micromaster. Problém nastal v případě, kdy elektronika frekvenčních měničů

při nastavení poměru otáček obou motorů od hodnoty 50% nedokáže přesně řídit požadovaný poměr otáček, viz Obr. 39, Obr. 40. Například při konfiguraci M1 Combimaster – M2 Micromaster 60% - 50% měl být požadovaný rozdíl 10%, ale ve skutečnosti činil pouze 2%. Obdobný stav nastal i při třetí konfiguraci otáček, kdy požadovaný rozdíl 5% činil pouze 1%. Tyto malé rozdíly v nastavení motoru se promítly i na menším rozdílu odebíraného proudu a velikosti otáček obou motorů.

6.2 Popis měřících zařízení

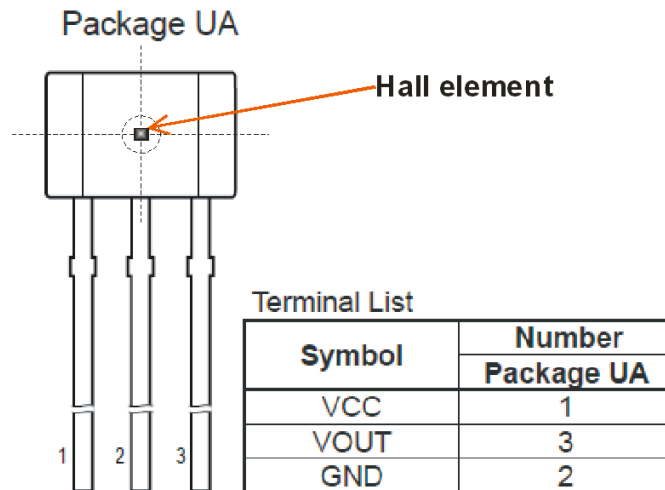
V praktické části diplomové práce byly použity následující měřící zařízení:

- Lineární tříosá Hallova sonda AD22151
- Stejnoseměrný stabilizovaný napájecí zdroj Voltcraft 2256
- Digitální analyzátor elektrosmogu ME 3851A
- Gaussmetr LakeShore 421
- Digitální multimetr Agilent 34410A
- Digitální osciloskop Agilent DSO 6104A

6.2.1 Hallova sonda A1321

Sonda A1321, kterou vyrábí firma Allegro je součástí široké škály sond, které pracují na základě Hallového jevu. Hallový snímač se vyznačuje dobrou citlivostí, která je teplotně stabilní. Sonda pracuje v bipolárním režimu, tj. klidové výstupní napětí sondy tvoří 50% napájecího napětí a během měření magnetického pole je velikost výstupního napětí úměrná intenzitě a směru siločar magnetického pole dopadajícího na pouzdro Hallova elementu.

Základ sondy tvoří monolitický obvod BiCMOS, který v sobě integruje Halluv prvek, teplotně-kompenzační obvody, high-gain zesilovač a nízko-impedanční koncový stupeň.



Obr. 41. Pouzdro sondy A1321. [18]

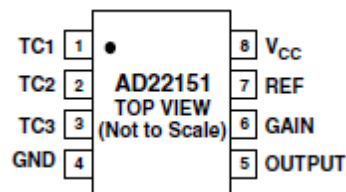
Tab. 8. Vybrané parametry Hallovy sondy A1321.

Charakteristika	Symbol	Minimum	Typická hodnota	Maximum	Jednotka
Napájecí napětí	V_{cc}	4,5	5,0	5,5	V
Napájecí proud	I_{cc}	-	5,6	8	mA
Klidové napětí	$V_{out(q)}$	2,425	2,5	2,575	V
Výstupní napětí	$V_{out(H)}$	-	4,7	-	V
	$V_{out(L)}$	-	0,2	-	V
Citlivost	$Sens$	4,750	5,000	5,250	mV/G

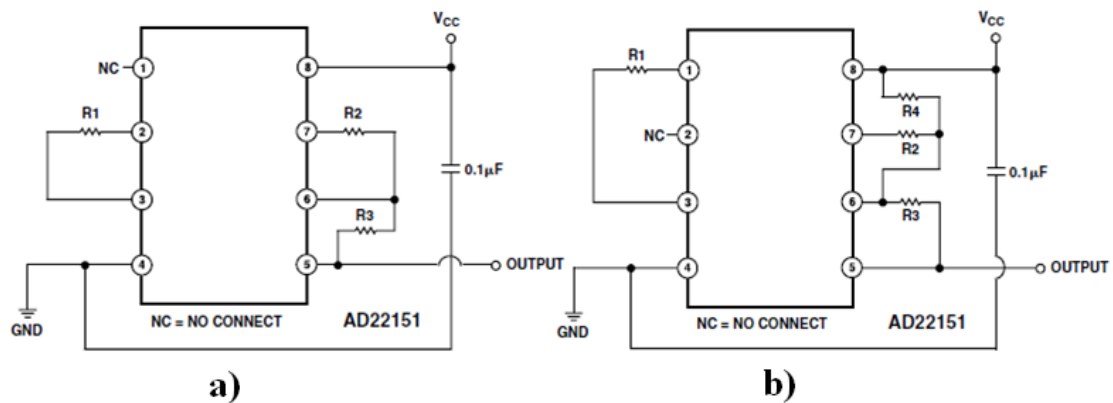
6.2.2 Lineární tříosá Hallova sonda AD22151

Pro měření magnetického pole kolem asynchronních motorů byl použit lineární senzor AD22151 od firmy Analog devices, jehož funkce je založena na Hallovém jevu. Elektronika Hallovy sondy AD22151 je integrovaná v SMD pouzdru SOIC. Senzor umožňuje dvě varianty zapojení:

- bipolární
- unipolární



Obr. 42. Pouzdro SOIC.[19]



Obr. 43. Varianty zapojení AD22151, a) bipolární, b) unipolární.[19]

Hlavní rozdíl mezi těmito dvěma zapojeními, když pomineme malé úpravy v zapojení sondy, jsou velikosti klidového výstupního napětí, které činí u bipolárního zapojení 50% napájecího napětí. U unipolárního zapojení má výstupní klidové napětí velikost 1V.

Tab. 9. Vybrané parametry Hallovy sondy AD22151.

Charakteristika	Symbol	Minimum	Typická hodnota	Maximum	Jednotka
Napájecí napětí	V_{cc}	4,5	5,0	6,0	V
Napájecí proud	I_{cc}	-	6,0	10	mA
Výstupní napětí	$V_{out(MAX)}$	-	93	-	% z V_{cc}
	$V_{out(MIN)}$	-	5,0	-	% z V_{cc}
Citlivost	$Sens$	-	0,4	-	mV/G

Z výše uvedené tabulky vyplývá, že ve srovnání s parametry sondy A1321 jsou si parametry sondy AD22151 velmi podobné. Jediný rozdíl mezi těmito dvěma sondami spočívá v rozdílné citlivosti, která je u A1321 pevně nastavena na hodnotu 5 mV/G a u A22151 je uvedena pouze základní citlivost 0,4 mV/G, kterou lze dle potřeby externími součástkami upravit.

Piny sondy AD22151 jsou ošetřeny několika součástkami, které mají následující funkci:

- Kondenzátor **C1** zkratuje vysokofrekvenční složky napájecího napětí U_{cc}
- Rezistor **R1** umožňuje nastavení teplotní stabilizace
- Rezistory **R2** a **R3** slouží k nastavení zisku senzoru
- Rezistor **R4** určuje offset u unipolárního zapojení

Tab. 10. Hodnoty použitých součástek.

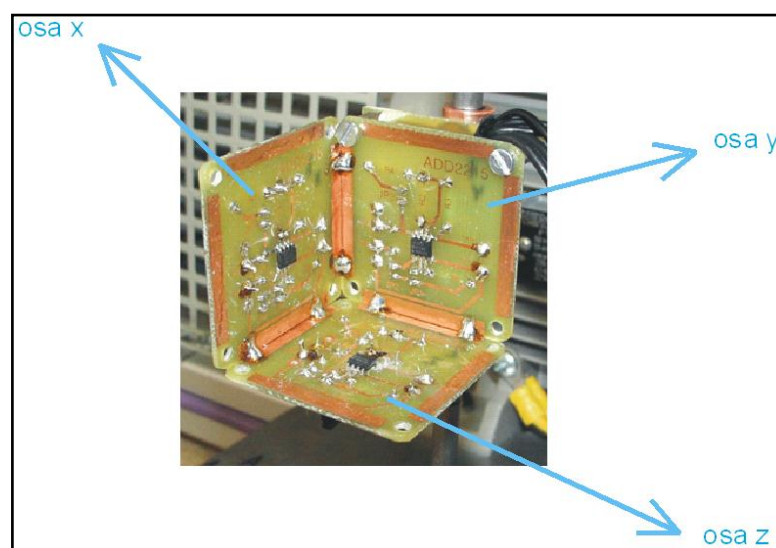
Součástka	Hodnota
C1	100 nF
R1	15 kΩ
R2	680 Ω
R3	560 kΩ

Pro měření magnetického pole asynchronních motorů bylo užito bipolární zapojení, u kterého byly zvoleny takové hodnoty součástek, uvedené v 10. tabulce, aby bylo možné dosáhnout vhodného zisku a posléze citlivosti následujícími vztahy:

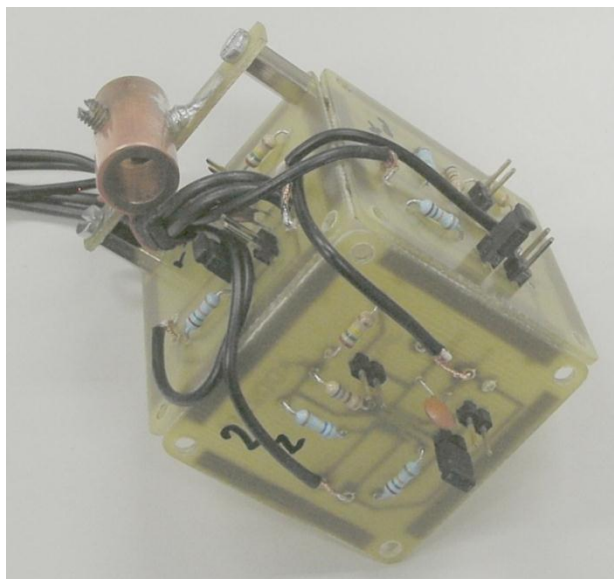
$$Gain = 1 + \frac{R3}{R2} \times 0,4 \frac{mV}{G} = 330 \quad (22)$$

$$Sensitivity = Gain \times 0,4 \frac{mV}{G} = \mathbf{132 mV/G} \quad (23)$$

Hallova sonda AD22151 byla konstruována jako tříosá. Bylo potřeba vyrobit 3 kusy totožných desek plošných spojů, které byly vzájemně spájeny do tvaru, který připomíná krychli. Deska plošného spoje byla navržena v prostředí Eagle tak, aby umožňovala snadné přepínání mezi bipolárním nebo unipolárním režimem pomocí jumperů. K tříosé sondě byl připojen napájecí vodič typu SPR 2-20 B/R a na jednotlivé výstupy sondy byly připojeny stíněné vodiče S7004.



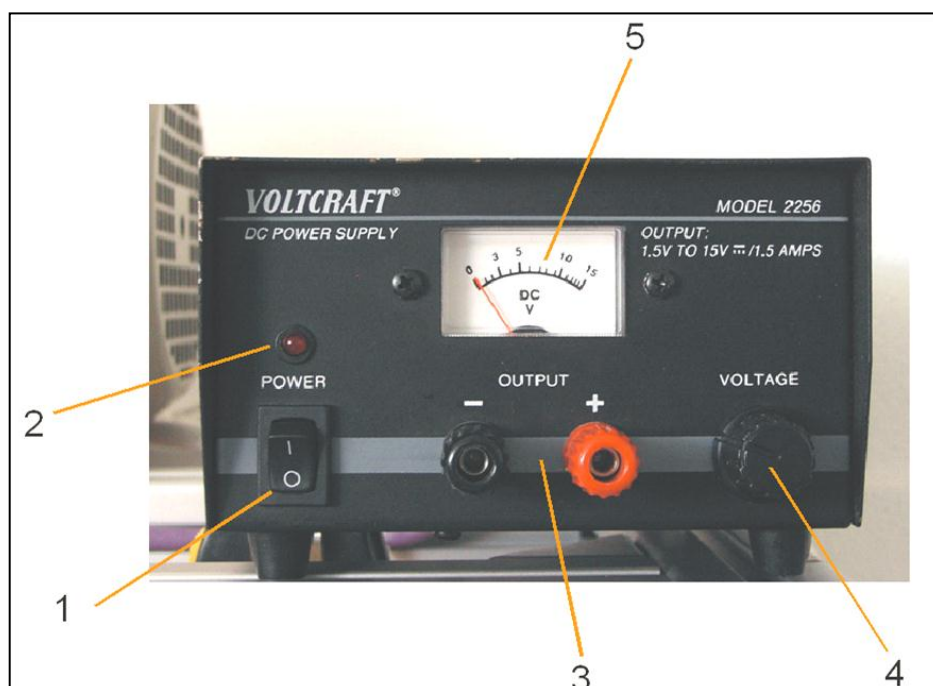
Obr. 44. Čelní strana tříosé Hallovy sondy AD22151.



Obr. 45. Zadní část desek plošných spojů tříosé Hallovy sondy AD22151.

6.2.3 Regulovatelný stejnosměrný napájecí zdroj Voltcraft 2256

Regulovatelný stejnosměrný napájecí zdroj Voltcraft 2256 je určen pro napájení zařízení, které vyžadují pro svou činnost stejnosměrné napájecí napětí v rozsahu 0 – 15 V s maximálním příkonem proudu 1,5A.



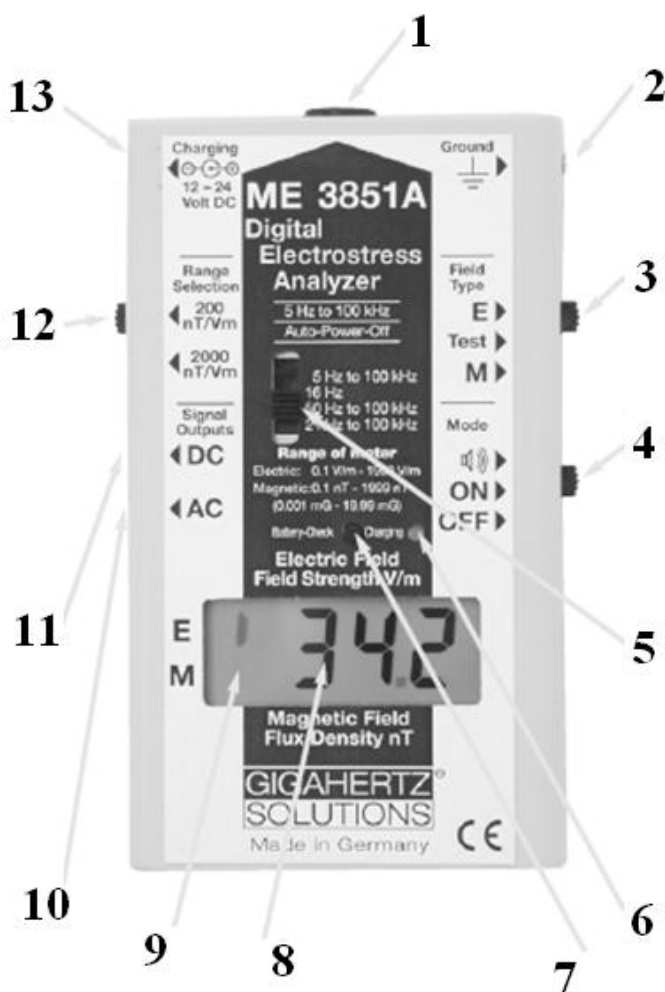
Obr. 46. Přední panel regulovatelného stejnosměrného napájecího zdroje Voltcraft 2256.

Popis předního panelu regulovatelného stejnosměrného napájecího zdroje Voltcraft 2256 je následující:

1. Síťový kolébkový vypínač
2. Led kontrolka zapnutí zdroje
3. Výstupní svorky zdroje
4. Regulace výstupního napětí
5. Ručičkový ukazatel hodnoty výstupního napětí

6.2.4 Digitální analyzátor elektrosmogu ME 3851A

Jedná se o profesionální digitální analyzátor elektrosmogu, který se vyznačuje jednoduchou obsluhou, která přispívá k rychlému analyzování intenzity střídavého magnetického a elektrického pole v kmitočtovém pásmu 5 Hz až 100 kHz. Digitální analyzátor je napájen dobíjecím akumulátorem o jmenovité hodnotě napětí 9V.



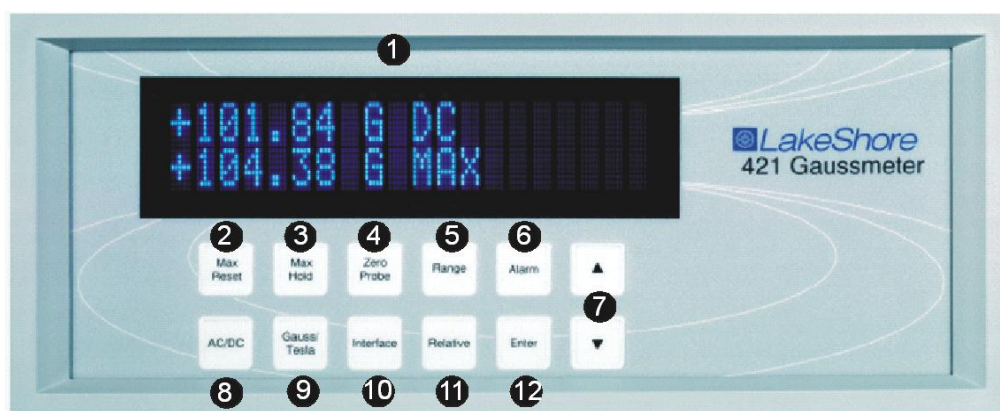
Obr. 47. Digitální analyzátor elektrosmogu ME 3851A.[21]

Popis digitálního analyzátoru elektrosmogu ME 3851A je následující:

1. Snímací část digitálního analyzátoru
2. Vstup pro uzemnění při měření elektrického pole
3. Výběr měřeného pole – E: elektrické, M: magnetické, Test: kompenzace displeje
4. Funkce zapnutí a vypnutí analyzátoru
5. Přepínač frekvenčního filtru
6. Led dioda pro signalizaci nízké hodnoty napětí akumulátoru
7. Tlačítko pro kontrolu velikosti napětí akumulátoru
8. 3,5 místný LCD displej
9. Indikátor výběru měřeného pole
10. Výstup střídavého signálu určený pro připojení spektrálního analyzátoru
11. Výstup stejnosměrného signálu
12. Přepínač rozsahu měření 200 nT, V/m ; 2000 nT, V/m
13. Vstup určený pro nabíjení akumulátoru

6.2.5 Gaussmetr LakeShore 421

Gaussmetr, jehož funkce je založena na Hallovém jevu, lze použít jak pro měření stejnosměrných, tak i střídavých magnetických polí. Součástí přístroje jsou sondy, které svým tvarem umožní měření magnetického pole i v hůře dostupných místech. Přístroji dominuje velký 4 ¾ místný přehledný vakuový fluorescenční displej. Pod displejem jsou umístěna ovládací tlačítka, která díky svému uspořádání umožňují snadné nastavení přístroje.



Obr. 48. Čelní panel Gaussmetru LakeShore 421.[20]

1. Vakuový fluorescenční displej
2. Reset naměřených hodnot

3. Tlačítko pro vyvolání maximální naměřené hodnoty
4. Kalibrace přístroje
5. Rozsah měření
6. Nastavení alarmu
7. Ovládání kurzoru
8. Tlačítko pro volbu střídavého nebo stejnosměrného magnetického pole
9. Tlačítko pro volbu jednotek magnetické indukce Gauss/Tesla
10. Nastavení rozhraní
11. Tlačítko relative
12. Potvrzovací tlačítko Enter



Obr. 49. Zadní část Gaussmetru LakeShore 421.[20]

1. Síťový konektor obsahující síťový vypínač, síťovou pojistku a přepínač síťového napětí
2. Sériové vstupní/výstupní rozhraní RS 232
3. Korigovaný analogový výstup
4. Analogový výstup pro monitor
5. D-konektor pro připojení měřicí sondy
6. Reléové svorky

Pro měření s Gaussmetrem byla použita axiální sonda typu MMA-2502-VH.



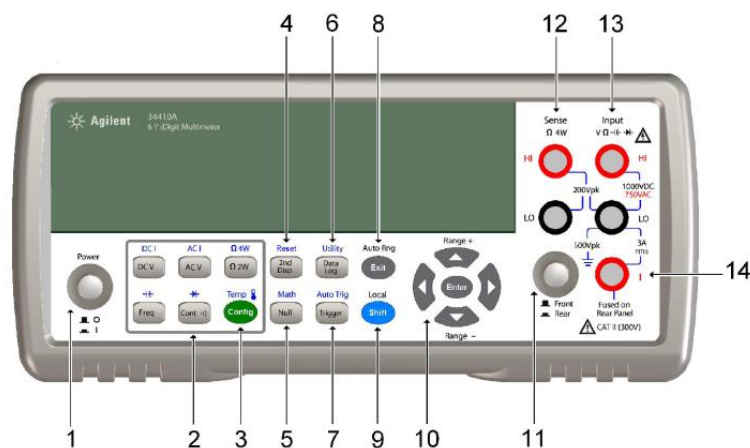
Obr. 50. Axiální sonda MMA-2502-VH.[20]

Tab. 11. Parametry axiální sondy.

Model	L	D	A	Aktivní oblast	Základní materiál	Frekvenční rozsah	Použití v rozsahu tlaku	Přesnost	Rozsah teploty použití	Max. teplot. koeficient nula	Max. teplot. koeficient kalibrace
MMA-2502-VH	2" ±0.063"	0.25" dia ±0.006"	0.015" ±0.005"	0.030" dia (approx)	Aluminum	DC and 10 Hz to 400 Hz	30 G, 300 G, 3 kG, 30 kG	±0.25% to 30 kG	0 °C to +75 °C	±0.09 G/°C	-0.04%/°C

6.2.6 Digitální multimetr Agilent 34410A

Multimetr Agilent 34410A je profesionální zařízení umožňující měřit stejnosměrné i střídavé veličiny s rozlišením na 6 ½ místa. Multimetr nám umožňuje měřit stejnosměrný i střídavý proud a napětí, kmitočet, periodu, odpor, kapacitu, teplotu přidavným termistorem. Multimetr lze použít i jako tester diod či propojení. Jako přidavné funkce multimetru jsou automatické změny rozsahu, záznam dat, možnost propojení s PC přes rozhraní USB či LAN apod.

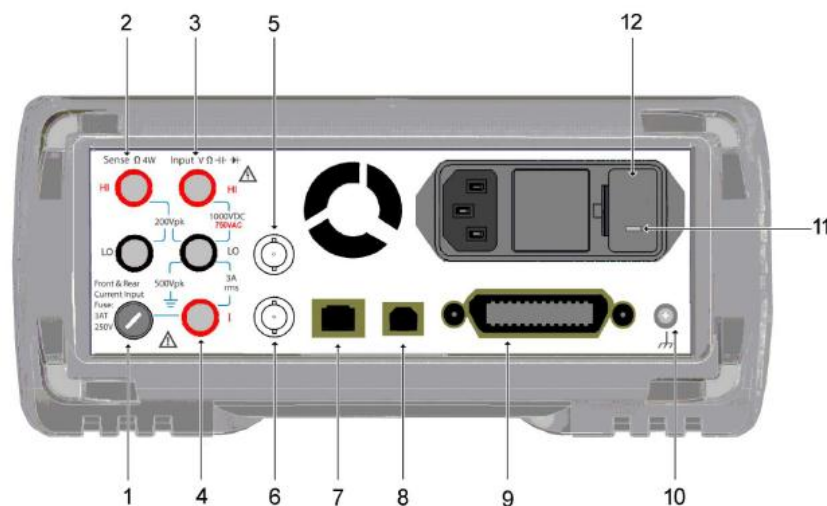


Obr. 51. Čelní panel multimetru Agilent 34410A.[22]

Popis čelního panelu:

1. Síťový vypínač
2. Tlačítka měřicích funkcí
3. Tlačítko pro konfiguraci
4. Tlačítko druhého zobrazení (Reset)
5. Nulovací tlačítko (matematické funkce)
6. Tlačítko pro záznam měřených dat (Utility)
7. Spouštěcí tlačítko (automatické spouštění)
8. Tlačítko Exit (automatický rozsah)
9. Tlačítko Shift (Local)
10. Navigační tlačítko nabídky (rozsah měření)

11. Přepínač svorek na předním nebo zadním panelu
12. Snímací svorky HI a LO určené pro 4vodičové měření
13. Vstupní svorky HI a LO určené pro všechny druhy měření kromě proudu
14. Svorka pro měření stejnosměrného či střídavého proudu



Obr. 52. Zadní panel multimetru Agilent 34410A.[22]

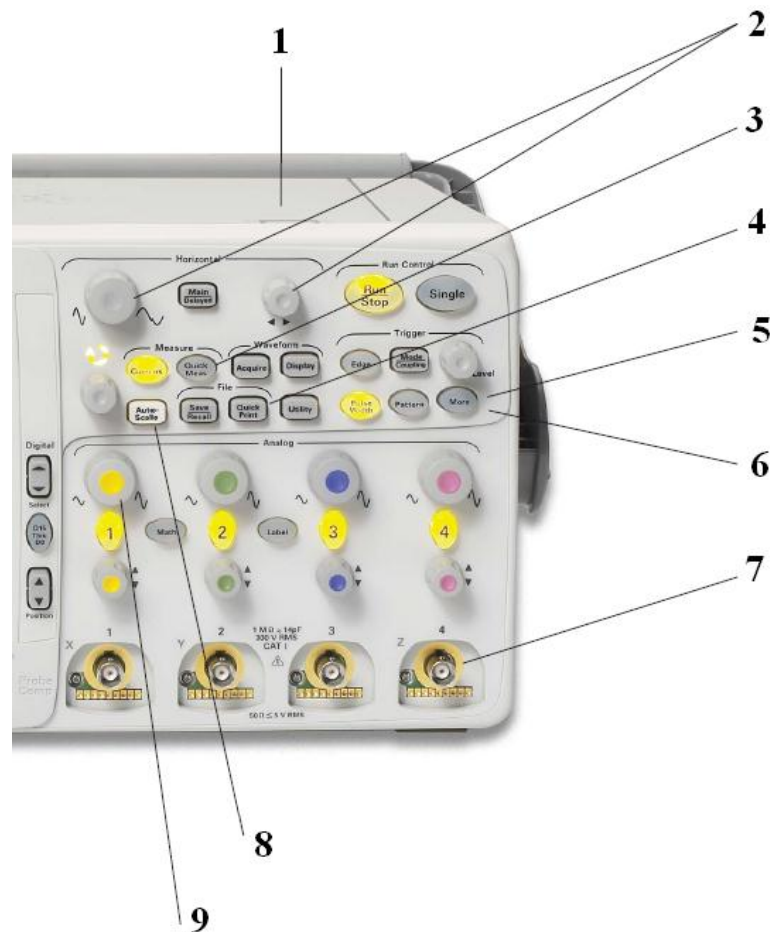
Popis zadního panelu:

1. Pojistka vstupního proudu jisticí svorky na předním i zadním panelu
2. Snímací svorky určené pro 4vodičové měření
3. Vstupní svorky HI a LO určené pro všechny druhy měření kromě proudu
4. Svorka pro měření stejnosměrného či střídavého proudu
5. Konektor BNC - vstup externího spouštění
6. Konektor BNC – výstup ukončovacího impulzu
7. Konektor rozhraní LAN
8. Konektor rozhraní USB
9. Konektor rozhraní GPIB
10. Kostra přístroje
11. Nastavení napětí elektrické sítě
12. Síťová pojistka

6.2.7 Digitální osciloskop Agilent DSO 6104A

Jedná se o špičkový digitální 4kanálový osciloskop typové série 6000 umožňující měření v kmitočtovém pásmu DC - 1 GHz s rychlostí vzorkování 4 GS/s. Osciloskop zobrazuje 100 000 průběhů za sekundu a je opatřen barevným TFT displejem s rozlišením XGA 1024

x 768 bodů s 512 úrovněmi intenzity. Přístroj je vybaven pamětí 1M - 8M vzorků na kanál a technologií Mega Zoom III. Velkou předností osciloskopu je možnost vyfotografovat zobrazovaný průběh a snímek v předem zvoleném formátu uložit na flash disk. U osciloskopu nechybí rozhraní LAN, GPIB, USB, XGA pro komunikaci s PC.



Obr. 53. Pravá část čelního panelu digitálního osciloskopu Agilent DSO 6104A.[23]

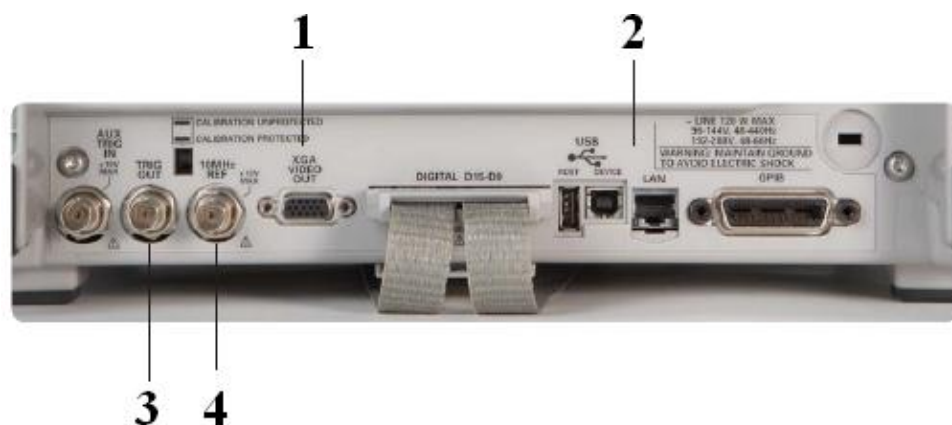
1. Vestavěný úložný prostor pro sondy a napájecí kabel
2. Ovládací prvky pro nastavení časové základny
3. Tlačítko QuickMeas zobrazuje hodnoty právě aktivovaného signálu (pk-pk, RMS, U_{max} , U_{min})
4. Tlačítko QuickPrint umožňuje uložit obrazovky na USB flash disk
5. Standardní sériový trigger pro SPI, USB
6. Standardní analogový trigger HDTV / EDTV
7. Vstupní kanály osciloskopu

8. Automatické nastavení vertikálního, horizontálního zesilovače a jiných prvků pro optimální zobrazení průběhu měřeného signálu
9. Ovládání citlivosti vertikálního zesilovače



Obr. 54. Levá část čelního panelu digitálního osciloskopu Agilent DSO 6104A.[23]

1. Barevný TFT displej s rozlišením XGA 1024 x 768
2. Konektor USB
3. Ovládání jasu displeje



Obr. 55. Zadní panel digitálního osciloskopu Agilent DSO 6104A.[23]

1. Konektor XGA umožňuje připojit externí monitor
2. Porty LAN, USB, GPIB pro komunikaci s PC
3. Externí trigger pro synchronizaci s externími přístroji (generátor apod.)
4. Referenční 10 MHz synchronizace

7 MĚŘENÍ CHARAKTERISTIKY HALLOVY SONDY A1321

Úkolem měření bylo analyzování charakteristiky Hallovovy sondy A1321, která byla vložena do kruhového otvoru permanentního magnetu, ve kterém se sonda natáčela ve směru hodinových v úhlovém rozsahu 0° až 180° . Výstupní napětí bylo měřeno po krocích $\Delta 10^\circ$. Tento postup byl proveden s rozdílnými vzdálenostmi pouzdra Hallovovy sondy A1321 od středu kruhového otvoru permanentního magnetu.

Bylo provedeno 7 měření charakteristiky sondy A1321:

1. **Měření** - základní měření, pouzdro sondy se nachází v jádru otvoru permanentního magnetu.
2. **Měření** - pouzdro sondy se nachází na levé straně ve vzdálenosti 10mm od jádra otvoru permanentního magnetu.
3. **Měření** - pouzdro sondy se nachází na levé straně ve vzdálenosti 20mm od jádra otvoru permanentního magnetu.
4. **Měření** - pouzdro sondy se nachází na levé straně ve vzdálenosti 40mm od jádra otvoru permanentního magnetu.
5. **Měření** - pouzdro sondy se nachází na pravé straně ve vzdálenosti 10mm od jádra otvoru permanentního magnetu.
6. **Měření** - pouzdro sondy se nachází na pravé straně ve vzdálenosti 20mm od jádra otvoru permanentního magnetu.
7. **Měření** - pouzdro sondy se nachází na pravé straně ve vzdálenosti 40mm od jádra otvoru permanentního magnetu.

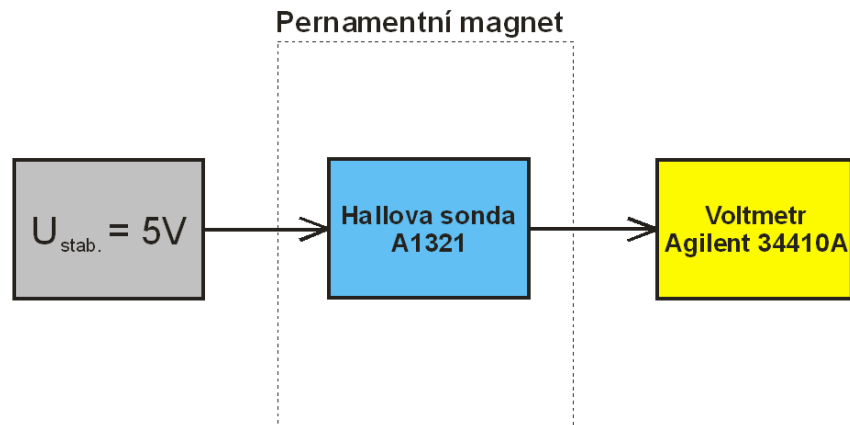
Z výstupního napětí byla vypočítána magnetická indukce následujícím vztahem:

$$B = \frac{U_1 - U_0}{0,005 \text{ V/G}} \quad (24)$$

U_1 – výstupní napětí sondy při daném úhlu natočení pouzdra

U_0 – výstupní klidové napětí 2,52V

Hodnota 0,005 V/G představuje citlivost sondy.

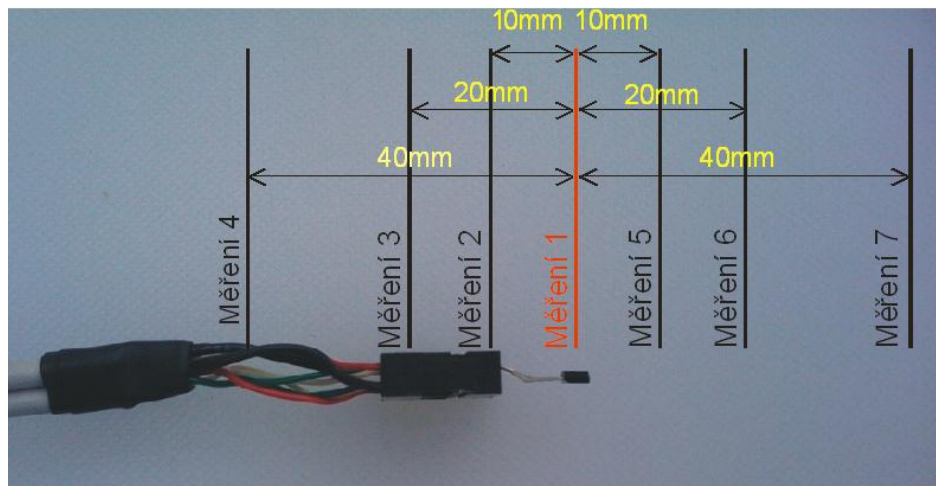


Obr. 56. Blokové schéma měření Hallové sondy A1321.7

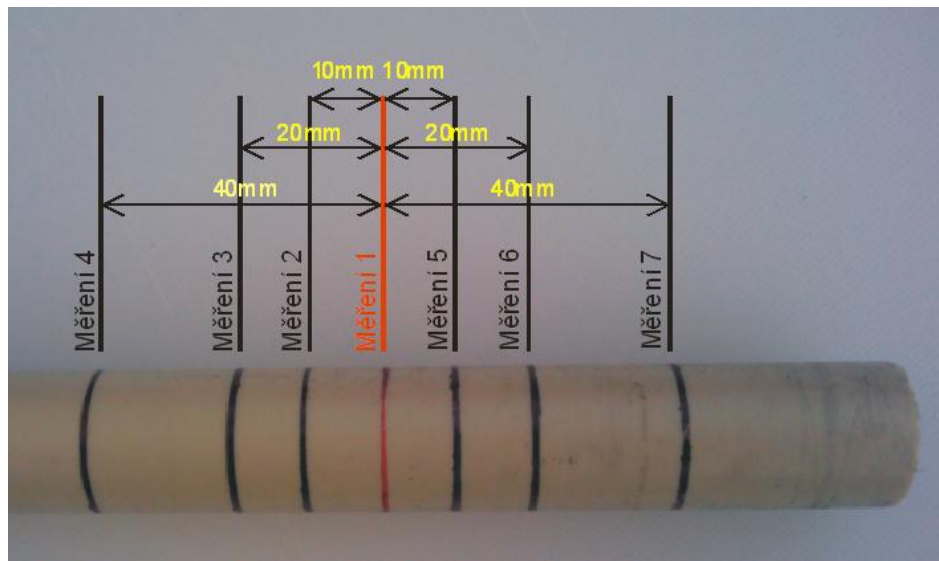
Jak vyplývá z blokového schématu, tak při měření byly použity tyto zařízení:

- Stejnoseměrný stabilizovaný zdroj Voltcraft 2256
- Hallová sonda A1321
- Voltmetr Agilent 34410A

Před samotným měřením bylo potřeba si určit horizontální vzdálenosti kolem pouzdra Hallové sondy A1321. Posléze byla Hallová sonda spolu s kabeláží vložena do plastové trubky, která tvořila vnější plášť sondy.



Obr. 57. Hallová sonda bez vnějšího obalu s vyznačenými vzdálenostmi pro jednotlivé měření.



Obr. 58. Vnější nemagnetické pouzdro Hallový sondy.

Sonda s vnějším plastovým pláštěm byla vsunuta do kruhového otvoru permanentního magnetu, ve kterém vykonávala otáčivý pohyb ve směru hodinových ručiček v úhlovém rozsahu 0° až 180° po krocích $\Delta 10^\circ$. Úhel natočení byl měřen pomocí úhlooměru.

Tab. 12. Hodnoty napětí U_1 a magnetické indukce B získané při měření 1 až 3.

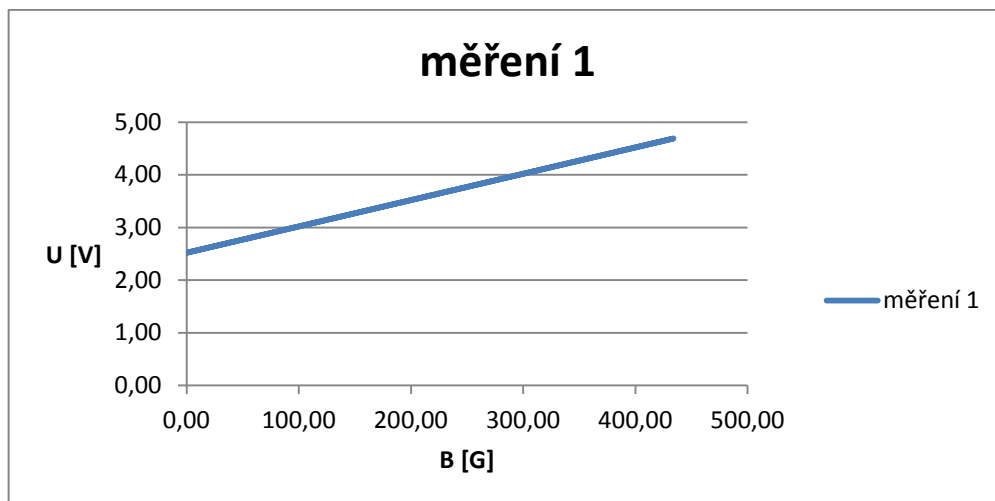
Měření 1			Měření 2			Měření 3		
Úhel [°]	U_1 [V]	B [Gauss]	Úhel [°]	U_1 [V]	B [Gauss]	Úhel [°]	U_1 [V]	B [Gauss]
0	2,52	0,00	0	2,52	0,00	0	2,52	0,00
10	3,04	104,00	10	2,94	84,00	10	2,70	36,00
20	3,33	162,00	20	3,20	136,00	20	2,82	60,00
30	3,66	228,00	30	3,45	186,00	30	2,96	88,00
40	3,90	276,00	40	3,69	234,00	40	3,07	110,00
50	4,23	342,00	50	3,98	292,00	50	3,19	134,00
60	4,41	378,00	60	4,15	326,00	60	3,29	154,00
70	4,59	414,00	70	4,28	352,00	70	3,37	170,00
80	4,67	430,00	80	4,35	366,00	80	3,42	180,00
90	4,69	434,00	90	4,37	370,00	90	3,43	182,00
100	4,62	420,00	100	4,30	356,00	100	3,40	176,00
110	4,46	388,00	110	4,17	330,00	110	3,34	164,00
120	4,26	348,00	120	3,99	294,00	120	3,27	150,00
130	3,98	292,00	130	3,75	246,00	130	3,15	126,00
140	3,69	234,00	140	3,48	192,00	140	3,03	102,00
150	3,32	160,00	150	3,21	138,00	150	2,87	70,00
160	2,97	90,00	160	2,88	72,00	160	2,71	38,00
170	2,74	44,00	170	2,67	30,00	170	2,59	14,00
180	2,52	0,00	180	2,52	0,00	180	2,52	0,00

Tab. 13. Hodnoty napětí U_1 a magnetické indukce B získané při měření 4 a 5.

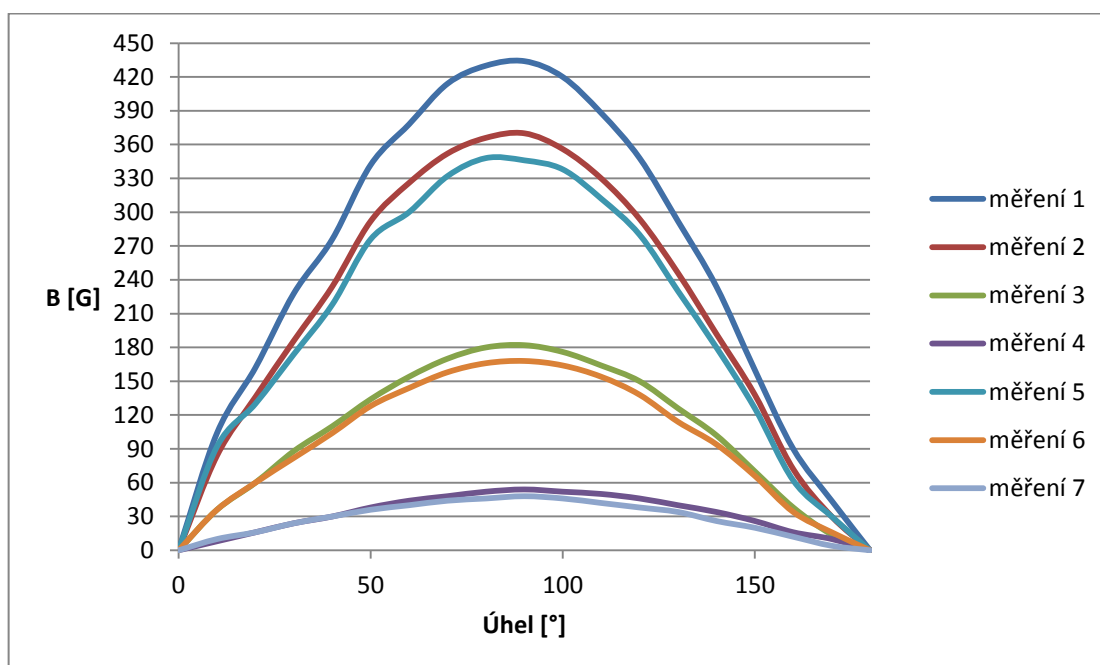
Měření 4			Měření 5		
Úhel [°]	U_1 [V]	B [Gauss]	Úhel [°]	U_1 [V]	B [Gauss]
0	2,52	0,00	0	2,52	0,00
10	2,56	8,00	10	2,98	92,00
20	2,60	16,00	20	3,17	130,00
30	2,64	24,00	30	3,39	174,00
40	2,67	30,00	40	3,61	218,00
50	2,71	38,00	50	3,90	276,00
60	2,74	44,00	60	4,02	300,00
70	2,76	48,00	70	4,18	332,00
80	2,78	52,00	80	4,26	348,00
90	2,79	54,00	90	4,25	346,00
100	2,78	52,00	100	4,21	338,00
110	2,77	50,00	110	4,08	312,00
120	2,75	46,00	120	3,92	280,00
130	2,72	40,00	130	3,67	230,00
140	2,69	34,00	140	3,42	180,00
150	2,65	26,00	150	3,15	126,00
160	2,60	16,00	160	2,83	62,00
170	2,57	10,00	170	2,67	30,00
180	2,52	0,00	180	2,52	0,00

Tab. 14. Hodnoty napětí U_1 a magnetické indukce B získané při měření 6 a 7.

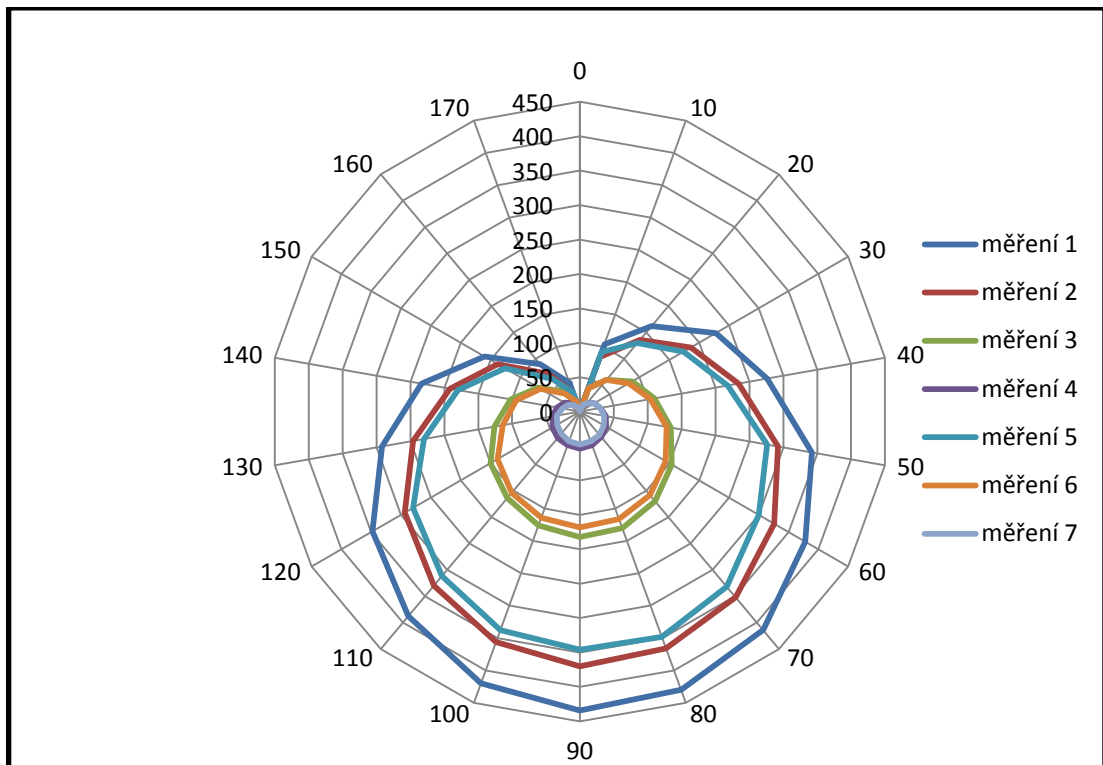
Měření 6			Měření 7		
Úhel [°]	U_1 [V]	B [Gauss]	Úhel [°]	U_1 [V]	B [Gauss]
0	2,52	0,00	0	2,52	0,00
10	2,70	36,00	10	2,57	10,00
20	2,82	60,00	20	2,60	16,00
30	2,93	82,00	30	2,64	24,00
40	3,04	104,00	40	2,67	30,00
50	3,16	128,00	50	2,70	36,00
60	3,24	144,00	60	2,72	40,00
70	3,31	158,00	70	2,74	44,00
80	3,35	166,00	80	2,75	46,00
90	3,36	168,00	90	2,76	48,00
100	3,34	164,00	100	2,75	46,00
110	3,29	154,00	110	2,73	42,00
120	3,21	138,00	120	2,71	38,00
130	3,09	114,00	130	2,69	34,00
140	2,99	94,00	140	2,65	26,00
150	2,85	66,00	150	2,62	20,00
160	2,69	34,00	160	2,58	12,00
170	2,60	16,00	170	2,54	4,00
180	2,52	0,00	180	2,52	0,00



Graf 7. Lineární závislost výstupního napětí na magnetické indukci.



Graf 8. Závislost velikosti magnetické indukce na úhlu natočení pouzdra sondy A1321.



Graf 9. Charakteristika Hallovy sondy A1321 znázorněna paprskovým grafem.

7.1 Vyhodnocení měření charakteristiky Hallovy sondy A1321.

Při měření charakteristiky Hallovy sondy A1321 bylo provedeno 7 variant měření. Naměřené hodnoty byly posléze graficky zpracovány. Z naměřených hodnot a průběhu grafů jsme se přesvědčili, jaký má vliv na hodnotu výstupního napětí velikost úhlu vektoru magnetické indukce B dopadající na Hallův element. Z výsledků měření vyplývá, že při úhlu 0° , který svírá vektor magnetické indukce B vůči Hallovému elementu se výstupní napětí rovná napětí klidovému. Při rostoucím úhlu se současně zvyšuje výstupní napětí. V okamžiku, kdy vektor magnetické indukce B svírá vůči Hallovému elementu úhel 90° , je výstupní napětí Hallovy sondy na maximální úrovni.

Velikost výstupního napětí je nejen závislá na úhlu vektoru magnetické indukce B , ale také na intenzitě magnetického pole, která se zvyšující vzdáleností sondy od permanentního magnetu klesá.

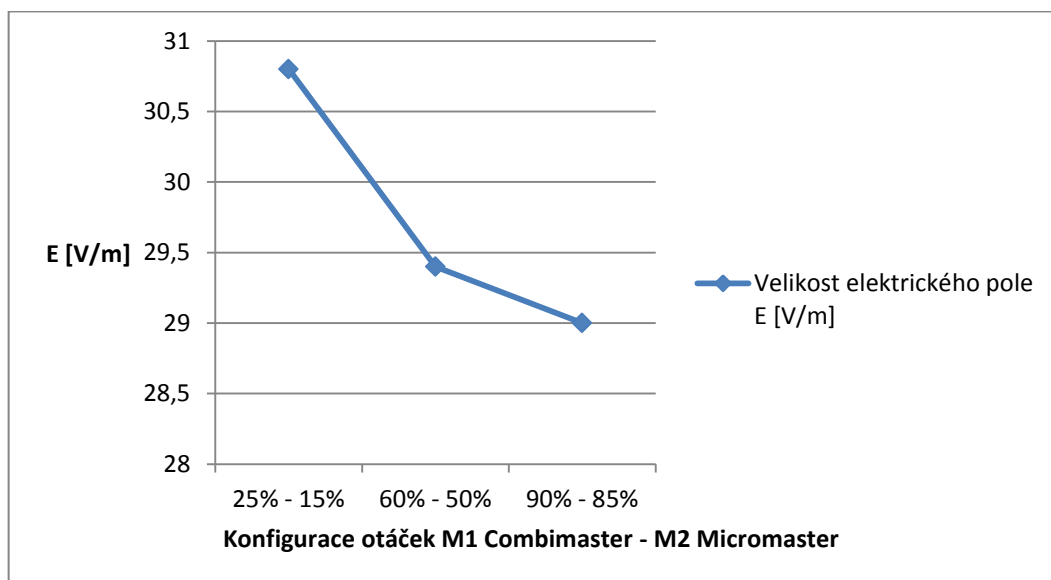
8 MĚŘENÍ INTENZITY ELEKTROSMOGU

Na úvod měření magnetického pole soustavy asynchronních motorů bylo potřeba provést měření intenzity elektrosmog. Měření elektrosmog proběhlo při třech variantách konfigurace otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster.

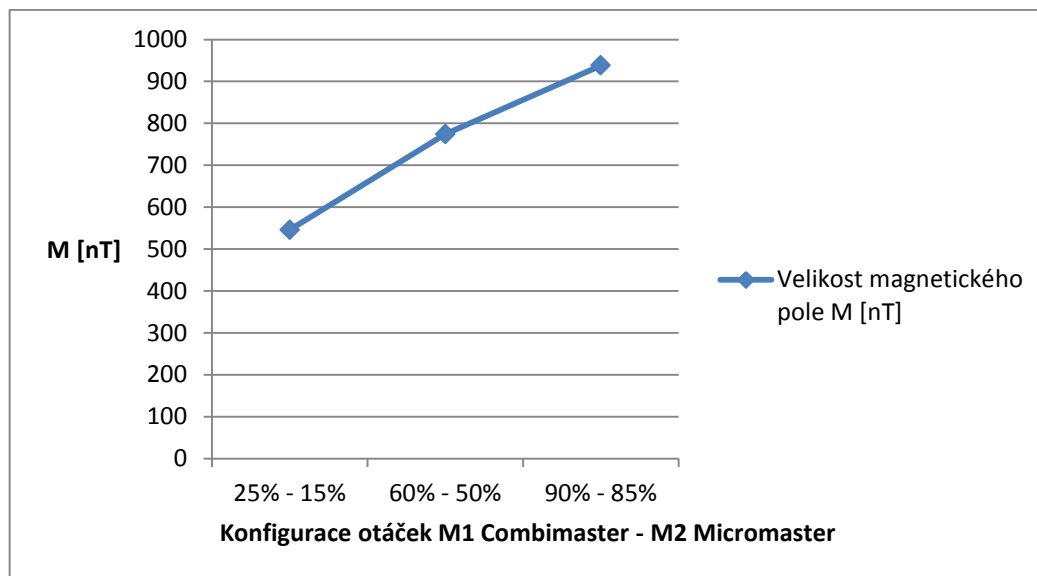
Pro měření intenzity elektrosmog soustavy asynchronních motorů nám sloužil výše popsaný digitální analyzátor elektrosmog ME 3851A. Při měření elektrického a magnetického pole byla nastavena stejná šířka pásma 5 Hz až 100 kHz. Měření elektrického pole proběhlo díky malým naměřeným hodnotám v nastaveném rozsahu 200 V/m. Pro měření magnetického pole byl zvolen rozsah 2000 nT.

Tab. 15. Hodnoty elektrického a magnetického pole naměřené při třech variantách konfigurace otáček.

<u>Combimaster - Micromaster</u>	<u>E [V/m]</u>	<u>M [nT]</u>
25% - 15%	30,8	546
60% - 50%	29,4	774
90% - 85%	29	938



Graf 10. Závislost velikosti elektrického pole na konfiguraci otáček motorů.



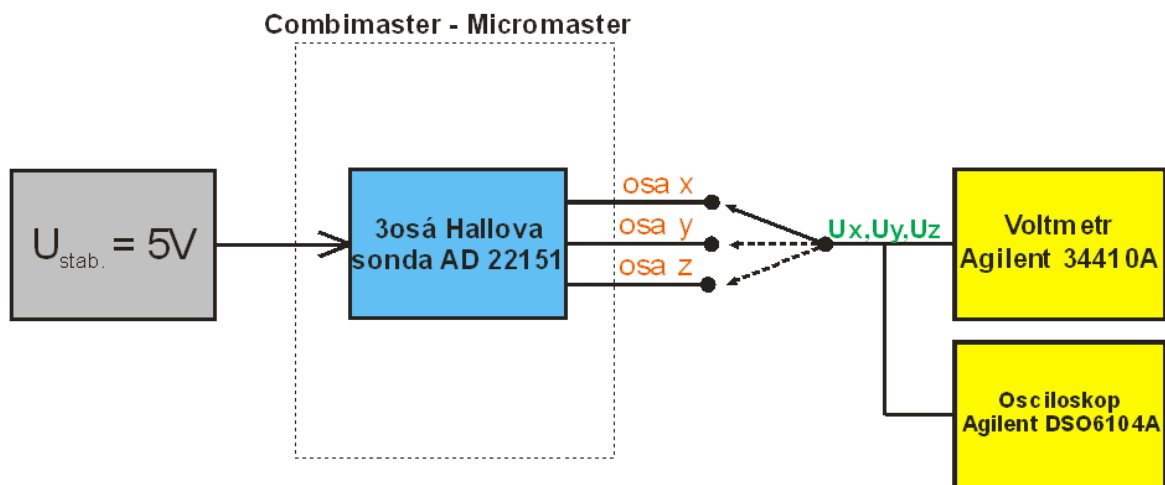
Graf 11. Závislost velikosti magnetického pole na konfiguraci otáček motorů.

8.1 Vyhodnocení měření intenzity elektrosmogu

Měření elektrosmogu při třech variantách konfigurace otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster proběhlo bez obtíží. Ze změřených hodnot intenzity elektrického a magnetického pole byly vytvořeny výše uvedené grafy. Intenzita elektrického pole v závislosti na zvyšujícím se počtu otáček motorů měla mírně klesající tendenci. Rozdíl intenzity elektrického pole mezi první a třetí konfigurací otáček motorů byl pouze $\Delta 1,8\text{V/m}$. Hodnoty intenzity magnetického pole měly v závislosti na zvyšujícím se počtu otáček motorů rostoucí charakter. Rozdíl intenzity magnetického pole mezi první a třetí konfigurací otáček motorů byl 392 nT.

9 KOMPARATIVNÍ MĚŘENÍ MAGNETICKÉHO POLE ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ

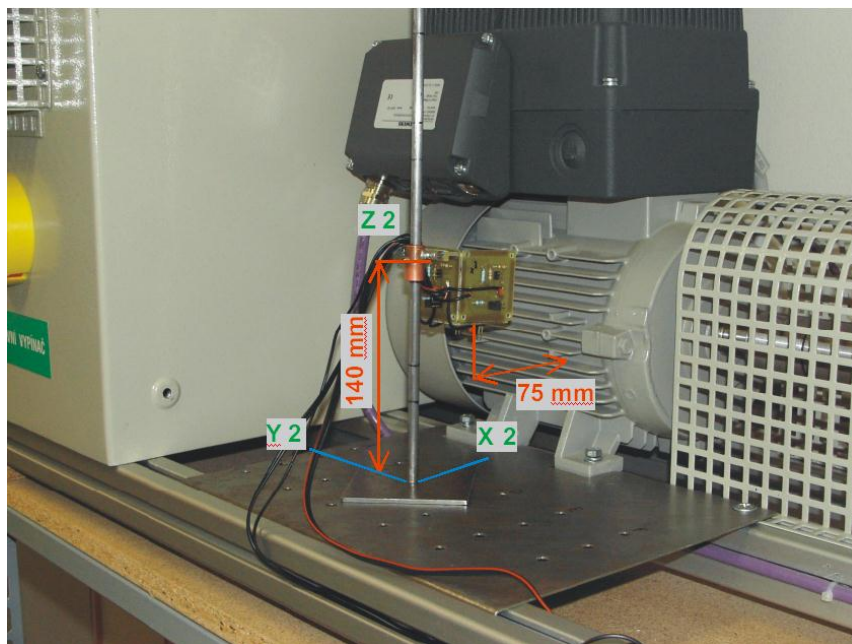
Účel komparativního měření spočíval v porovnání hodnot magnetické indukce získané axiální sondou Gaussmetru a 3osou sondou AD22151 v dané poloze vůči M1 Combimaster a M2 Micromaster. Při měření magnetického pole nacházejícího se kolem asynchronních motorů si bylo potřeba uvědomit, že asynchronní motory generují do prostoru střídavé magnetické pole, jehož dominantní kmitočet činí 50Hz. Z tohoto důvodu byl Gaussmetr nastaven na měření střídavého magnetického pole a hodnoty byly zobrazovány na displeji v jednotkách Gauss. U 3osé Hallovy sondy se velikost výstupního napětí snímala střídavým voltmetrem Agilent 34410A, tvar výstupního napětí sondy byl snímán osciloskopem Agilent DSO6104A.



Obr. 59. Blokové schéma měření magnetického pole asynchronních motorů.

Měření bylo provedeno u obou motorů M1 Combimaster a M2 Micromaster v poloze o souřadnicích X2, Y2, Z2 při třech variantách nastavení otáček. V této poloze byla 3osá sonda AD22151 uchycena pomoci pevné konstrukce.² Axiální sonda Gaussmetru byla do dané polohy v osách „x“, „y“, „z“ přikládána ručně.

² Více o konstrukci v kapitole 10



Obr. 60. Poloha sondy vůči měřenému asynchronnímu motoru pro komparační měření.

Výstupní napětí sondy se vyznačovalo nepřetržitým kmitáním v řádu milivoltů. Byl proveden pokus, kdy se snížila citlivost sondy za účelem snížení šumu, ale tento pokus byl neúspěšný. Šum měl parazitní vliv na velikost amplitudy výstupního napětí a byl způsoben cizími okolními magnetickými poli, které se nacházely kolem měřených asynchronních motorů.

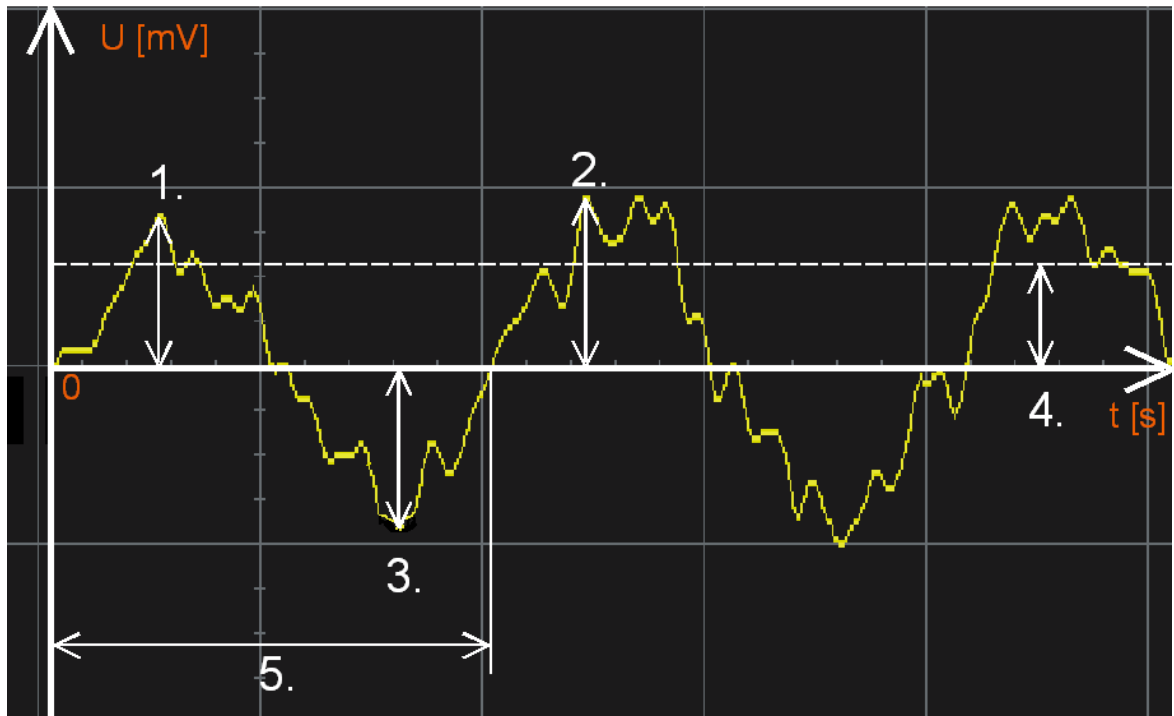
Výstupní klidové napětí díky šumu kolísalo v rozsahu 56 - 64 mV tj. ± 4 mV. Hodnota šumu výstupního napětí při běhu asynchronních motorů ve všech variantách nastavení otáček se pohybovala v maximálním rozkmitu ± 12 mV. Průběhy výstupních napětí Hallovy sondy AD22151 včetně výpočtů jsou doloženy snímky z osciloskopu Agilent DSO6104A. Pro dané body vyznačené v Obr. 61, Obr. 62 platí následující vztahy:

Výpočet efektivní hodnoty:

$$U_{ef} = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}} \quad (25)$$

Výpočet kmitočtu:

$$f = \frac{1}{T} \quad (26)$$



Obr. 61. Průběh klidového výstupního napětí tříosé Hallovy sondy umístěné v poloze X2, Y2, Z2.

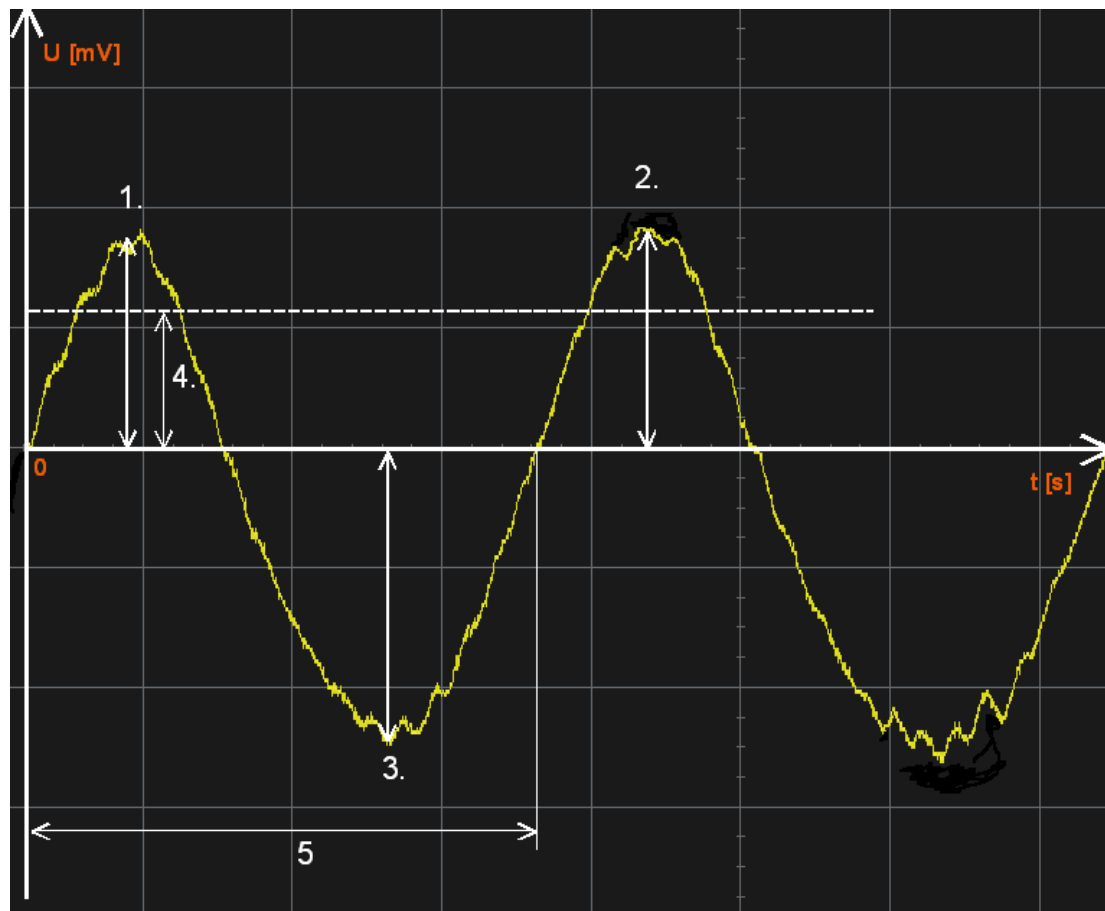
$$U_{\max} = 83 \text{ mV} \Rightarrow U_{\text{ef}} = 59 \text{ mV}$$

$$U_{\max} = 88 \text{ mV} \Rightarrow U_{\text{ef}} = 62 \text{ mV}$$

$$U_{\min} = 81 \text{ mV}$$

Průměrná hodnota efektivního napětí $U_{\text{ef}} = 60 \text{ mV}$

$$T = 0,018 \text{ s} \Rightarrow f = 55,56 \text{ Hz}$$



Obr. 62. Průběh výstupního napětí tříosé Hallovy sondy na ose „y“ umístěné v poloze X2, Y2, Z2 u motoru M1 při nastavení otáček Combimaster 25% - Mikromaster 15%.

$$U_{\max} = 1331 \text{ mV} \Rightarrow U_{\text{ef}} = 941 \text{ mV}$$

$$U_{\max} = 1358 \text{ mV} \Rightarrow U_{\text{ef}} = 960 \text{ mV}$$

$$U_{\min} = 1586 \text{ mV}$$

Průměrná hodnota efektivního napětí $U_{\text{ef}} = 948 \text{ mV}$

$$T = 0,019 \text{ s} \Rightarrow f = 52,63 \text{ Hz}$$

Jak bylo výše uvedeno, na výstupu 3osé Hallovy sondy AD22151 se vyskytovaly hodnoty napětí U_x , U_y , U_z , které se převedly na velikost magnetické indukce \mathbf{B} [G] pomocí následujícího vztahu:

$$B_x(y, z) = \frac{U_x(y, z) - U_0}{132 \text{ mV/G}} \quad (27)$$

U_0 – klidové výstupní napětí $60 \text{ mV} \pm 4 \text{ mV}$

1. konfigurace otáček

M1 Combimaster - 25%

M2 Micromaster - 15%

Délka měření - 10 minut

Tab. 16. Naměřené hodnoty magnetické indukce sondou AD22151 a axiální sondou u motorů **M1**, **M2** při první konfiguraci otáček.

Druh sondy	Sonda AD22151 - citlivost 132 mV/G				Gaussmetr - axiální sonda	
Motor	M1		M2		M1	M2
osa / veličina	U_1 [mV]	B_{AD} [G]	U_1 [mV]	B_{AD} [G]	B_{AXIAL} [G]	
x	289	1,73	90	0,23	1,11	0,15
y	951	6,75	137	0,58	2,2	0,25
z	853	6,01	145	0,64	2,58	0,28

Výpočet rozdílu naměřených hodnot magnetické indukce mezi sondou AD22151 a axiální sondou Gaussmetru pro motory M1 a M2 v jednotlivých osách je dán vztahem:

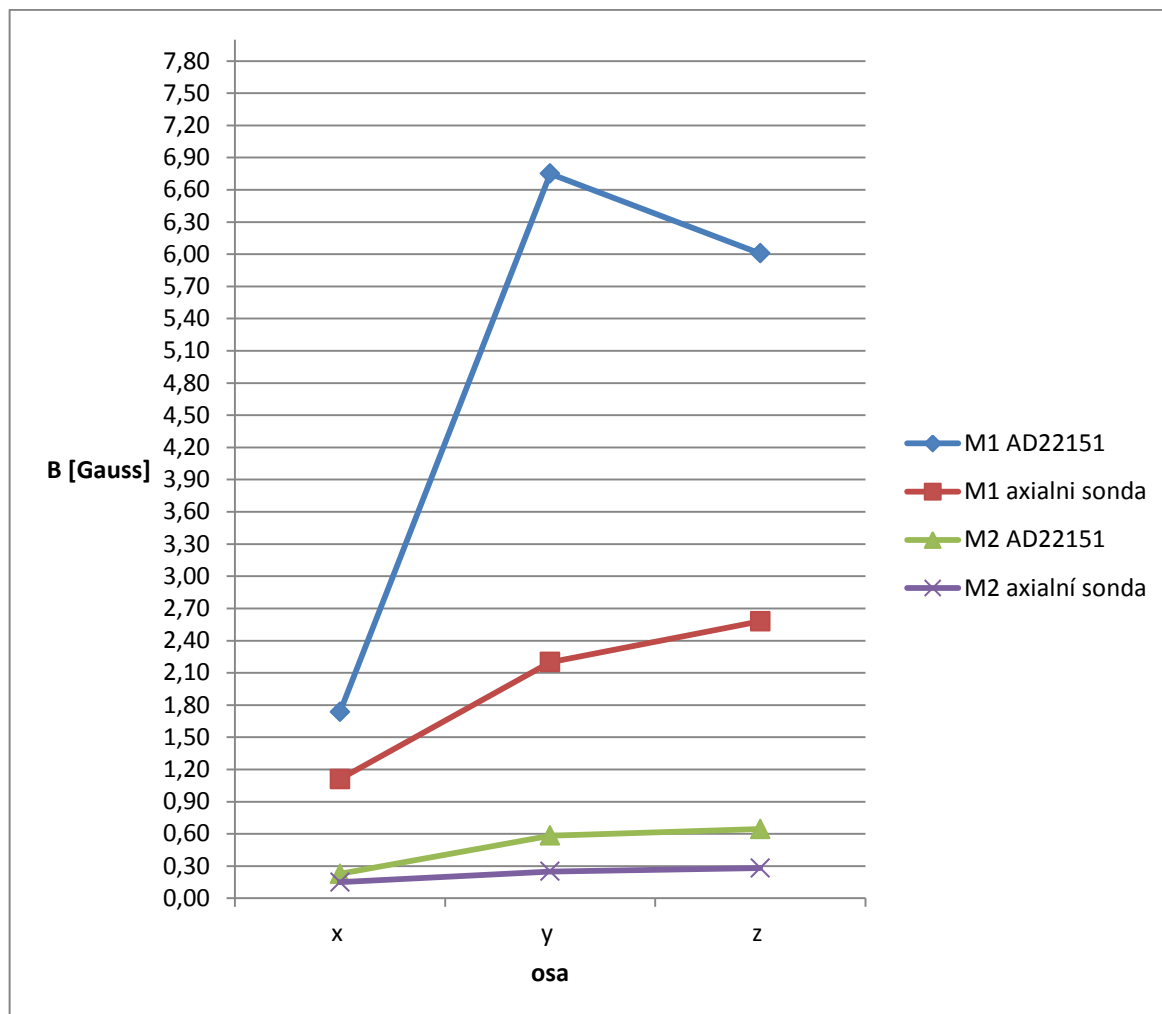
$$\Delta M1(2) = B_{AD} - B_{AXIAL} \quad (28)$$

Pro výpočet střední hodnoty \bar{x} rozdílů naměřených hodnot magnetické indukce v osách „x“, „y“, „z“ u jednotlivých motorů platí vztah:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (29)$$

Tab. 17. Rozdíly naměřených hodnot u motorů **M1**, **M2** při první konfiguraci otáček.

Motor	$\Delta M1$	\bar{x}	$\Delta M2$	\bar{x}
osa / veličina	B [G]			
x	0,62	2,87	0,08	0,26
y	4,55		0,33	
z	3,43		0,36	



Graf 12. Velikost magnetické indukce B naměřené sondou AD22151 a axiální sondou v ose „ x “, „ y “, „ z “ u motorů **M1**, **M2** při první konfiguraci otáček.

2. konfigurace otáček

M1 Combimaster - 60%

M2 Micromaster - 50%

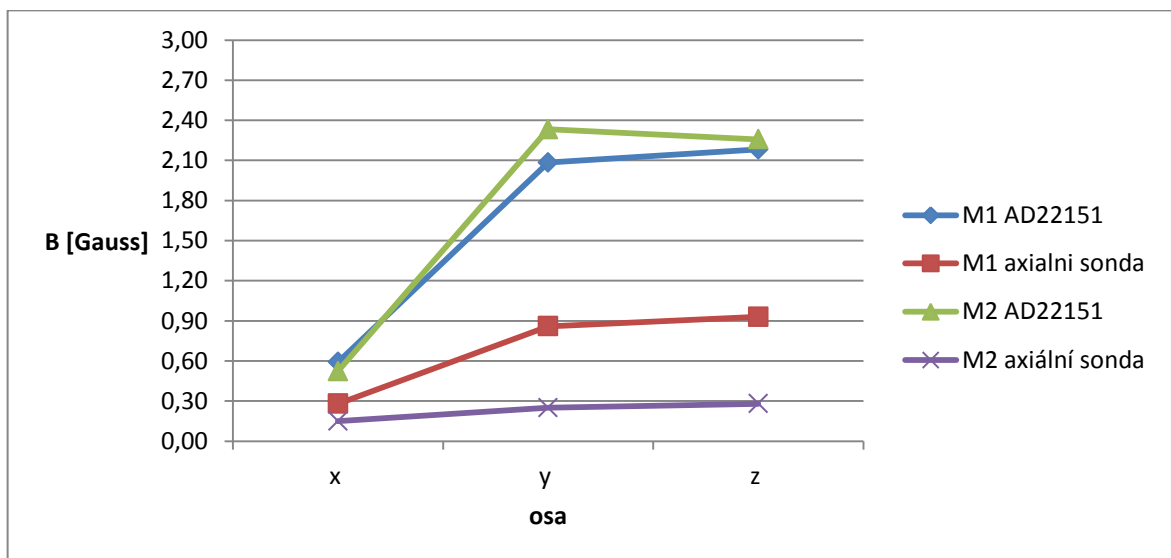
Délka měření - 10 minut

Tab. 18. Naměřené hodnoty magnetické indukce sondou AD22151 a axiální sondou u motorů **M1**, **M2** při druhé konfiguraci otáček.

Druh sondy	Sonda AD22151 - citlivost 132 mV/G				Gaussmetr - axiální sonda	
Motor	M1		M2		M1	M2
osa / veličina	U_i [mV]	B_{AD} [G]	U_i [mV]	B_{AD} [G]	B_{AXIAL} [G]	
x	138	0,59	129	0,52	0,28	0,4
y	335	2,08	368	2,33	0,86	0,85
z	348	2,18	358	2,26	0,93	0,88

Tab. 19. Rozdíly naměřených hodnot u motorů **M1**, **M2** při druhé konfiguraci otáček.

Motor	$\Delta M1$	\bar{x}	$\Delta M2$	\bar{x}
osa / veličina	B [G]			
x	0,31	0,93	0,12	0,99
y	1,22		1,48	
z	1,25		1,38	



Graf 13. Velikost magnetické indukce B naměřené sondou AD22151 a axiální sondou v ose „x“, „y“, „z“ u motorů **M1**, **M2** při druhé konfiguraci otáček.

3. konfigurace otáček

M1 Combimaster - 90%

M2 Micromaster - 85%

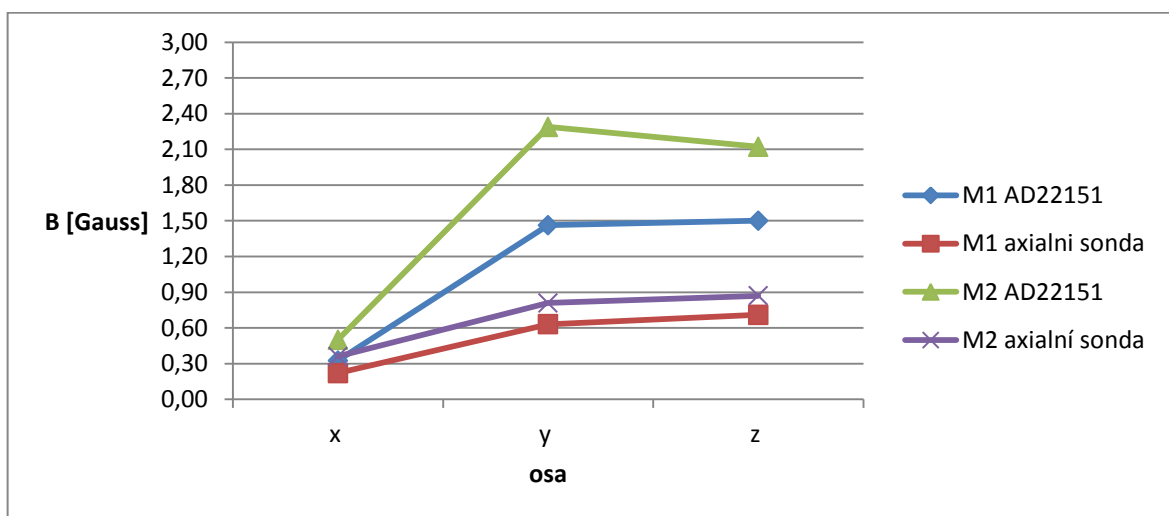
Délka měření - 10 minut

Tab. 20. Naměřené hodnoty magnetické indukce sondou AD22151 a axiální sondou u motorů M1, M2 při třetí konfiguraci otáček.

Druh sondy	Sonda AD22151 - citlivost 132 mV/G				Gaussmetr - axiální sonda	
Motor	M1		M2		M1	M2
osa / veličina	U_i [mV]	B_{AD} [G]	U_i [mV]	B_{AD} [G]	B_{AXIAL} [G]	
x	103	0,33	126	0,50	0,22	0,36
y	253	1,46	362	2,29	0,63	0,81
z	258	1,50	340	2,12	0,71	0,87

Tab. 21. Rozdíly naměřených hodnot u motorů M1, M2 při třetí konfiguraci otáček.

Motor	$\Delta M1$	\bar{x}	$\Delta M2$	\bar{x}
osa / veličina	B [G]			
x	0,11	0,58	0,14	0,96
y	0,83		1,48	
z	0,79		1,25	



Graf 14. Velikost magnetické indukce B naměřené sondou AD22151 a axiální sondou v ose „x“, „y“, „z“ u motorů M1, M2 při třetí konfiguraci otáček.

9.1 Vyhodnocení komparativního měření

Komparativním měřením jsme nezjistili pouze rozdíl naměřených hodnot magnetické indukce mezi axiální sondou a sondou AD22151, ale bylo také zjištěno, na základě výsledků měření, který asynchronní motor při konkrétní konfiguraci otáček vyznačuje do prostoru střídavé magnetické pole s nejvyšší či nejnižší intenzitou, která se projevila také na rozdílu naměřených hodnot magnetické indukce mezi oběma sondami.

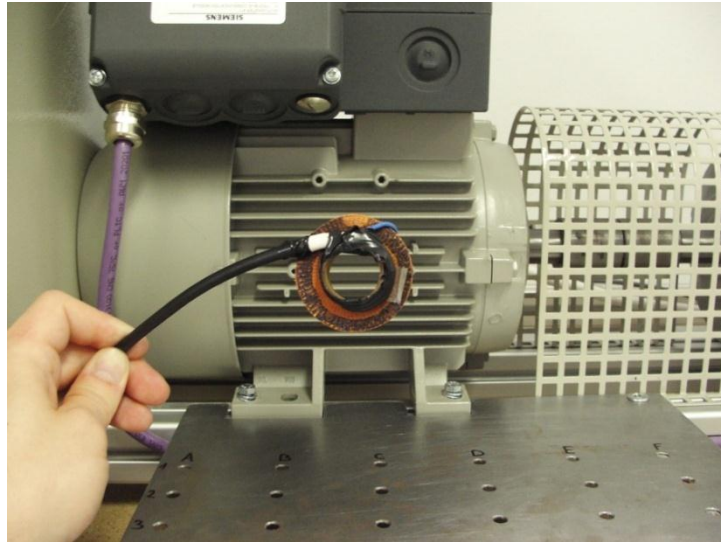
Jak bylo výše zmíněno, naměřené hodnoty magnetické indukce axiální sondou Gaussmetru a sondou AD22151 se liší. Nejmenší rozdíl naměřených hodnot magnetické indukce mezi oběma sondami se projevil v ose „x“, kdy v této ose byly naměřeny poměrně malé hodnoty magnetické indukce. V osách „y“ a „z“ již byly rozdíly hodnot magnetické indukce výrazně vyšší, protože v těchto osách se promítly vysoké hodnoty magnetické indukce.

Dále byla vypočítána střední hodnota rozdílu v osách „x“, „y“, „z“ u jednotlivých motorů. Z této střední hodnoty vyplynul největší rozdíl magnetické indukce mezi oběma sondami při první konfiguraci otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster na motoru M1, kdy hodnoty magnetické indukce sondy AD22151 průměrně převyšovaly hodnoty magnetické indukce naměřené axiální sondou o 2,87 Gauss, ale na motoru M2 byl rozdíl hodnot nejmenší z celé sady měření - 0,26 Gauss. Při druhé a třetí konfiguraci otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster byl kromě střední hodnoty u třetí varianty konfigurace otáček na motoru M1 střední rozdíl hodnoty magnetické indukce získané sondou AD22151 přibližně o 1 Gauss vyšší, v porovnání s hodnotami magnetické indukce axiální sondy.

Rozdíly naměřených hodnot magnetické indukce jsou způsobeny nelinearitou Hallovy sondy AD22151, která se projevuje při měření vysokých hodnot magnetické indukce. Linearitu Hallovy sondy AD22151 zřejmě způsobila nastavená vysoká citlivost, jejíž velikost byla pro měření magnetického pole asynchronních motorů nezbytná. Na přesnost naměřených hodnot magnetické indukce má vliv nejen nepřetržitě kmitání výstupního napětí ± 12 mV sondy AD22151, ale také nepřesné umístění axiální sondy Gaussmetru, která byla ručně přikládána do osy „x“, „y“, „z“.

9.1.1 Separátní měření cívkou se vzduchovým jádrem

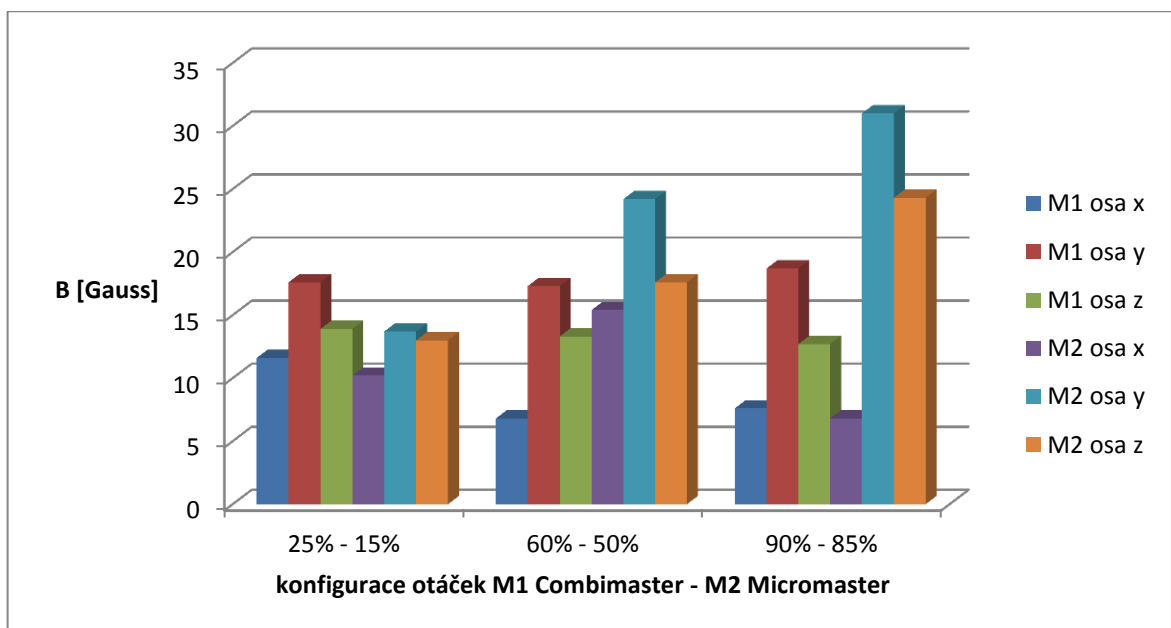
Separátní měření má pouze informativní charakter. Měření znázorňuje chování cívky, která se nachází ve střídavém magnetickém poli, ve kterém siločáry střídavého magnetického pole protínají závity cívky, která zaujímá polohu v ose „x“, „y“, „z“ a indukuje se v ní střídavé elektrické napětí. Tento postup měření potvrzuje, že výstupní napětí cívky v jednotlivých osách má rozdílnou hodnotu. Výstupní střídavé napětí cívky bylo získáno v dané poloze cívky a při konkrétní konfiguraci otáček motorů. Dále s hodnotami naměřeného napětí již nebylo dále pracováno, protože nevíme, jaký je v cívce magnetický tok.



Obr. 63. Měřicí cívka se vzduchovým jádrem v ose „y“.

Tab. 22. Naměřené hodnoty cívky u motorů **M1**, **M2** při všech variantách konfigurace otáček.

Cívka se vzduchovým jádrem						
Konfigurace otáček	C. M. 25% - M. M. 15%		C. M. 60% - M. M. 50%		C. M. 90% - M. M. 85%	
Motor	M1	M2	M1	M2	M1	M2
osa / veličina	U [mV]		U [mV]		U [mV]	
x	11,6	10,2	6,8	15,4	7,6	6,8
y	17,6	13,7	17,3	24,2	18,7	31
z	13,9	13	13,3	17,6	12,7	24,3



Graf 15. Závislost velikosti magnetické indukce cívky v ose „x“, „y“, „z“ u motorů **M1**, **M2** při všech konfiguracích otáček.

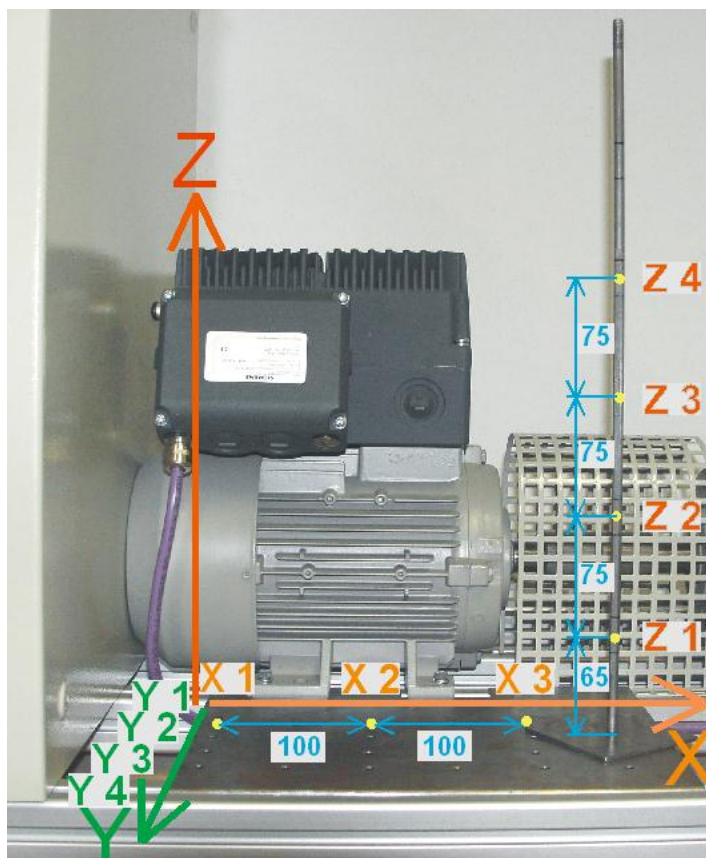
9.1.2 Vyhodnocení separačního měření cívkou se vzduchovým jádrem

Separací měření proběhlo ve stejné poloze u obou asynchronních motorů a při totožné konfiguraci otáček jako u předcházejícího komparačního měření. Při porovnání naměřených hodnot střídavého napětí cívky se střídavým napětím Hallovy sondy AD22151 vyplývá, že citlivost Hallovy sondy je mnohonásobně vyšší, než je citlivost použité cívky.

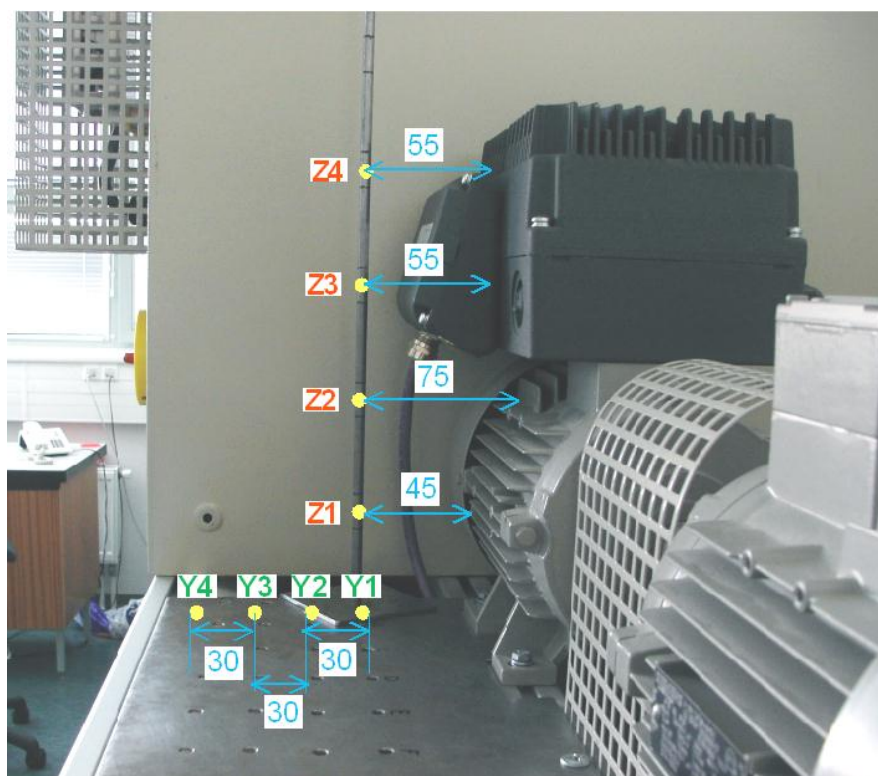
10 MĚŘENÍ MAGNETICKÉHO POLE ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ M1 COMBIMASTER – M2 MICROMASTER

Stěžejním úkolem měření bylo, na základně naměřených dat, prostorově vymodelovat tvar magnetického pole, které se nachází kolem asynchronních motorů M1 a M2. K samotnému měření byla použita již podrobně zmíněná 3osá Hallova sonda AD22151. Bylo potřeba, aby při měření 3osá sonda zaujíkala polohy v pomyslném kvádru po ose „x“, „y“, „z“. Pohyb ve směru osy „x“ představuje podélný pohyb kolem motorů, osa „y“ vyjadřuje vzdálenost od motorů a pohyb v ose „z“ znázorňuje vertikální polohy tj. výšku u asynchronních motorů. Jednotlivé polohy byly vyjádřeny v souřadnicích X1 - X3, Y1 - Y4, Z1 - Z4.

Aby sonda mohla být během měření pevně uchycena v dané souřadnici X, Y, Z, bylo zapotřebí zkonstruovat mechanickou konstrukci, která by zajistila pevné uchycení sondy v požadované měřené poloze. Sonda AD22151 byla upevněna prostřednictvím kovové tyče, na které byly vyznačeny rysky, které znázorňovaly vertikální body Z1 až Z4. Sonda byla do těchto bodů upevněna pomocí měděné objímky a upevňovacího šroubku. Do poloh X1 - X3 a Y1 - Y4 byla tříosá sonda spolu s tyčí zasouvána do předem vyvrtaných děr v základovém plechu.



Obr. 64. Rozmístění měřicích bodů kolem měřeného zařízení včetně jejich vzdáleností.



Obr. 65. Vzdálenosti jednotlivých bodu měření vůči měřenému zařízení.

10.1 Měření a prostorová vizualizace magnetického pole asynchronního motoru M1 Combimaster

Při měření magnetického pole 3osou sondou AD22151 bylo potřeba převést naměřené hodnoty napětí, které se pohybovaly v toleranci $\pm 12\text{mV}$ na magnetickou indukci pomocí vztahu uvedeného na straně 80. Z hodnot magnetické indukce B byl vypočítán plošný a následně prostorový vektor, který nám umožní graficky zpracovat tvar magnetického pole kolem motorů M1 Combimaster. U grafických prostorových modelů předpokládáme, že na levé straně je umístěn motor M1 Combimaster.

Plošný vektor:

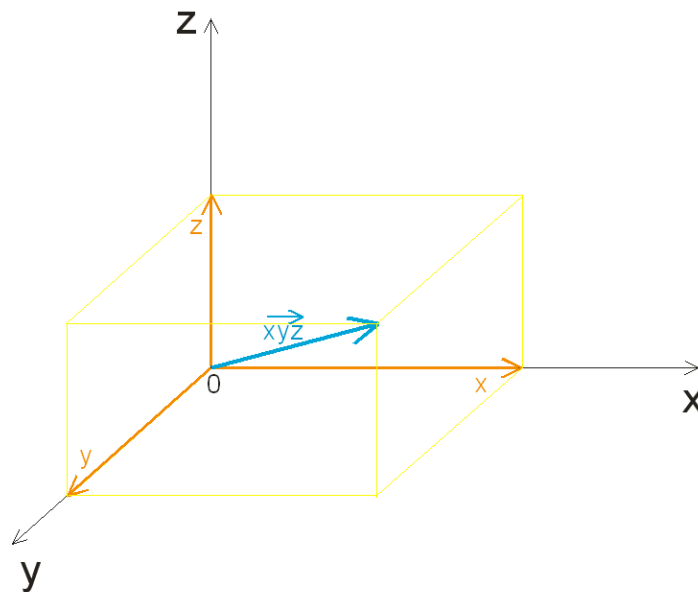
$$\vec{x} = \sqrt{(z^2 + y^2)} \quad yz ; \vec{x} \quad (30)$$

$$\vec{y} = \sqrt{(z^2 + x^2)} \quad xz ; \vec{y} \quad (31)$$

$$\vec{z} = \sqrt{(x^2 + y^2)} \quad xy ; \vec{z} \quad (32)$$

Prostorový vektor:

$$\overline{xyz} = \sqrt{((\overline{xz})^2 + \vec{y}^2)} \quad (33)$$



Obr. 66. Vizualizace prostorového vektoru „ \overline{xyz} “.

1. konfigurace otáček

M1 Combimaster - 25%

M2 Micromaster - 15%

Délka měření - 30 minut

Zpracování naměřených hodnot pro vizualizaci ve vertikální rovině Z1

Tab. 23. Hodnoty napětí na jednotlivých osách sondy AD22151 u motoru M1.

výška	Z 1								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]
Y 1	787	341	420	436	1549	1402	272	225	320
Y 2	400	246	323	256	749	806	216	188	261
Y 3	233	174	229	130	358	440	162	148	199
Y 4	150	127	163	88	209	250	120	111	145

Tab. 24. Hodnoty magnetické indukce u motoru M1.

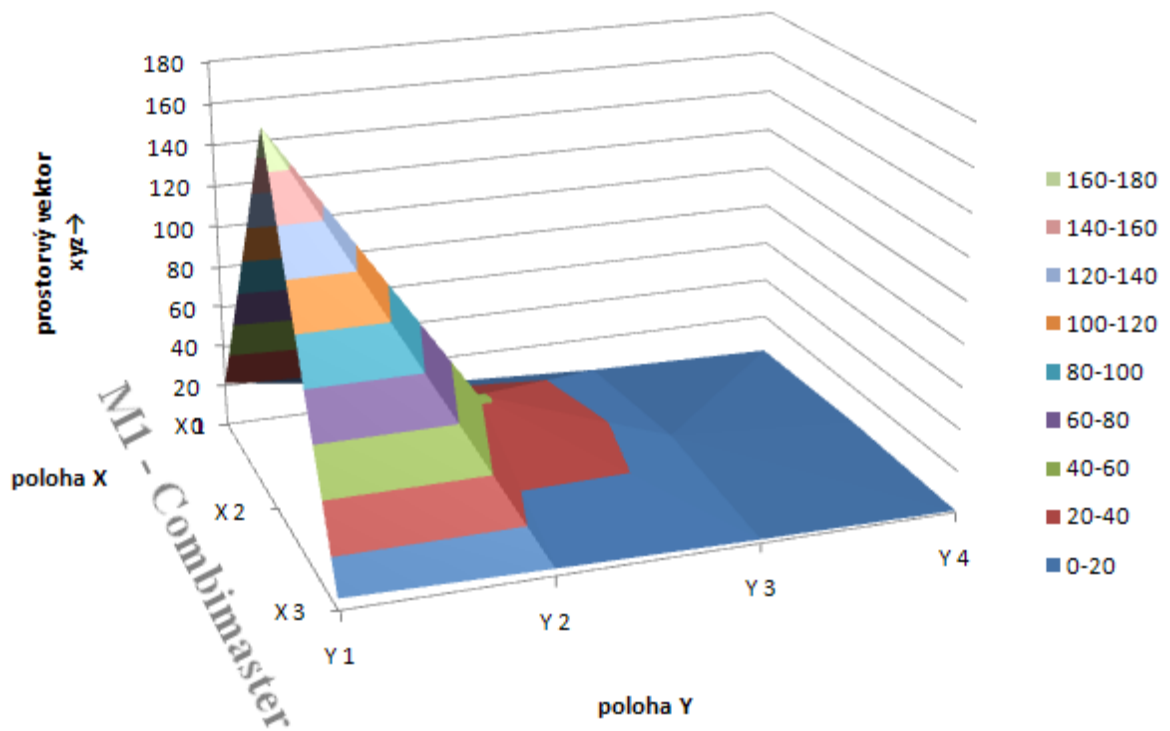
výška	Z 1								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]
Y 1	5,51	2,13	2,73	2,85	11,28	10,17	1,61	1,25	1,97
Y 2	2,58	1,41	1,99	1,48	5,22	5,65	1,18	0,97	1,52
Y 3	1,31	0,86	1,28	0,53	2,26	2,88	0,77	0,67	1,05
Y 4	0,68	0,51	0,78	0,21	1,13	1,44	0,45	0,39	0,64

Tab. 25. Hodnoty plošných vektorů u motoru M1.

výška	Z 1								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	$yz ; \vec{x}$	$xz ; \vec{y}$	$xy ; \vec{z}$	$yz ; \vec{x}$	$xz ; \vec{y}$	$xy ; \vec{z}$	$yz ; \vec{x}$	$xz ; \vec{y}$	$xy ; \vec{z}$
Y 1	3,46	6,15	5,90	15,19	10,56	11,63	2,33	2,54	2,04
Y 2	2,44	3,26	2,94	7,69	5,84	5,43	1,81	1,93	1,53
Y 3	1,54	1,83	1,57	3,66	2,93	2,32	1,25	1,31	1,02
Y 4	0,93	1,04	0,85	1,83	1,45	1,15	0,75	0,79	0,60

Tab. 26. Hodnoty prostorových vektorů u motoru M1.

výška	Z 1		
body X	X 1	X 2	X 3
body Y / osa sondy	$\vec{xy\vec{z}}$	$\vec{xy\vec{z}}$	$\vec{xy\vec{z}}$
Y 1	21,33	176,99	5,39
Y 2	7,87	42,16	3,37
Y 3	3,04	8,97	1,82
Y 4	1,30	2,56	0,91



Graf 16. Vizualizace prostorového vektoru u motoru **MI** ve výškovém bodě **Z 1** při první konfiguraci otáček.

Zpracování naměřených hodnot pro vizualizaci ve vertikální rovině Z2

Tab. 27 Hodnoty napětí na jednotlivých osách sondy AD22151 u motoru **MI**.

výška	Z 2								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]
Y 1	958	383	561	538	1859	1788	257	215	380
Y 2	456	310	381	291	948	864	223	204	282
Y 3	271	212	225	146	472	450	187	183	219
Y 4	168	153	150	100	268	243	136	137	154

Tab. 28. Hodnoty magnetické indukce u motoru **MI**.

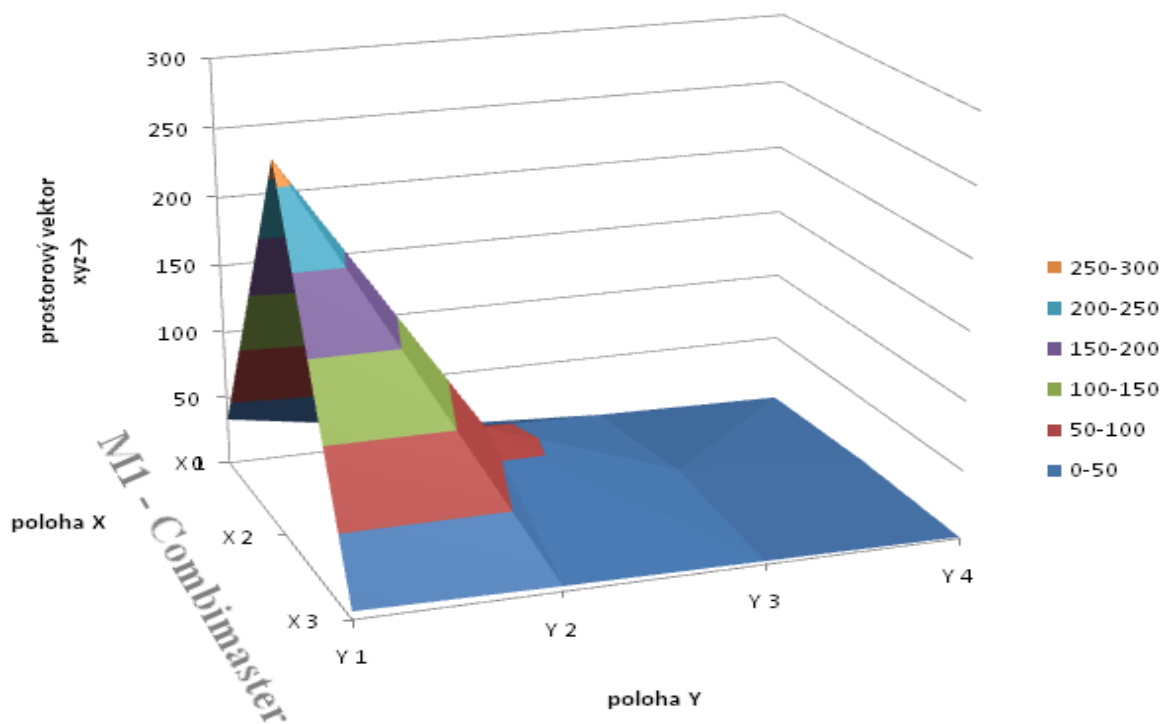
výška	Z 2								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]
Y 1	6,80	2,45	3,80	3,62	13,63	13,09	1,49	1,17	2,42
Y 2	3,00	1,89	2,43	1,75	6,73	6,09	1,23	1,09	1,68
Y 3	1,60	1,15	1,25	0,65	3,12	2,95	0,96	0,93	1,20
Y 4	0,82	0,70	0,68	0,30	1,58	1,39	0,58	0,58	0,71

Tab. 29. Hodnoty plošných vektorů u motoru **MI**.

výška	Z 2								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	yz ; \vec{x}	xz ; \vec{y}	xy ; \vec{z}	yz ; \vec{x}	xz ; \vec{y}	xy ; \vec{z}	yz ; \vec{x}	xz ; \vec{y}	xy ; \vec{z}
Y 1	4,52	7,79	7,23	18,90	13,58	14,10	2,69	2,85	1,90
Y 2	3,08	3,86	3,55	9,07	6,34	6,95	2,00	2,09	1,65
Y 3	1,70	2,03	1,97	4,30	3,03	3,19	1,52	1,54	1,34
Y 4	0,98	1,07	1,08	2,10	1,42	1,60	0,92	0,92	0,82

 Tab. 30. Hodnoty prostorových vektorů u motoru **MI**.

výška	Z 2		
body X	X 1	X 2	X 3
body Y / osa sondy	\vec{xyz}	\vec{xyz}	\vec{xyz}
Y 1	33,57	266,83	5,85
Y 2	11,60	63,40	3,91
Y 3	3,92	14,03	2,56
Y 4	1,50	3,65	1,19


 Graf 17 Vizualizace prostorového vektoru u motoru **MI** ve výškovém bodě **Z 2** při první konfiguraci otáček.

*Zpracování naměřených hodnot pro vizualizaci ve vertikální rovině Z3*Tab. 31. Hodnoty napětí na jednotlivých osách sondy AD22151 u motoru **MI**.

výška	Z 3								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	\underline{U}_x [mV]	\underline{U}_y [mV]	\underline{U}_z [mV]	\underline{U}_x [mV]	\underline{U}_y [mV]	\underline{U}_z [mV]	\underline{U}_x [mV]	\underline{U}_y [mV]	\underline{U}_z [mV]
Y 1	189	167	172	264	833	921	229	236	223
Y 2	187	165	167	177	499	581	179	181	180
Y 3	185	164	163	106	284	298	133	150	146
Y 4	131	127	116	91	183	181	105	128	120

Tab. 32. Hodnoty magnetické indukce u motoru **MI**.

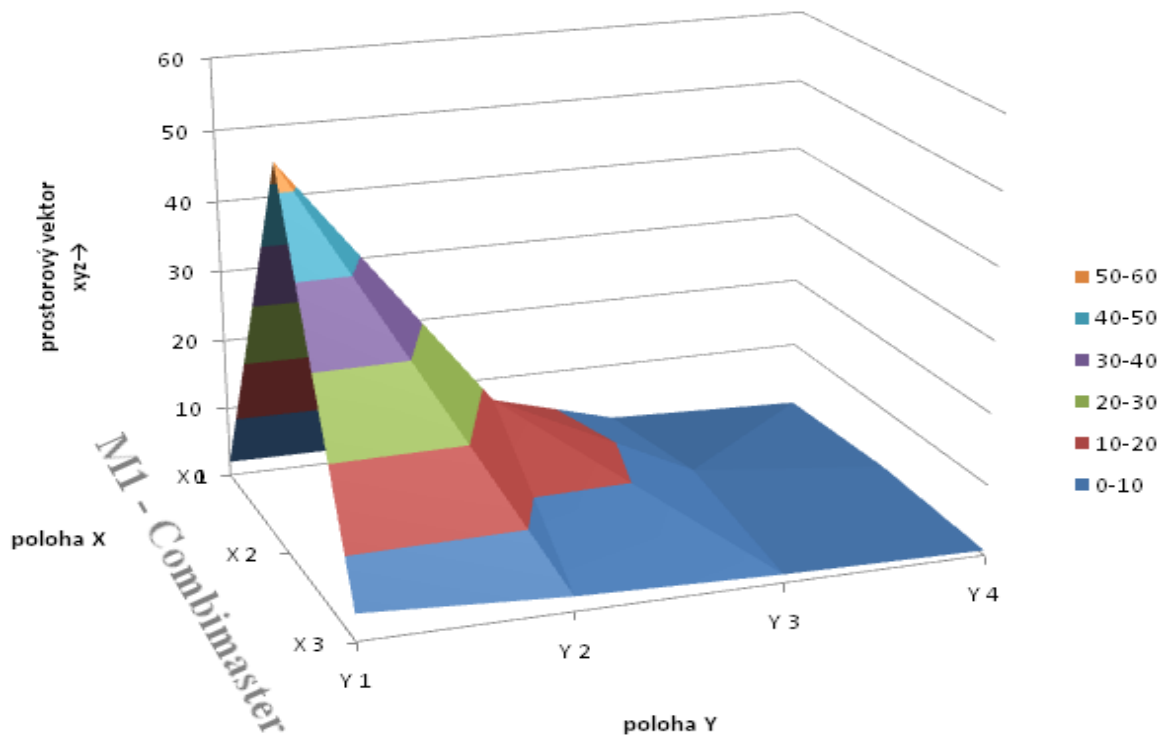
výška	Z 3								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	\underline{B}_x [G]	\underline{B}_y [G]	\underline{B}_z [G]	\underline{B}_x [G]	\underline{B}_y [G]	\underline{B}_z [G]	\underline{B}_x [G]	\underline{B}_y [G]	\underline{B}_z [G]
Y 1	0,98	0,81	0,85	1,55	5,86	6,52	1,28	1,33	1,23
Y 2	0,96	0,80	0,81	0,89	3,33	3,95	0,90	0,92	0,91
Y 3	0,95	0,79	0,78	0,35	1,70	1,80	0,55	0,68	0,65
Y 4	0,54	0,51	0,42	0,23	0,93	0,92	0,34	0,52	0,45

Tab. 33. Hodnoty plošných vektorů u motoru **MI**.

výška	Z 3								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	$\underline{yz}; \vec{x}$	$\underline{xz}; \vec{y}$	$\underline{xy}; \vec{z}$	$\underline{yz}; \vec{x}$	$\underline{xz}; \vec{y}$	$\underline{xy}; \vec{z}$	$\underline{yz}; \vec{x}$	$\underline{xz}; \vec{y}$	$\underline{xy}; \vec{z}$
Y 1	1,17	1,29	1,27	8,77	6,70	6,06	1,82	1,78	1,85
Y 2	1,14	1,26	1,25	5,16	4,05	3,44	1,29	1,28	1,29
Y 3	1,11	1,23	1,23	2,48	1,84	1,73	0,94	0,85	0,88
Y 4	0,66	0,69	0,74	1,31	0,95	0,96	0,69	0,57	0,62

Tab. 34. Hodnoty prostorových vektorů u motoru **MI**.

výška	Z 3		
body X	X 1	X 2	X 3
body Y / osa sondy	\overline{xyz}	\overline{xyz}	\overline{xyz}
Y 1	1,97	53,51	3,80
Y 2	1,90	18,22	2,10
Y 3	1,84	4,67	1,19
Y 4	0,84	1,57	0,71



Graf 18. Vizualizace prostorového vektoru u motoru **M1** ve výškovém bodě **Z 3** při první konfiguraci otáček.

Zpracování naměřených hodnot pro vizualizaci ve vertikální rovině Z4

Tab. 35. Hodnoty napětí na jednotlivých osách sondy AD22151 u motoru **M1**.

výška	Z 4								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]
Y 1	127	124	121	119	246	339	117	132	128
Y 2	123	121	116	94	190	223	111	123	112
Y 3	100	103	109	79	140	152	97	107	95
Y 4	95	92	82	77	111	107	82	94	80

Tab. 36. Hodnoty magnetické indukce u motoru **M1**.

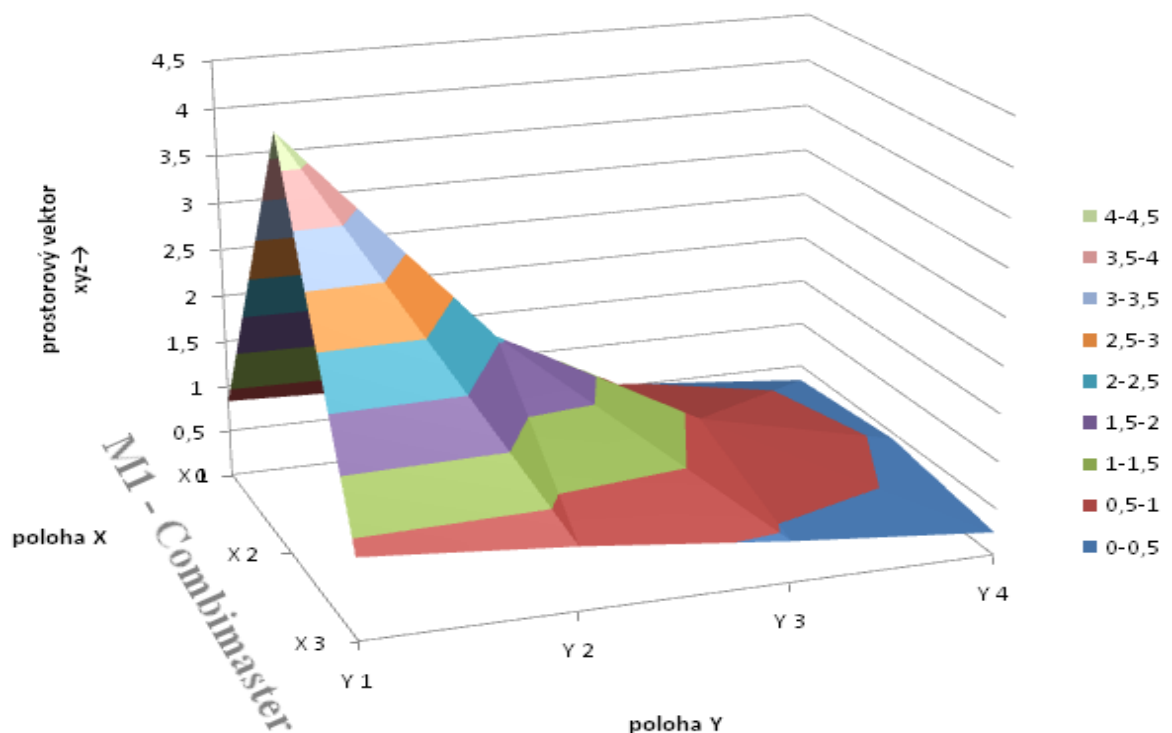
výška	Z 4								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]
Y 1	0,51	0,48	0,46	0,45	1,41	2,11	0,43	0,55	0,52
Y 2	0,48	0,46	0,42	0,26	0,98	1,23	0,39	0,48	0,39
Y 3	0,30	0,33	0,37	0,14	0,61	0,70	0,28	0,36	0,27
Y 4	0,27	0,24	0,17	0,13	0,39	0,36	0,17	0,26	0,15

Tab. 37. Hodnoty plošných vektorů u motoru **M1**.

výška	<u>Z 4</u>								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	yz ; \vec{x}	xz ; \vec{y}	xy ; \vec{z}	yz ; \vec{x}	xz ; \vec{y}	xy ; \vec{z}	yz ; \vec{x}	xz ; \vec{y}	xy ; \vec{z}
Y 1	0,67	0,69	0,70	2,54	2,16	1,48	0,75	0,67	0,70
Y 2	0,63	0,64	0,66	1,58	1,26	1,02	0,62	0,55	0,61
Y 3	0,49	0,48	0,44	0,92	0,71	0,62	0,44	0,39	0,45
Y 4	0,29	0,31	0,36	0,53	0,38	0,41	0,30	0,23	0,31

Tab. 38. Hodnoty prostorových vektorů u motoru **M1**.

výška	<u>Z 4</u>		
body X	X 1	X 2	X 3
body Y / osa sondy	\overrightarrow{xyz}	\overrightarrow{xyz}	\overrightarrow{xyz}
Y 1	0,83	4,33	0,85
Y 2	0,76	2,04	0,67
Y 3	0,53	0,92	0,44
Y 4	0,33	0,43	0,24



Graf 19. Vizualizace prostorového vektoru u motoru **M1** ve výškovém bodě **Z 4** při první konfiguraci otáčecí.

2. konfigurace otáček

M1 Combimaster - 60%

M2 Micromaster - 50%

Délka měření - 30 minut

Zpracování naměřených hodnot pro vizualizaci ve vertikální rovině Z1

Tab. 39. Hodnoty napětí na jednotlivých osách sondy AD22151 u motoru M1.

výška	Z 1								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]
Y 1	343	154	150	182	551	655	145	109	129
Y 2	178	124	130	123	271	320	122	103	113
Y 3	117	99	100	85	152	163	92	89	91
Y 4	87	89	86	82	108	112	81	79	88

Tab. 40. Hodnoty magnetické indukce u motoru M1.

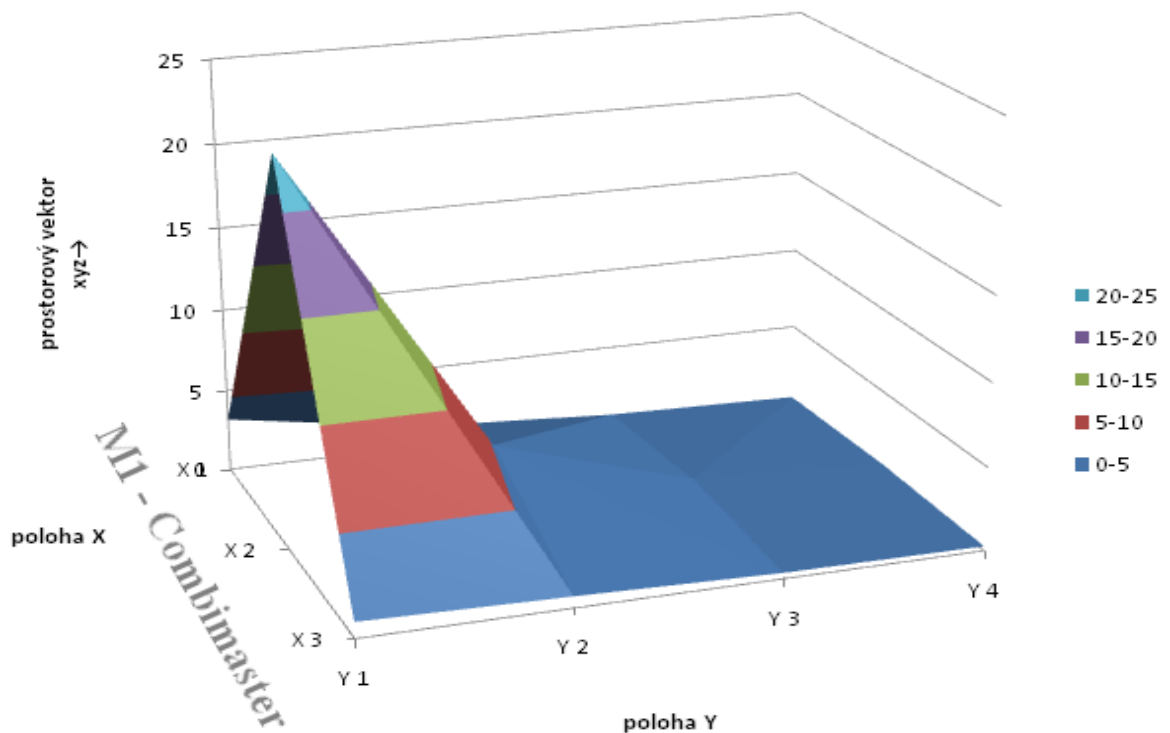
výška	Z 1								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]
Y 1	2,14	0,71	0,68	0,92	3,72	4,51	0,64	0,37	0,52
Y 2	0,89	0,48	0,53	0,48	1,60	1,97	0,47	0,33	0,40
Y 3	0,43	0,30	0,30	0,19	0,70	0,78	0,24	0,22	0,23
Y 4	0,20	0,22	0,20	0,17	0,36	0,39	0,16	0,14	0,21

Tab. 41. Hodnoty plošných vektorů u motoru M1.

výška	Z 1								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	$yz; \vec{x}$	$xz; \vec{y}$	$xy; \vec{z}$	$yz; \vec{x}$	$xz; \vec{y}$	$xy; \vec{z}$	$yz; \vec{x}$	$xz; \vec{y}$	$xy; \vec{z}$
Y 1	0,99	2,25	2,26	5,84	4,60	3,83	0,64	0,83	0,74
Y 2	0,72	1,04	1,02	2,54	2,03	1,67	0,52	0,62	0,57
Y 3	0,42	0,53	0,52	1,05	0,80	0,72	0,32	0,34	0,33
Y 4	0,30	0,28	0,30	0,54	0,43	0,40	0,26	0,27	0,21

Tab. 42. Hodnoty prostorových vektorů u motoru M1.

výška	Z 1		
body X	X 1	X 2	X 3
body Y / osa sondy	\overline{xyz}	\overline{xyz}	\overline{xyz}
Y 1	3,17	22,87	0,96
Y 2	1,27	4,69	0,68
Y 3	0,57	1,10	0,35
Y 4	0,30	0,48	0,27



Graf 20. Vizualizace prostorového vektoru u motoru **MI** ve výškovém bodě **Z 1** při druhé konfiguraci otáček.

Zpracování naměřených hodnot pro vizualizaci ve vertikální rovině Z2

Tab. 43. Hodnoty napětí na jednotlivých osách sondy AD22151 u motoru **MI**.

výška	Z 2								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]
Y 1	417	162	221	179	651	767	132	110	163
Y 2	210	136	152	143	332	353	119	103	120
Y 3	120	108	101	91	179	162	100	95	93
Y 4	91	89	80	77	119	102	84	83	78

Tab. 44. Hodnoty magnetické indukce u motoru **MI**.

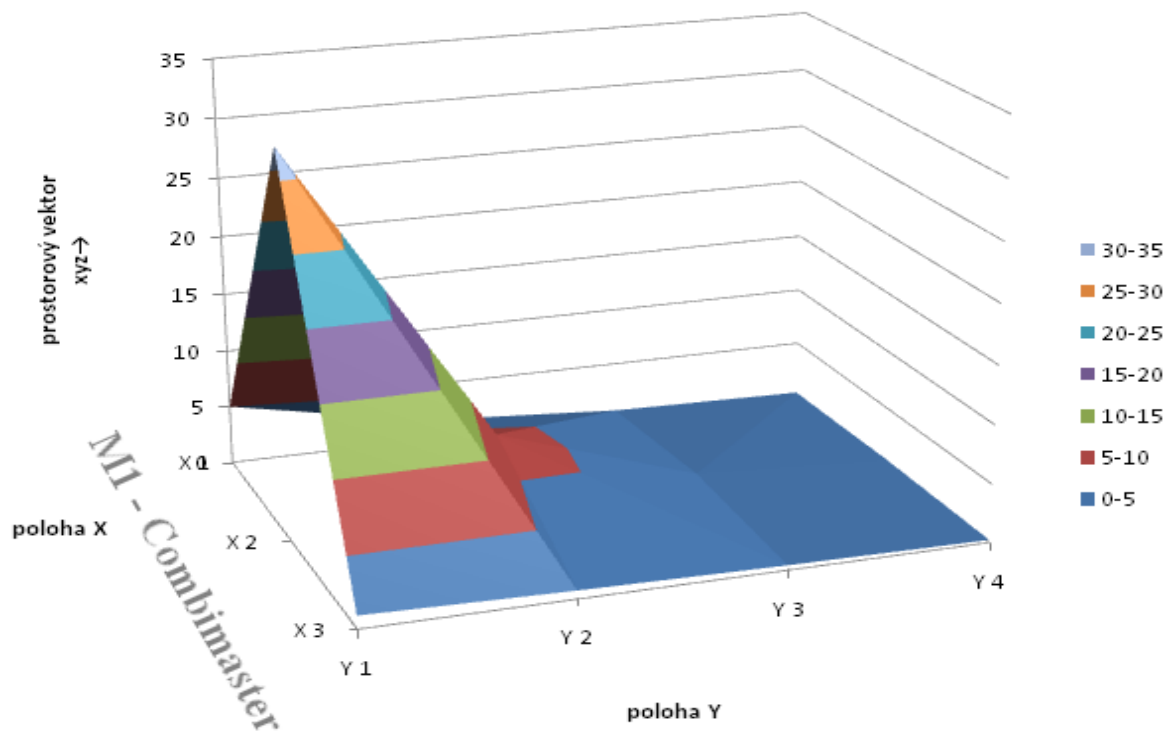
výška	Z 2								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]
Y 1	2,70	0,77	1,22	0,90	4,48	5,36	0,55	0,38	0,78
Y 2	1,14	0,58	0,70	0,63	2,06	2,22	0,45	0,33	0,45
Y 3	0,45	0,36	0,31	0,23	0,90	0,77	0,30	0,27	0,25
Y 4	0,23	0,22	0,15	0,13	0,45	0,32	0,18	0,17	0,14

Tab. 45. Hodnoty plošných vektorů u motoru **MI**.

výška	Z 2								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	yz ; \vec{x}	xz ; \vec{y}	xy ; \vec{z}	yz ; \vec{x}	xz ; \vec{y}	xy ; \vec{z}	yz ; \vec{x}	xz ; \vec{y}	xy ; \vec{z}
Y 1	1,44	2,97	2,81	6,98	5,43	4,57	0,87	0,95	0,66
Y 2	0,90	1,33	1,27	3,03	2,31	2,15	0,56	0,64	0,55
Y 3	0,48	0,55	0,58	1,19	0,81	0,93	0,36	0,39	0,40
Y 4	0,27	0,28	0,32	0,55	0,34	0,47	0,22	0,23	0,25

Tab. 46. Hodnoty prostorových vektorů u motoru **MI**.

výška	Z 2		
body X	X 1	X 2	X 3
body Y / osa sondy	\overrightarrow{xyz}	\overrightarrow{xyz}	\overrightarrow{xyz}
Y 1	5,03	32,34	1,11
Y 2	1,76	6,92	0,71
Y 3	0,62	1,37	0,42
Y 4	0,29	0,43	0,23



Graf 21. Vizualizace prostorového vektoru u motoru **MI** ve výškovém bodě **Z 2** při druhé konfiguraci otáček.

*Zpracování naměřených hodnot pro vizualizaci ve vertikální rovině Z3*Tab. 47. Hodnoty napětí na jednotlivých osách sondy AD22151 u motoru **M1**.

výška	Z 3								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	$\underline{U_x}$ [mV]	$\underline{U_y}$ [mV]	$\underline{U_z}$ [mV]	$\underline{U_x}$ [mV]	$\underline{U_y}$ [mV]	$\underline{U_z}$ [mV]	$\underline{U_x}$ [mV]	$\underline{U_y}$ [mV]	$\underline{U_z}$ [mV]
Y 1	127	113	101	150	305	399	128	122	105
Y 2	120	106	94	106	190	215	106	102	91
Y 3	110	98	85	94	131	123	99	97	79
Y 4	97	92	73	86	103	88	78	82	69

Tab. 48. Hodnoty magnetické indukce u motoru **M1**.

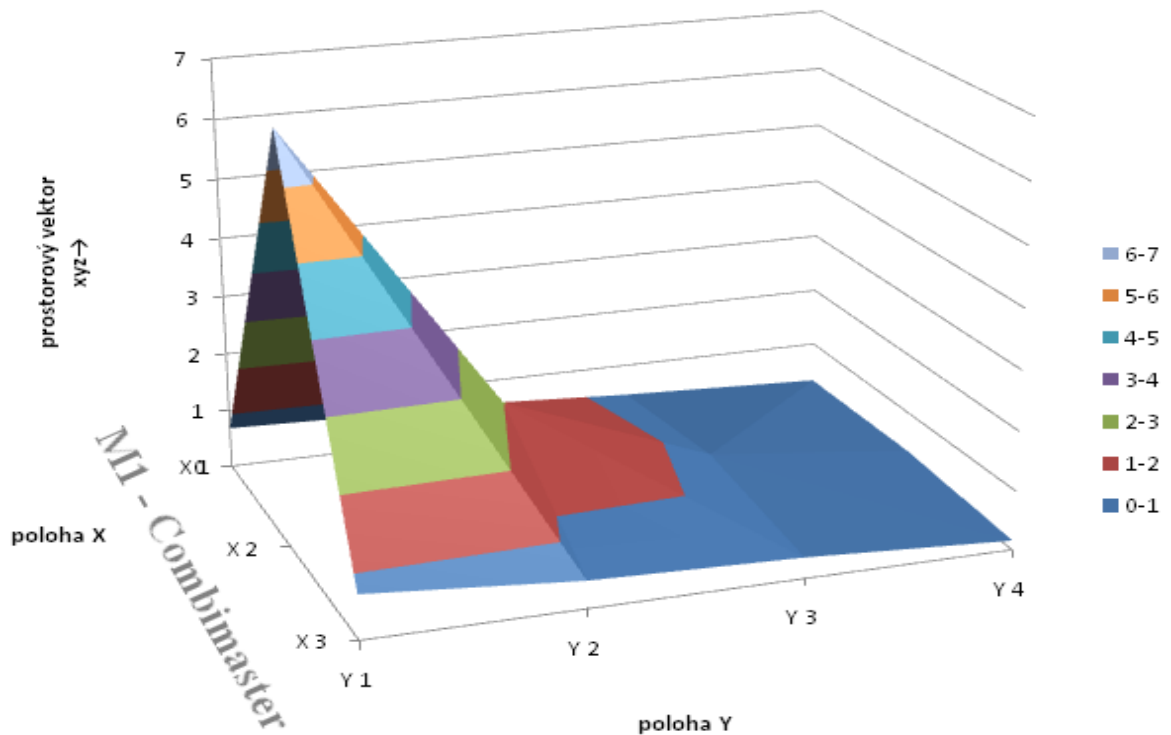
výška	Z 3								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	$\underline{B_x}$ [G]	$\underline{B_y}$ [G]	$\underline{B_z}$ [G]	$\underline{B_x}$ [G]	$\underline{B_y}$ [G]	$\underline{B_z}$ [G]	$\underline{B_x}$ [G]	$\underline{B_y}$ [G]	$\underline{B_z}$ [G]
Y 1	0,51	0,40	0,31	0,68	1,86	2,57	0,52	0,47	0,34
Y 2	0,45	0,35	0,26	0,35	0,98	1,17	0,35	0,32	0,23
Y 3	0,38	0,29	0,19	0,26	0,54	0,48	0,30	0,28	0,14
Y 4	0,28	0,24	0,10	0,20	0,33	0,21	0,14	0,17	0,07

Tab. 49. Hodnoty plošných vektorů u motoru **M1**.

výška	Z 3								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	$\underline{yz}; \vec{x}$	$\underline{xz}; \vec{y}$	$\underline{xy}; \vec{z}$	$\underline{yz}; \vec{x}$	$\underline{xz}; \vec{y}$	$\underline{xy}; \vec{z}$	$\underline{yz}; \vec{x}$	$\underline{xz}; \vec{y}$	$\underline{xy}; \vec{z}$
Y 1	0,51	0,60	0,65	3,17	2,66	1,98	0,58	0,62	0,70
Y 2	0,43	0,52	0,57	1,53	1,22	1,04	0,40	0,42	0,47
Y 3	0,34	0,42	0,48	0,72	0,54	0,60	0,32	0,33	0,41
Y 4	0,26	0,30	0,37	0,39	0,29	0,38	0,18	0,15	0,22

Tab. 50. Hodnoty prostorových vektorů u motoru **M1**.

výška	Z 3		
body X	X 1	X 2	X 3
body Y / osa sondy	\overline{xyz}	\overline{xyz}	\overline{xyz}
Y 1	0,68	6,81	0,74
Y 2	0,58	2,02	0,46
Y 3	0,45	0,69	0,35
Y 4	0,31	0,33	0,16



Graf 22. Vizualizace prostorového vektoru u motoru **MI** ve výškovém bodě **Z 3** při druhé konfiguraci otáček.

Zpracování naměřených hodnot pro vizualizaci ve vertikální rovině **Z4**

Tab. 51. Hodnoty napětí na jednotlivých osách sondy AD22151 u motoru **MI**.

výška	<u>Z 4</u>								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]
Y 1	100	92	78	106	118	147	84	91	80
Y 2	99	90	74	87	100	105	79	82	74
Y 3	76	71	69	80	90	82	77	77	69
Y 4	74	71	64	79	86	73	75	77	69

Tab. 52. Hodnoty magnetické indukce u motoru **MI**.

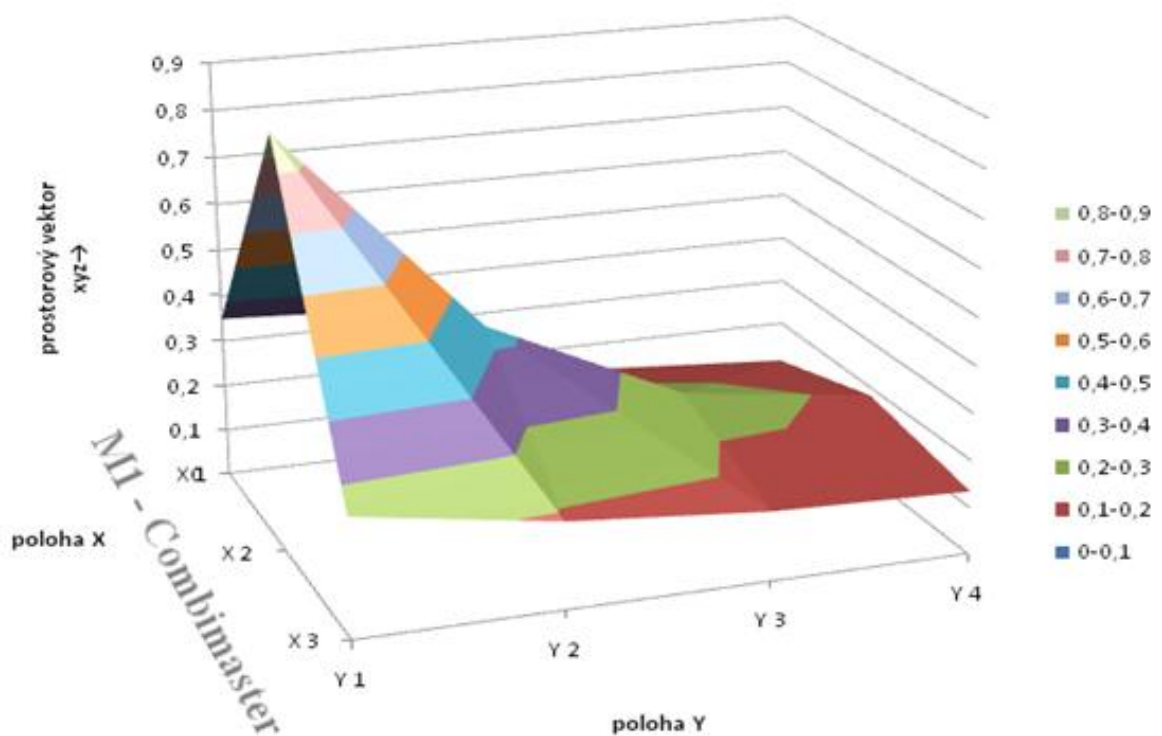
výška	<u>Z 4</u>								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]
Y 1	0,30	0,24	0,14	0,35	0,44	0,66	0,18	0,23	0,15
Y 2	0,30	0,23	0,11	0,20	0,30	0,34	0,14	0,17	0,11
Y 3	0,12	0,08	0,07	0,15	0,23	0,17	0,13	0,13	0,07
Y 4	0,11	0,08	0,03	0,14	0,20	0,10	0,11	0,13	0,07

Tab. 53. Hodnoty plošných vektorů u motoru MI.

výška	Z 4								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	yz ; \vec{x}	xz ; \vec{y}	xy ; \vec{z}	yz ; \vec{x}	xz ; \vec{y}	xy ; \vec{z}	yz ; \vec{x}	xz ; \vec{y}	xy ; \vec{z}
Y 1	0,28	0,33	0,39	0,79	0,75	0,56	0,28	0,24	0,30
Y 2	0,25	0,31	0,37	0,46	0,40	0,37	0,20	0,18	0,22
Y 3	0,11	0,14	0,15	0,28	0,23	0,27	0,15	0,15	0,18
Y 4	0,09	0,11	0,13	0,22	0,17	0,24	0,15	0,13	0,17

Tab. 54. Hodnoty prostorových vektorů u motoru MI.

výška	Z 4		
body X	X 1	X 2	X 3
body Y / osa sondy			
Y 1	0,35	0,87	0,25
Y 2	0,33	0,43	0,18
Y 3	0,14	0,24	0,15
Y 4	0,11	0,18	0,13



Graf 23. Vizualizace prostorového vektoru u motoru MI ve výškovém bodě Z 4 při druhé konfiguraci otáčecí.

3. konfigurace otáček

M1 Combimaster - 90%

M2 Micromaster - 85%

Délka měření - 30 minut

Zpracování naměřených hodnot pro vizualizaci ve vertikální rovině Z1

Tab. 55. Hodnoty napětí na jednotlivých osách sondy AD22151 u motoru M1.

výška	Z 1								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]
Y 1	268	122	125	139	399	488	118	94	102
Y 2	133	98	100	99	202	239	101	86	92
Y 3	90	82	83	83	120	131	86	78	80
Y 4	87	79	74	81	94	92	78	75	72

Tab. 56. Hodnoty magnetické indukce u motoru M1.

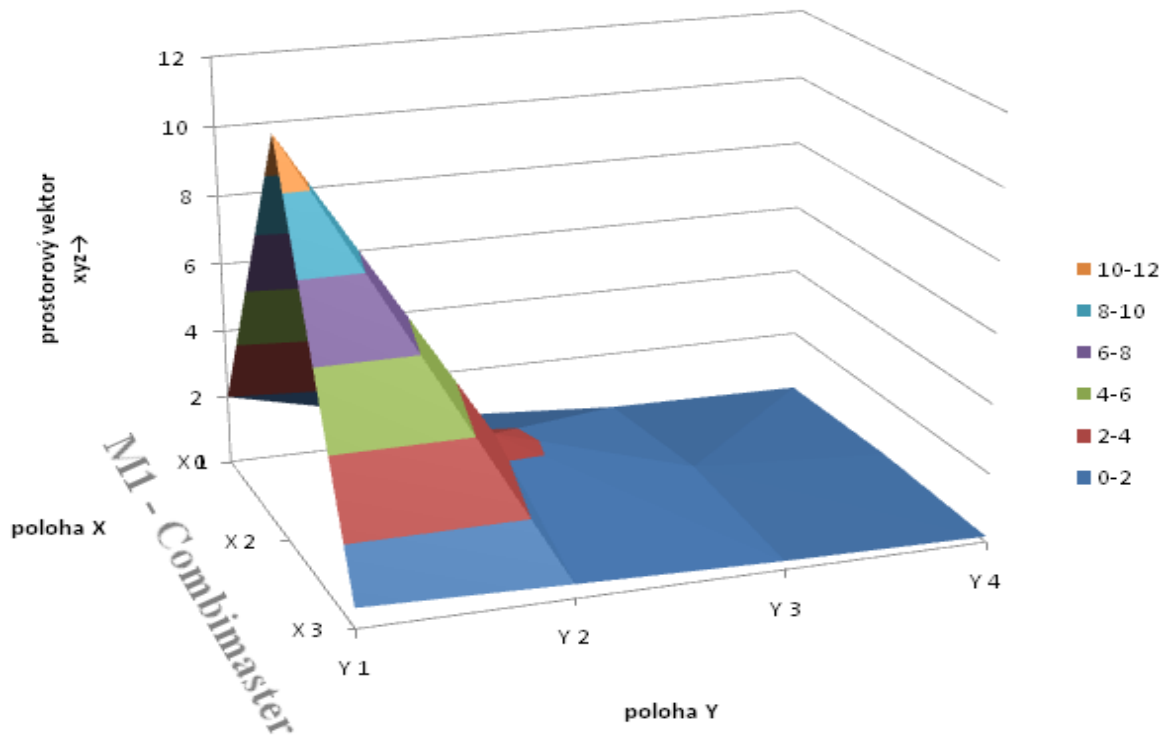
výška	Z 1								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]
Y 1	1,58	0,47	0,49	0,60	2,57	3,24	0,44	0,26	0,32
Y 2	0,55	0,29	0,30	0,30	1,08	1,36	0,31	0,20	0,24
Y 3	0,23	0,17	0,17	0,17	0,45	0,54	0,20	0,14	0,15
Y 4	0,20	0,14	0,11	0,16	0,26	0,24	0,14	0,11	0,09

Tab. 57. Hodnoty plošných vektorů u motoru M1.

výška	Z 1								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	$yz ; \vec{x}$	$xz ; \vec{y}$	$xy ; \vec{z}$	$yz ; \vec{x}$	$xz ; \vec{y}$	$xy ; \vec{z}$	$yz ; \vec{x}$	$xz ; \vec{y}$	$xy ; \vec{z}$
Y 1	0,68	1,65	1,64	4,14	3,30	2,64	0,41	0,54	0,51
Y 2	0,42	0,63	0,62	1,73	1,39	1,12	0,31	0,39	0,37
Y 3	0,24	0,29	0,28	0,70	0,57	0,49	0,20	0,25	0,24
Y 4	0,18	0,23	0,25	0,35	0,29	0,30	0,15	0,16	0,18

Tab. 58. Hodnoty prostorových vektorů u motoru M1.

výška	Z 1		
body X	X 1	X 2	X 3
body Y / osa sondy	\overline{xyz}	\overline{xyz}	\overline{xyz}
Y 1	1,99	11,39	0,58
Y 2	0,68	2,38	0,41
Y 3	0,29	0,66	0,25
Y 4	0,23	0,31	0,17



Graf 24. Vizualizace prostorového vektoru u motoru **M1** ve výškovém bodě **Z 1** při třetí konfiguraci otáček.

Zpracování naměřených hodnot pro vizualizaci ve vertikální rovině **Z2**

Tab. 59. Hodnoty napětí na jednotlivých osách sondy AD22151 u motoru **M1**.

výška	Z 2								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]
Y 1	321	133	179	152	466	601	113	99	134
Y 2	161	105	113	111	242	253	100	96	101
Y 3	99	88	84	84	140	122	85	81	84
Y 4	81	80	71	76	97	86	78	75	73

Tab. 60. Hodnoty magnetické indukce u motoru **M1**.

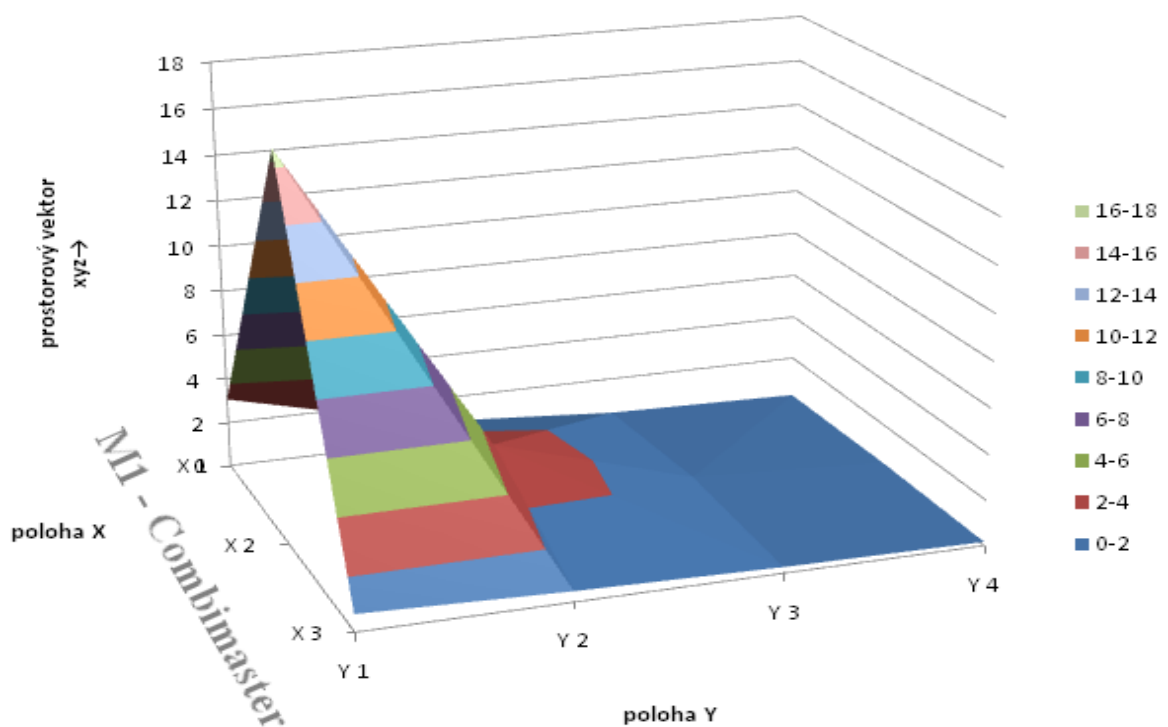
výška	Z 2								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]
Y 1	1,98	0,55	0,90	0,70	3,08	4,10	0,40	0,30	0,56
Y 2	0,77	0,34	0,40	0,39	1,38	1,46	0,30	0,27	0,31
Y 3	0,30	0,21	0,18	0,18	0,61	0,47	0,19	0,16	0,18
Y 4	0,16	0,15	0,08	0,12	0,28	0,20	0,14	0,11	0,10

Tab. 61. Hodnoty plošných vektorů u motoru **MI**.

výška	Z 2								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	yz ; \vec{x}	xz ; \vec{y}	xy ; \vec{z}	yz ; \vec{x}	xz ; \vec{y}	xy ; \vec{z}	yz ; \vec{x}	xz ; \vec{y}	xy ; \vec{z}
Y 1	1,06	2,17	2,05	5,12	4,16	3,15	0,63	0,69	0,50
Y 2	0,53	0,86	0,84	2,01	1,51	1,43	0,41	0,43	0,41
Y 3	0,28	0,35	0,36	0,77	0,50	0,63	0,24	0,26	0,25
Y 4	0,17	0,18	0,22	0,34	0,23	0,31	0,15	0,17	0,18

Tab. 62. Hodnoty prostorových vektorů u motoru **MI**.

výška	Z 2		
body X	X 1	X 2	X 3
body Y / osa sondy	\overrightarrow{xyz}	\overrightarrow{xyz}	\overrightarrow{xyz}
Y 1	3,07	16,69	0,76
Y 2	0,97	3,25	0,47
Y 3	0,36	0,70	0,27
Y 4	0,18	0,25	0,17



Graf 25. Vizualizace prostorového vektoru u motoru **MI** ve výškovém bodě **Z 2** při třetí konfiguraci otáček.

*Zpracování naměřených hodnot pro vizualizaci ve vertikální rovině Z3*Tab. 63. Hodnoty napětí na jednotlivých osách sondy AD22151 u motoru **M1**.

výška	Z 3								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]
Y 1	112	93	82	100	219	287	100	103	85
Y 2	103	88	77	81	143	155	92	88	77
Y 3	80	81	72	78	102	94	79	77	70
Y 4	73	72	65	73	90	75	74	72	66

Tab. 64. Hodnoty magnetické indukce u motoru **M1**.

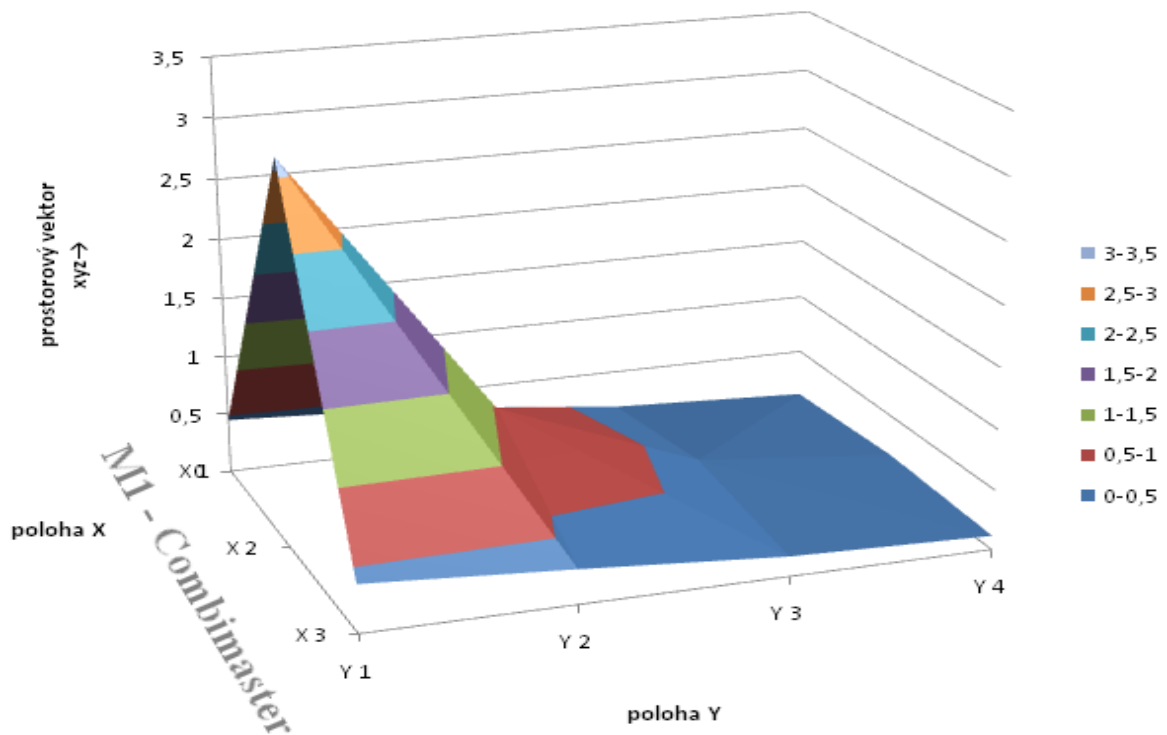
výška	Z 3								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]
Y 1	0,39	0,25	0,17	0,30	1,20	1,72	0,30	0,33	0,19
Y 2	0,33	0,21	0,13	0,16	0,63	0,72	0,24	0,21	0,13
Y 3	0,15	0,16	0,09	0,14	0,32	0,26	0,14	0,13	0,08
Y 4	0,10	0,09	0,04	0,10	0,23	0,11	0,11	0,09	0,05

Tab. 65. Hodnoty plošných vektorů u motoru **M1**.

výška	Z 3								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	$yz; \vec{x}$	$xz; \vec{y}$	$xy; \vec{z}$	$yz; \vec{x}$	$xz; \vec{y}$	$xy; \vec{z}$	$yz; \vec{x}$	$xz; \vec{y}$	$xy; \vec{z}$
Y 1	0,30	0,43	0,47	2,10	1,75	1,24	0,38	0,36	0,44
Y 2	0,25	0,35	0,39	0,96	0,74	0,65	0,25	0,27	0,32
Y 3	0,18	0,18	0,22	0,41	0,29	0,35	0,15	0,16	0,19
Y 4	0,10	0,11	0,13	0,25	0,15	0,25	0,10	0,12	0,14

Tab. 66. Hodnoty prostorových vektorů u motoru **M1**.

výška	Z 3		
body X	X 1	X 2	X 3
body Y / osa sondy	\vec{xyz}	\vec{xyz}	\vec{xyz}
Y 1	0,45	3,14	0,39
Y 2	0,36	0,96	0,29
Y 3	0,18	0,32	0,17
Y 4	0,11	0,16	0,12



Graf 26. Vizualizace prostorového vektoru u motoru **MI** ve výškovém bodě **Z 3** při třetí konfiguraci otáček.

Zpracování naměřených hodnot pro vizualizaci ve vertikální rovině Z4

Tab. 67. Hodnoty napětí na jednotlivých osách sondy AD22151 u motoru **MI**.

výška	Z 4								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]
Y 1	77	74	69	76	89	111	72	77	72
Y 2	73	70	66	71	80	87	69	73	69
Y 3	70	68	63	68	73	71	70	73	66
Y 4	69	67	62	67	71	65	65	72	64

Tab. 68. Hodnoty magnetické indukce u motoru **MI**.

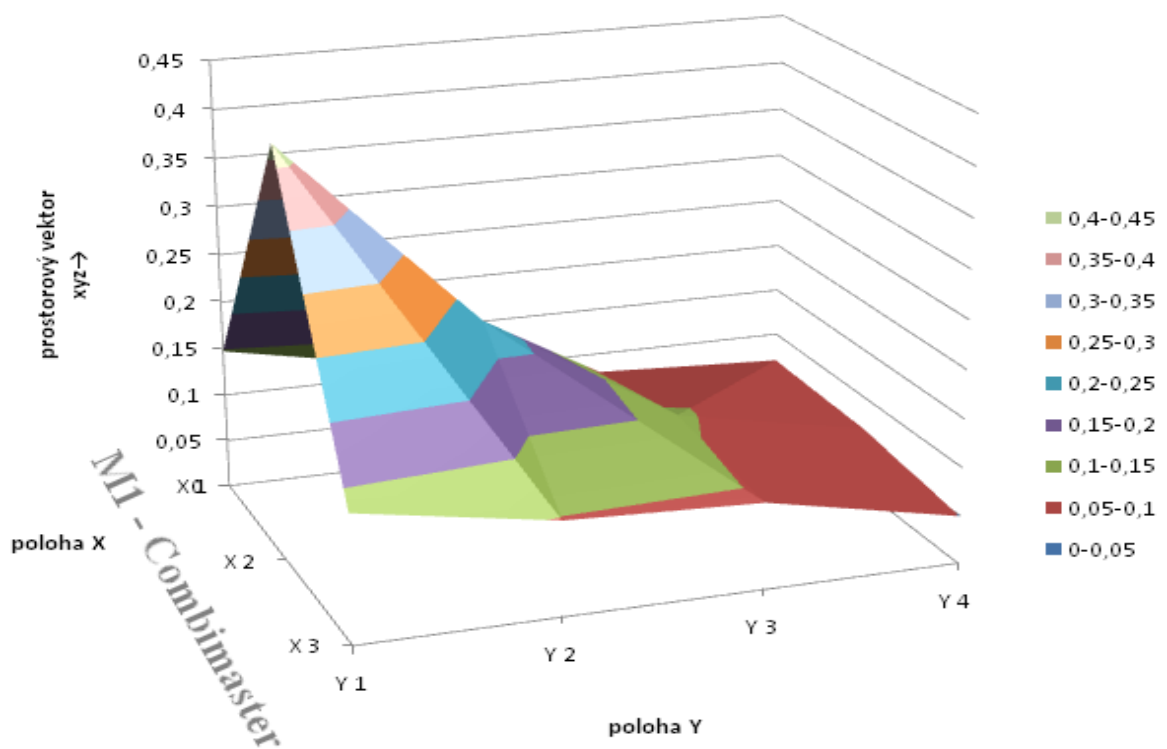
výška	Z 4								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]
Y 1	0,13	0,11	0,07	0,12	0,22	0,39	0,09	0,13	0,09
Y 2	0,10	0,08	0,05	0,08	0,15	0,20	0,07	0,10	0,07
Y 3	0,08	0,06	0,02	0,06	0,10	0,08	0,08	0,10	0,05
Y 4	0,07	0,05	0,02	0,05	0,08	0,04	0,04	0,09	0,03

Tab. 69. Hodnoty plošných vektorů u motoru **MI**.

výška	<u>Z 4</u>								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	$yz; \vec{x}$	$xz; \vec{y}$	$xy; \vec{z}$	$yz; \vec{x}$	$xz; \vec{y}$	$xy; \vec{z}$	$yz; \vec{x}$	$xz; \vec{y}$	$xy; \vec{z}$
Y 1	0,13	0,15	0,17	0,44	0,40	0,25	0,16	0,13	0,16
Y 2	0,09	0,11	0,12	0,25	0,22	0,17	0,12	0,10	0,12
Y 3	0,06	0,08	0,10	0,13	0,10	0,12	0,11	0,09	0,12
Y 4	0,06	0,07	0,09	0,09	0,07	0,10	0,10	0,05	0,10

Tab. 70. Hodnoty prostorových vektorů u motoru **MI**.

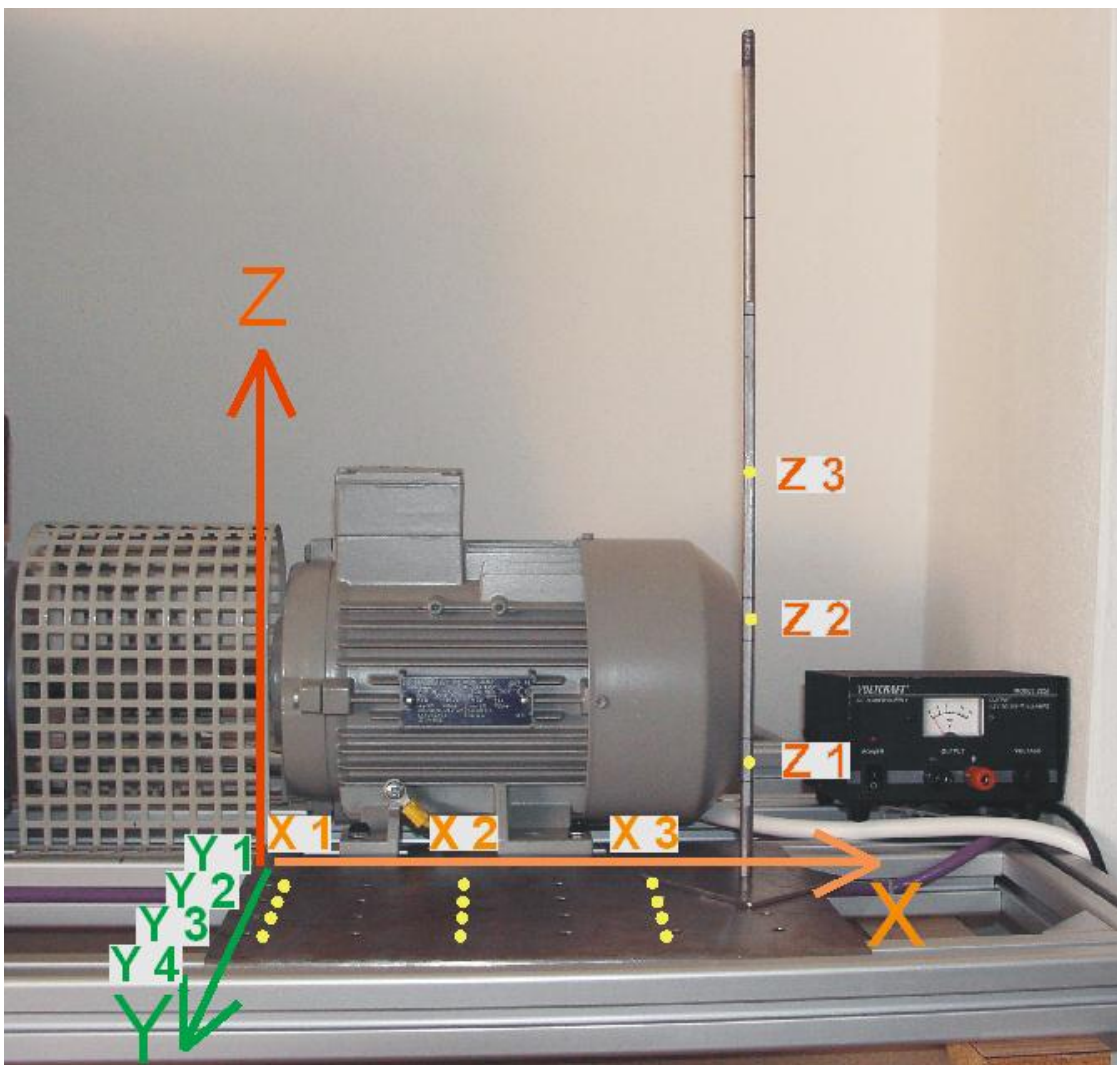
výška	<u>Z 4</u>		
body X	X 1	X 2	X 3
body Y / osa sondy	\vec{xyz}	\vec{xyz}	\vec{xyz}
Y 1	0,15	0,42	0,13
Y 2	0,11	0,23	0,10
Y 3	0,08	0,10	0,09
Y 4	0,07	0,07	0,05



Graf 27. Vizualizace prostorového vektoru u motoru **MI** ve výškovém bodě **Z 4** při třetí konfiguraci otáčecí.

10.2 Měření a prostorová vizualizace magnetického pole asynchronního motoru M2 Micromaster

Druhá sada měření se týká měření magnetického pole asynchronního motoru M2 Micromaster. V této sadě měření bylo vypuštěno měření ve vertikální rovině Z4, ve které hodnoty magnetické indukce byly svou velikostí ve srovnání s naměřenými hodnotami magnetické indukce v ostatních bodech zanedbatelné. U grafických prostorových modelů předpokládáme, že na levé straně je umístěn motor M2 Micromaster.



Obr. 67. Zvolené měřící body u motoru M2 Micromaster.

1. konfigurace otáček

M1 Combimaster - 25%

M2 Micromaster - 15%

Délka měření - 30 minut

Zpracování naměřených hodnot pro vizualizaci ve vertikální rovině Z1

Tab. 71. Hodnoty napětí na jednotlivých osách sondy AD22151 u motoru M2.

výška	Z 1								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]
Y 1	200	99	82	136	216	229	99	98	74
Y 2	103	83	78	89	120	123	78	77	69
Y 3	88	82	70	77	88	81	73	72	67
Y 4	75	77	67	73	78	73	71	70	66

Tab. 72. Hodnoty magnetické indukce u motoru M2.

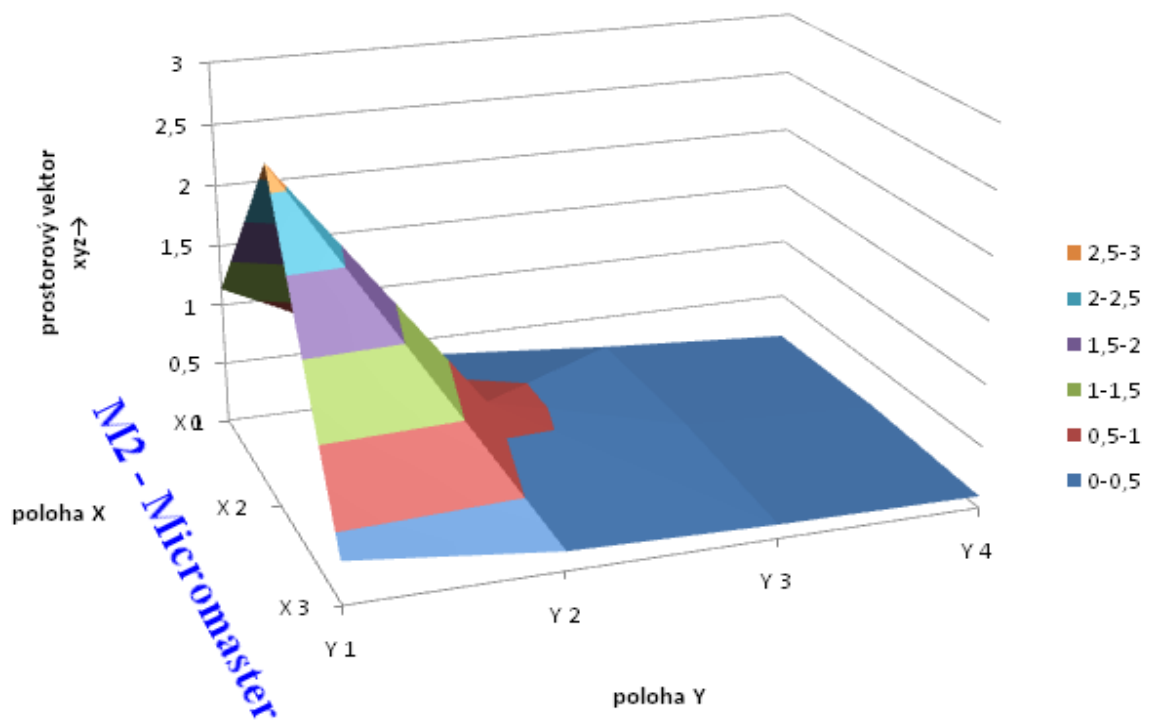
výška	Z 1								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]
Y 1	1,06	0,30	0,17	0,58	1,18	1,28	0,30	0,29	0,11
Y 2	0,33	0,17	0,14	0,22	0,45	0,48	0,14	0,13	0,07
Y 3	0,21	0,17	0,08	0,13	0,21	0,16	0,10	0,09	0,05
Y 4	0,11	0,13	0,05	0,10	0,14	0,10	0,08	0,08	0,05

Tab. 73. Hodnoty plošných vektorů u motoru M2.

výška	Z 1								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	$yz ; \vec{x}$	$xz ; \vec{y}$	$xy ; \vec{z}$	$yz ; \vec{x}$	$xz ; \vec{y}$	$xy ; \vec{z}$	$yz ; \vec{x}$	$xz ; \vec{y}$	$xy ; \vec{z}$
Y 1	0,34	1,07	1,10	1,74	1,40	1,31	0,31	0,31	0,41
Y 2	0,22	0,35	0,37	0,66	0,53	0,50	0,15	0,15	0,19
Y 3	0,18	0,23	0,27	0,27	0,20	0,25	0,11	0,11	0,13
Y 4	0,14	0,13	0,17	0,17	0,14	0,17	0,09	0,09	0,11

Tab. 74. Hodnoty prostorových vektorů u motoru M2.

výška	Z 1		
body X	X 1	X 2	X 3
body Y / osa sondy	\overline{xyz}	\overline{xyz}	\overline{xyz}
Y 1	1,14	2,69	0,34
Y 2	0,36	0,62	0,15
Y 3	0,23	0,22	0,11
Y 4	0,13	0,14	0,10



Graf 28. Vizualizace prostorového vektoru u motoru **M2** ve výškovém bodě **Z 1** při první konfiguraci otáček.

Zpracování naměřených hodnot pro vizualizaci ve vertikální rovině Z2

Tab. 75 Hodnoty napětí na jednotlivých osách sondy AD22151 u motoru **M2**.

výška	Z 2								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]
Y 1	207	87	121	144	240	285	83	79	112
Y 2	107	81	87	88	130	134	76	74	78
Y 3	80	74	73	75	93	84	74	73	68
Y 4	74	75	70	72	78	72	69	68	63

Tab. 76. Hodnoty magnetické indukce u motoru **M2**.

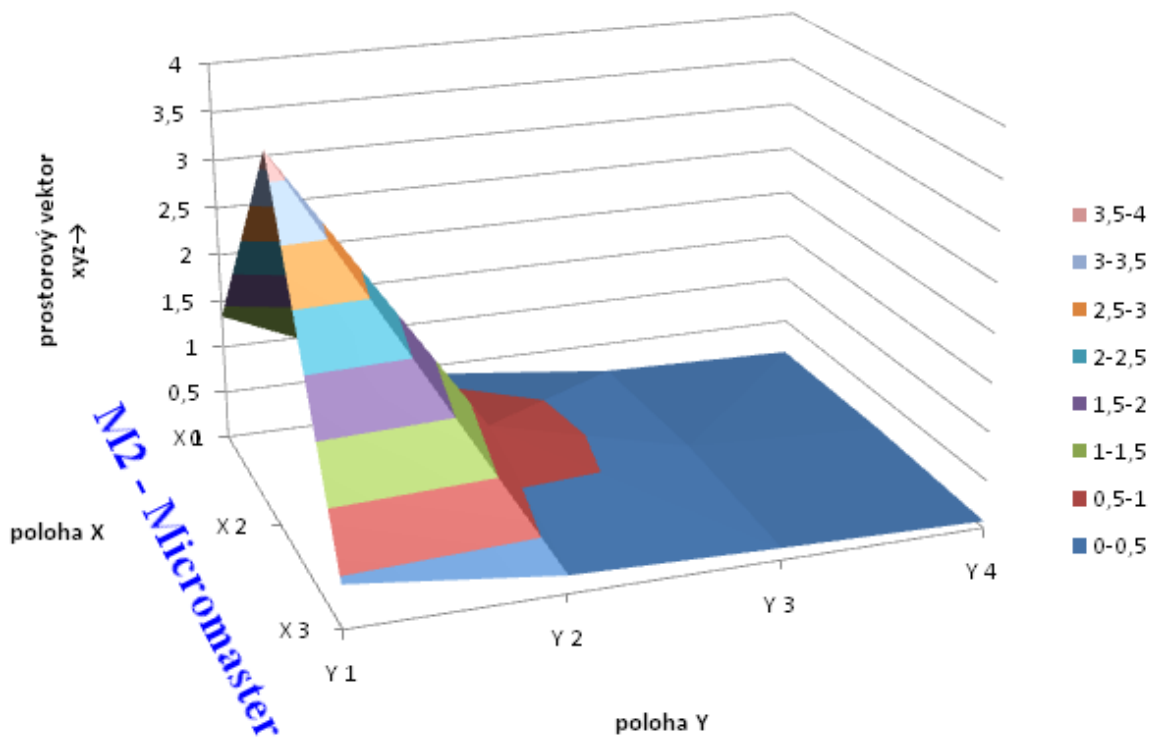
výška	Z 2								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]
Y 1	1,11	0,20	0,46	0,64	1,36	1,70	0,17	0,14	0,39
Y 2	0,36	0,16	0,20	0,21	0,53	0,56	0,12	0,11	0,14
Y 3	0,15	0,11	0,10	0,11	0,25	0,18	0,11	0,10	0,06
Y 4	0,11	0,11	0,08	0,09	0,14	0,09	0,07	0,06	0,02

Tab. 77. Hodnoty plošných vektorů u motoru M2.

výška	Z 2								
bodů X	X 1			X 2			X 3		
bodů Y / osa sondy	yz ; \vec{x}	xz ; \vec{y}	xy ; \vec{z}	yz ; \vec{x}	xz ; \vec{y}	xy ; \vec{z}	yz ; \vec{x}	xz ; \vec{y}	xy ; \vec{z}
Y 1	0,51	1,21	1,13	2,18	1,82	1,50	0,42	0,43	0,23
Y 2	0,26	0,41	0,39	0,77	0,60	0,57	0,17	0,18	0,16
Y 3	0,14	0,18	0,18	0,31	0,21	0,27	0,12	0,12	0,14
Y 4	0,14	0,13	0,16	0,16	0,13	0,16	0,06	0,07	0,09

Tab. 78. Hodnoty prostorových vektorů u motoru M2.

výška	Z 2		
bodů X	X 1	X 2	X 3
bodů Y / osa sondy	\overrightarrow{xyz}	\overrightarrow{xyz}	\overrightarrow{xyz}
Y 1	1,33	3,76	0,44
Y 2	0,42	0,74	0,18
Y 3	0,18	0,23	0,12
Y 4	0,13	0,13	0,07



Graf 29 Vizualizace prostorového vektoru u motoru M2 ve výškovém bodě Z 2 při první konfiguraci otáček.

Zpracování naměřených hodnot pro vizualizaci ve vertikální rovině Z3

Tab. 79. Hodnoty napětí na jednotlivých osách sondy AD22151 u motoru M2.

výška	Z 3								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]
Y 1	92	86	78	78	114	151	72	78	70
Y 2	78	79	71	72	88	94	70	71	69
Y 3	71	73	67	71	77	73	68	70	64
Y 4	67	73	65	69	73	67	67	71	60

Tab. 80. Hodnoty magnetické indukce u motoru M2.

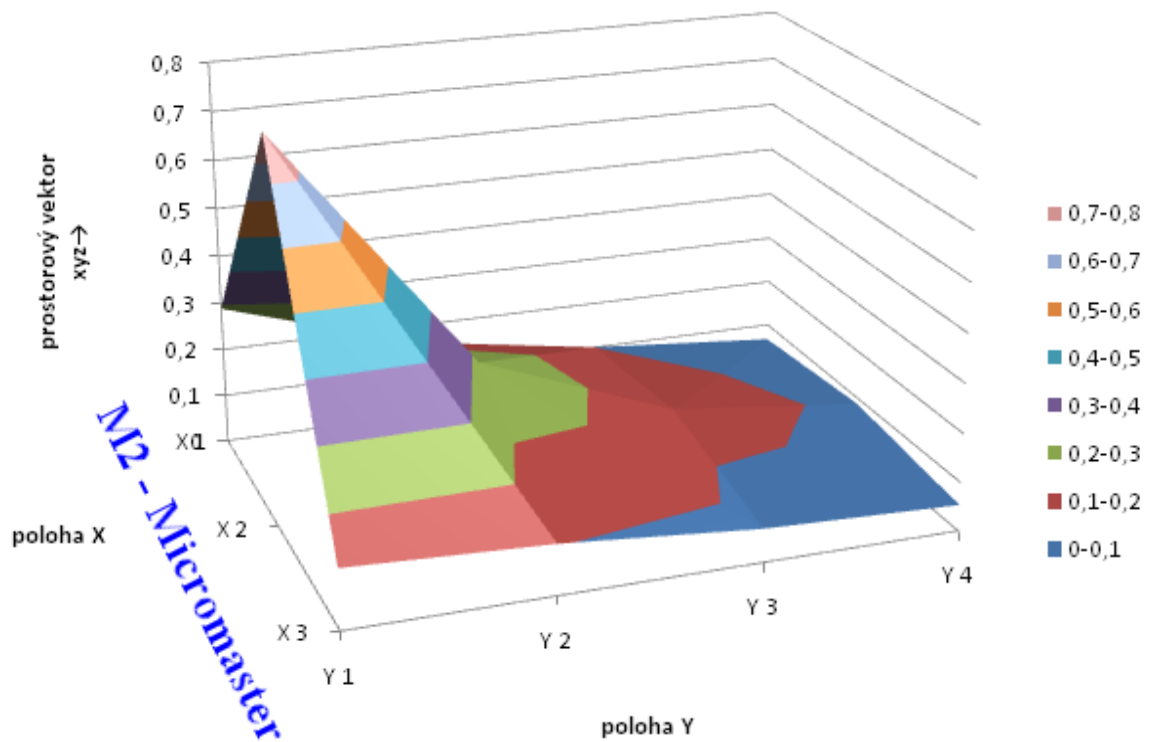
výška	Z 3								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]
Y 1	0,24	0,20	0,14	0,14	0,41	0,69	0,09	0,14	0,08
Y 2	0,14	0,14	0,08	0,09	0,21	0,26	0,08	0,08	0,07
Y 3	0,08	0,10	0,05	0,08	0,13	0,10	0,06	0,08	0,03
Y 4	0,05	0,10	0,04	0,07	0,10	0,05	0,05	0,08	0,00

Tab. 81. Hodnoty plošných vektorů u motoru M2.

výška	Z 3								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	$yz ; \vec{x}$	$xz ; \vec{y}$	$xy ; \vec{z}$	$yz ; \vec{x}$	$xz ; \vec{y}$	$xy ; \vec{z}$	$yz ; \vec{x}$	$xz ; \vec{y}$	$xy ; \vec{z}$
Y 1	0,24	0,28	0,31	0,80	0,70	0,43	0,16	0,12	0,16
Y 2	0,17	0,16	0,20	0,33	0,27	0,23	0,11	0,10	0,11
Y 3	0,11	0,10	0,13	0,16	0,13	0,15	0,08	0,07	0,10
Y 4	0,11	0,07	0,11	0,11	0,09	0,12	0,08	0,05	0,10

Tab. 82. Hodnoty prostorových vektorů u motoru M2.

výška	Z 3		
body X	X 1	X 2	X 3
body Y / osa sondy	\vec{xyz}	\vec{xyz}	\vec{xyz}
Y 1	0,29	0,78	0,12
Y 2	0,16	0,28	0,10
Y 3	0,10	0,13	0,07
Y 4	0,07	0,09	0,05



Graf 30. Vizualizace prostorového vektoru u motoru **M2** ve výškovém bodě **Z 3** při první konfiguraci otáček.

2. konfigurace otáček

M1 Combimaster - 60%

M2 Micromaster - 50%

Délka měření - 30 minut

Zpracování naměřených hodnot pro vizualizaci ve vertikální rovině Z1

Tab. 83. Hodnoty napětí na jednotlivých osách sondy AD22151 u motoru **M2**.

výška	Z 1								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]
Y 1	310	122	148	187	622	718	152	127	149
Y 2	175	109	140	112	299	356	113	104	136
Y 3	111	89	109	81	159	190	92	94	113
Y 4	85	80	90	72	105	122	78	80	91

Tab. 84. Hodnoty magnetické indukce u motoru M2.

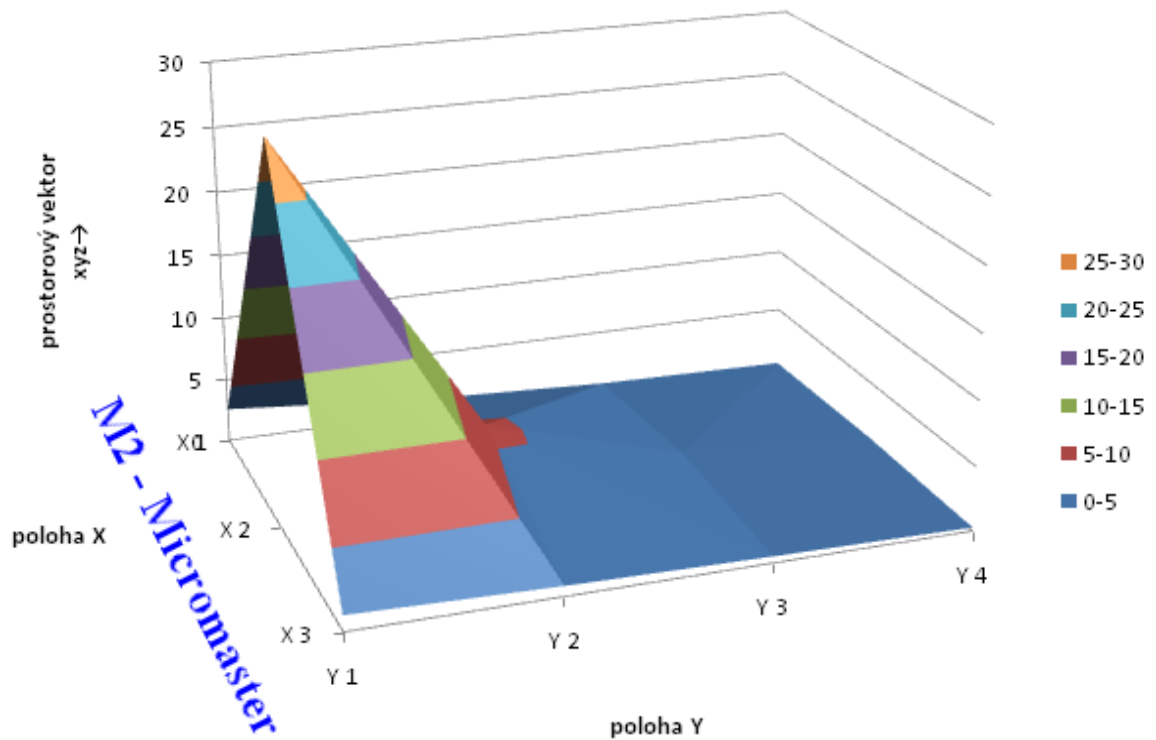
výška	Z 1								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	B _x [G]	B _y [G]	B _z [G]	B _x [G]	B _y [G]	B _z [G]	B _x [G]	B _y [G]	B _z [G]
Y 1	1,89	0,47	0,67	0,96	4,26	4,98	0,70	0,51	0,67
Y 2	0,87	0,37	0,61	0,39	1,81	2,24	0,40	0,33	0,58
Y 3	0,39	0,22	0,37	0,16	0,75	0,98	0,24	0,26	0,40
Y 4	0,19	0,15	0,23	0,09	0,34	0,47	0,14	0,15	0,23

Tab. 85. Hodnoty plošných vektorů u motoru M2.

výška	Z 1								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	yz ; \vec{x}	xz ; \vec{y}	xy ; \vec{z}	yz ; \vec{x}	xz ; \vec{y}	xy ; \vec{z}	yz ; \vec{x}	xz ; \vec{y}	xy ; \vec{z}
Y 1	0,82	2,01	1,95	6,56	5,08	4,36	0,84	0,97	0,86
Y 2	0,71	1,06	0,95	2,88	2,28	1,85	0,67	0,70	0,52
Y 3	0,43	0,54	0,44	1,24	1,00	0,77	0,48	0,47	0,35
Y 4	0,27	0,30	0,24	0,58	0,48	0,35	0,28	0,27	0,20

Tab. 86. Hodnoty prostorových vektorů u motoru M2.

výška	Z 1		
body X	X 1	X 2	X 3
body Y / osa sondy	\overrightarrow{xyz}	\overrightarrow{xyz}	\overrightarrow{xyz}
Y 1	2,56	29,06	1,21
Y 2	1,26	5,81	0,78
Y 3	0,57	1,38	0,50
Y 4	0,30	0,52	0,28



Graf 31. Vizualizace prostorového vektoru u motoru **M2** ve výškovém bodě **Z 1** při druhé konfiguraci otáček.

Zpracování naměřených hodnot pro vizualizaci ve vertikální rovině Z2

Tab. 87. Hodnoty napětí na jednotlivých osách sondy AD22151 u motoru **M2**.

výška	Z 2								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]
Y 1	346	131	189	163	751	756	159	148	222
Y 2	199	124	142	121	370	353	121	119	143
Y 3	116	100	108	82	190	171	96	100	104
Y 4	86	85	82	78	119	112	81	82	83

Tab. 88. Hodnoty magnetické indukce u motoru **M2**.

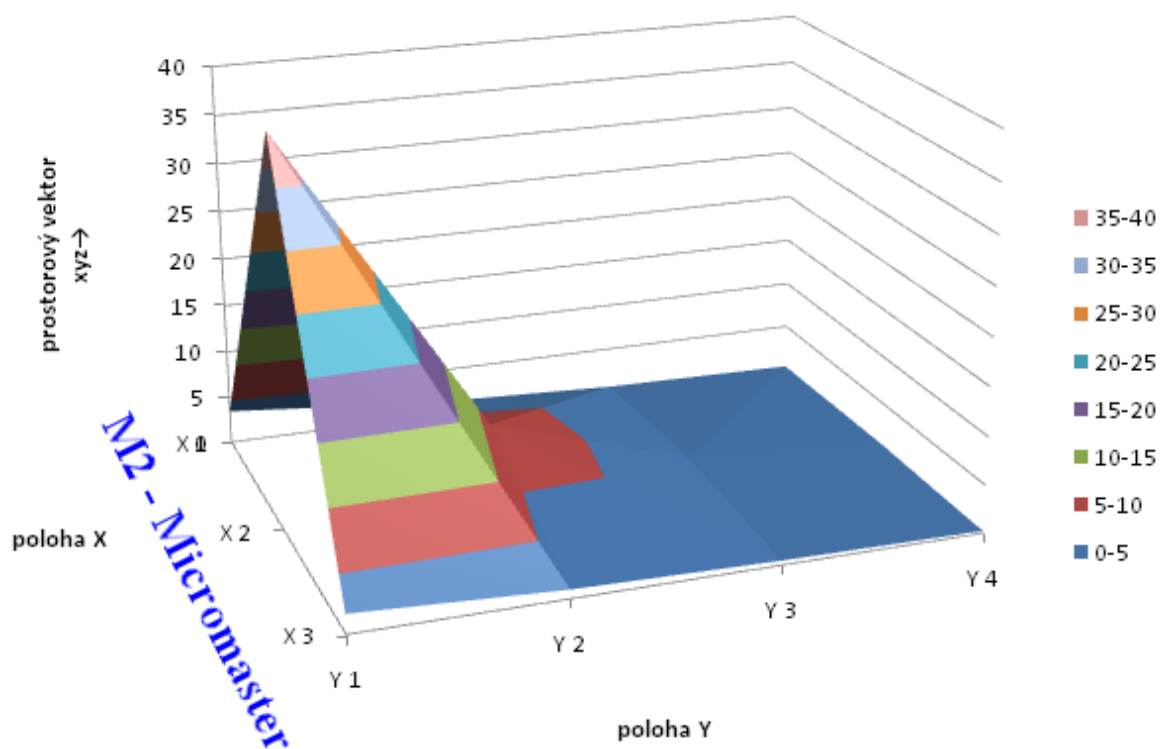
výška	Z 2								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]
Y 1	2,17	0,54	0,98	0,78	5,23	5,27	0,75	0,67	1,23
Y 2	1,05	0,48	0,62	0,46	2,35	2,22	0,46	0,45	0,63
Y 3	0,42	0,30	0,36	0,17	0,98	0,84	0,27	0,30	0,33
Y 4	0,20	0,19	0,17	0,14	0,45	0,39	0,16	0,17	0,17

Tab. 89. Hodnoty plošných vektorů u motoru M2.

výška	Z 2								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	yz ; \vec{x}	xz ; \vec{y}	xy ; \vec{z}	yz ; \vec{x}	xz ; \vec{y}	xy ; \vec{z}	yz ; \vec{x}	xz ; \vec{y}	xy ; \vec{z}
Y 1	1,12	2,38	2,23	7,43	5,33	5,29	1,40	1,44	1,00
Y 2	0,79	1,22	1,16	3,23	2,27	2,39	0,77	0,78	0,64
Y 3	0,47	0,56	0,52	1,30	0,86	1,00	0,45	0,43	0,41
Y 4	0,25	0,26	0,27	0,60	0,42	0,47	0,24	0,24	0,23

Tab. 90. Hodnoty prostorových vektorů u motoru M2.

výška	Z 2		
body X	X 1	X 2	X 3
body Y / osa sondy	\overline{xyz}	\overline{xyz}	\overline{xyz}
Y 1	3,44	39,68	2,01
Y 2	1,53	8,06	0,92
Y 3	0,61	1,55	0,47
Y 4	0,27	0,50	0,24



Graf 32. Vizualizace prostorového vektoru u motoru M2 ve výškovém bodě Z 2 při druhé konfiguraci otáčecí.

*Zpracování naměřených hodnot pro vizualizaci ve vertikální rovině Z3**Tab. 91. Hodnoty napětí na jednotlivých osách sondy AD22151 u motoru M2.*

výška	Z 3								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]
Y 1	168	123	120	90	292	433	118	134	130
Y 2	117	104	100	80	183	223	96	103	97
Y 3	89	88	79	74	126	123	82	89	78
Y 4	80	77	70	72	98	88	75	80	72

Tab. 92. Hodnoty magnetické indukce u motoru M2.

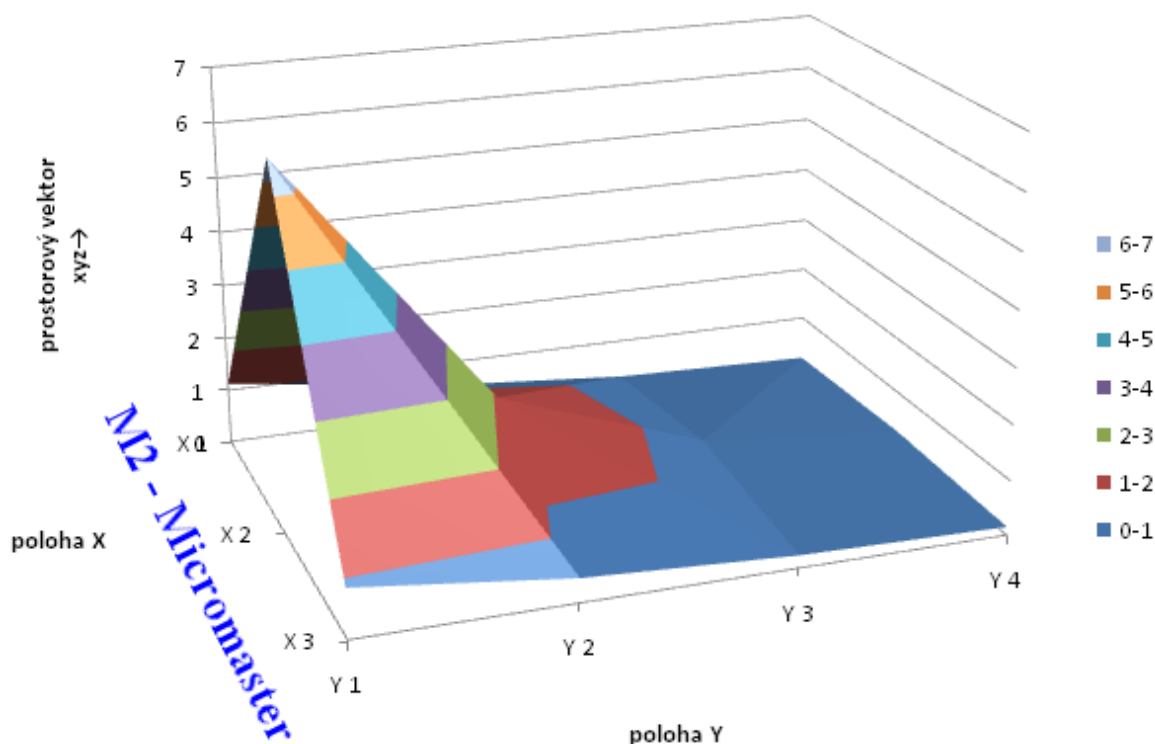
výška	Z 3								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]
Y 1	0,82	0,48	0,45	0,23	1,76	2,83	0,44	0,56	0,53
Y 2	0,43	0,33	0,30	0,15	0,93	1,23	0,27	0,33	0,28
Y 3	0,22	0,21	0,14	0,11	0,50	0,48	0,17	0,22	0,14
Y 4	0,15	0,13	0,08	0,09	0,29	0,21	0,11	0,15	0,09

Tab. 93. Hodnoty plošných vektorů u motoru M2.

výška	Z 3								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	$yz ; \vec{x}$	$xz ; \vec{y}$	$xy ; \vec{z}$	$yz ; \vec{x}$	$xz ; \vec{y}$	$xy ; \vec{z}$	$yz ; \vec{x}$	$xz ; \vec{y}$	$xy ; \vec{z}$
Y 1	0,66	0,94	0,95	3,33	2,83	1,77	0,77	0,69	0,71
Y 2	0,45	0,53	0,55	1,55	1,24	0,94	0,43	0,39	0,42
Y 3	0,26	0,26	0,31	0,69	0,49	0,51	0,26	0,22	0,28
Y 4	0,15	0,17	0,20	0,36	0,23	0,30	0,18	0,15	0,19

Tab. 94. Hodnoty prostorových vektorů u motoru M2.

výška	Z 3		
body X	X 1	X 2	X 3
body Y / osa sondy	\overrightarrow{xyz}	\overrightarrow{xyz}	\overrightarrow{xyz}
Y 1	1,13	6,54	0,88
Y 2	0,58	1,92	0,43
Y 3	0,27	0,60	0,23
Y 4	0,17	0,25	0,15



Graf 33. Vizualizace prostorového vektoru u motoru **M2** ve výškovém bodě **Z 3** při druhé konfiguraci otáček.

3. konfigurace otáček

M1 Combimaster - 90%

M2 Micromaster - 85%

Délka měření - 30 minut

Zpracování naměřených hodnot pro vizualizaci ve vertikální rovině Z1

Tab. 95. Hodnoty napětí na jednotlivých osách sondy AD22151 u motoru **M2**.

výška	Z1								
	X 1			X 2			X 3		
body X	U_x	U_y	U_z	U_x	U_y	U_z	U_x	U_y	U_z
body Y / osa sondy	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]
Y1	279	108	133	165	501	638	138	112	131
Y2	156	91	122	103	248	326	105	99	120
Y3	100	81	101	72	135	181	85	82	110
Y4	80	76	84	71	92	119	78	76	85

Tab. 96. Hodnoty magnetické indukce u motoru M2.

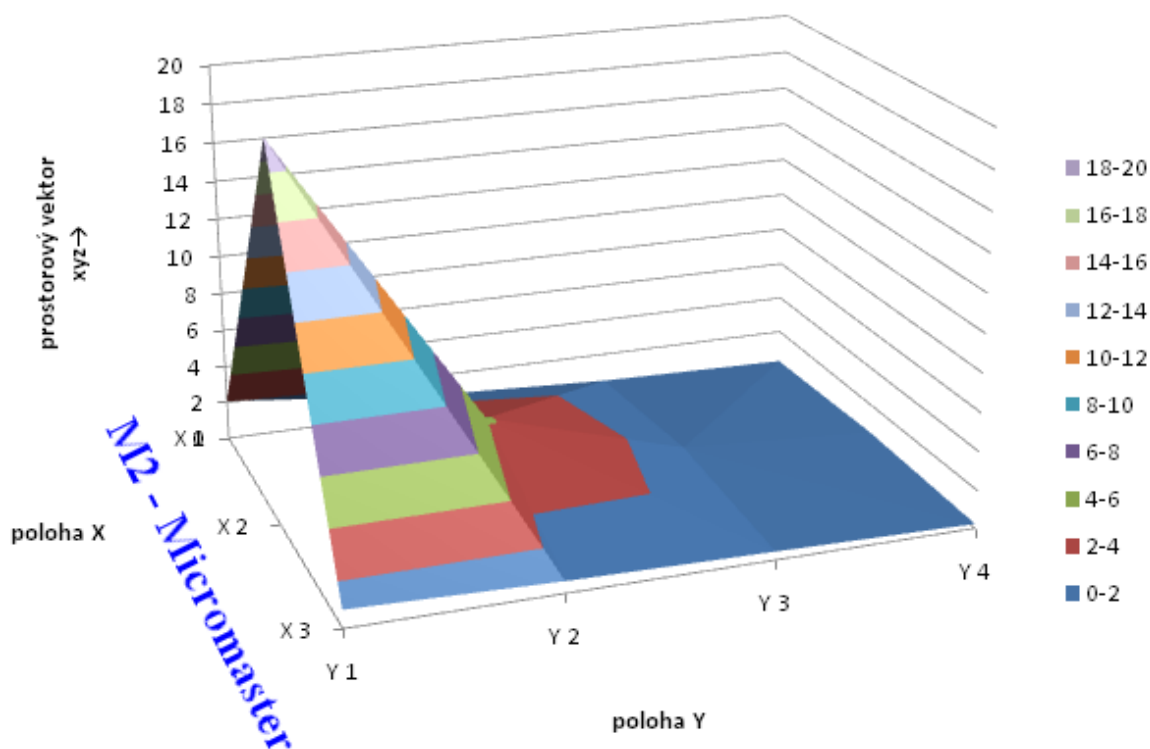
výška	Z 1								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]
Y 1	1,66	0,36	0,55	0,80	3,34	4,38	0,59	0,39	0,54
Y 2	0,73	0,23	0,47	0,33	1,42	2,02	0,34	0,30	0,45
Y 3	0,30	0,16	0,31	0,09	0,57	0,92	0,19	0,17	0,38
Y 4	0,15	0,12	0,18	0,08	0,24	0,45	0,14	0,12	0,19

Tab. 97. Hodnoty plošných vektorů u motoru M2.

výška	Z 1								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	$yz ; \vec{x}$	$xz ; \vec{y}$	$xy ; \vec{z}$	$yz ; \vec{x}$	$xz ; \vec{y}$	$xy ; \vec{z}$	$yz ; \vec{x}$	$xz ; \vec{y}$	$xy ; \vec{z}$
Y 1	0,66	1,75	1,70	5,51	4,45	3,43	0,67	0,80	0,71
Y 2	0,53	0,87	0,76	2,47	2,04	1,46	0,54	0,57	0,45
Y 3	0,35	0,43	0,34	1,08	0,92	0,58	0,41	0,42	0,25
Y 4	0,22	0,24	0,19	0,51	0,45	0,26	0,22	0,23	0,18

Tab. 98. Hodnoty prostorových vektorů u motoru M2.

výška	Z 1		
body X	X 1	X 2	X 3
body Y / osa sondy	\vec{xyz}	\vec{xyz}	\vec{xyz}
Y 1	2,08	19,43	0,93
Y 2	0,95	4,14	0,62
Y 3	0,45	1,11	0,44
Y 4	0,24	0,47	0,24



Graf 34. Vizualizace prostorového vektoru u motoru M2 ve výškovém bodě Z 1 při třetí konfiguraci otáček.

Zpracování naměřených hodnot pro vizualizaci ve vertikální rovině Z2

Tab. 99. Hodnoty napětí na jednotlivých osách sondy AD22151 u motoru M2.

výška	Z 2								
bodý X	X 1			X 2			X 3		
bodý Y / osa sondy	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]
Y 1	343	130	184	215	733	735	158	148	222
Y 2	193	116	136	118	363	335	118	121	143
Y 3	111	97	103	80	188	164	91	102	105
Y 4	82	81	82	70	120	107	79	83	83

Tab. 100. Hodnoty magnetické indukce u motoru M2.

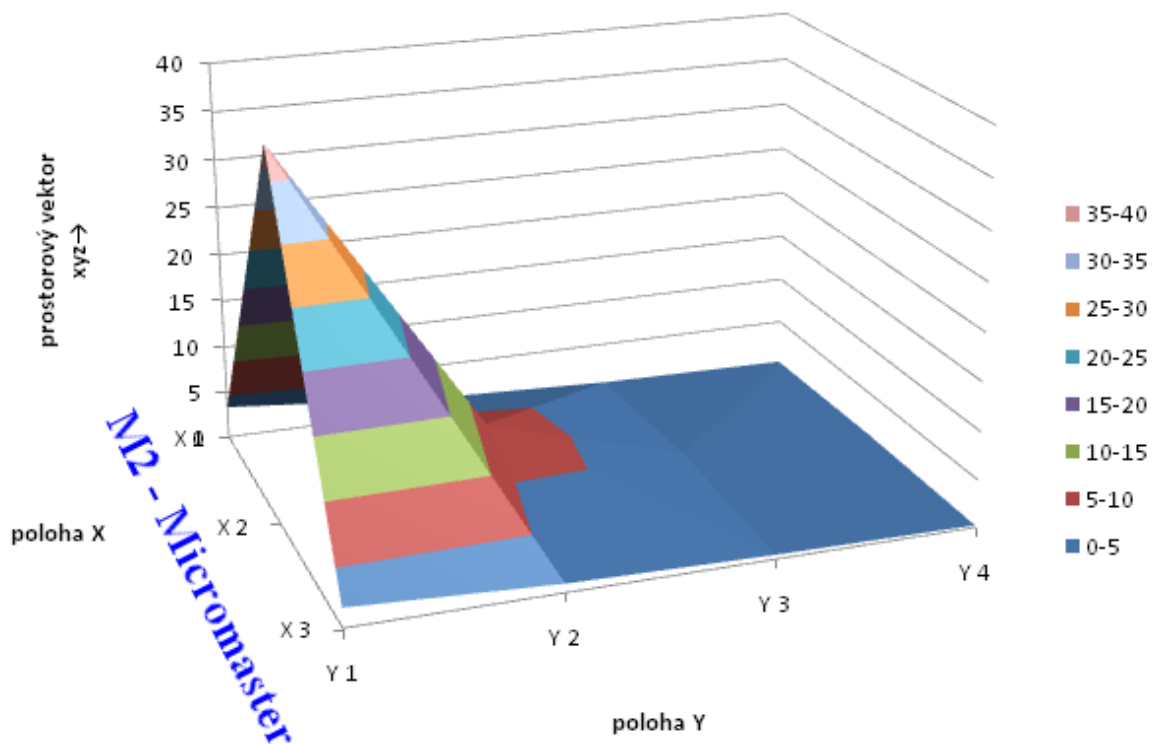
výška	Z 2								
bodý X	X 1			X 2			X 3		
bodý Y / osa sondy	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]
Y 1	2,14	0,53	0,94	1,17	5,10	5,11	0,74	0,67	1,23
Y 2	1,01	0,42	0,58	0,44	2,30	2,08	0,44	0,46	0,63
Y 3	0,39	0,28	0,33	0,15	0,97	0,79	0,23	0,32	0,34
Y 4	0,17	0,16	0,17	0,08	0,45	0,36	0,14	0,17	0,17

Tab. 101. Hodnoty plošných vektorů u motoru M2.

výška	Z 2								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	yz ; \vec{x}	xz ; \vec{y}	xy ; \vec{z}	yz ; \vec{x}	xz ; \vec{y}	xy ; \vec{z}	yz ; \vec{x}	xz ; \vec{y}	xy ; \vec{z}
Y 1	1,08	2,34	2,21	7,22	5,25	5,23	1,40	1,43	1,00
Y 2	0,72	1,16	1,09	3,10	2,13	2,34	0,78	0,77	0,64
Y 3	0,43	0,51	0,48	1,25	0,80	0,98	0,47	0,41	0,40
Y 4	0,23	0,24	0,23	0,58	0,36	0,46	0,25	0,23	0,23

Tab. 102. Hodnoty prostorových vektorů u motoru M2.

výška	Z 2		
body X	X 1	X 2	X 3
body Y / osa sondy	\overrightarrow{xyz}	\overrightarrow{xyz}	\overrightarrow{xyz}
Y 1	3,34	38,14	2,00
Y 2	1,40	7,55	0,91
Y 3	0,55	1,47	0,45
Y 4	0,24	0,45	0,23



Graf 35. Vizualizace prostorového vektoru u motoru M2 ve výškovém bodě Z 2 při třetí konfiguraci otáček.

Zpracování naměřených hodnot pro vizualizaci ve vertikální rovině Z3

Tab. 103. Hodnoty napětí na jednotlivých osách sondy AD22151 u motoru M2.

výška	Z 3								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]	U_x [mV]	U_y [mV]	U_z [mV]
Y 1	163	116	118	92	284	426	117	130	133
Y 2	108	98	93	76	182	222	92	101	99
Y 3	82	83	78	70	122	120	78	86	79
Y 4	75	76	73	67	98	84	72	78	72

Tab. 104. Hodnoty magnetické indukce u motoru M2.

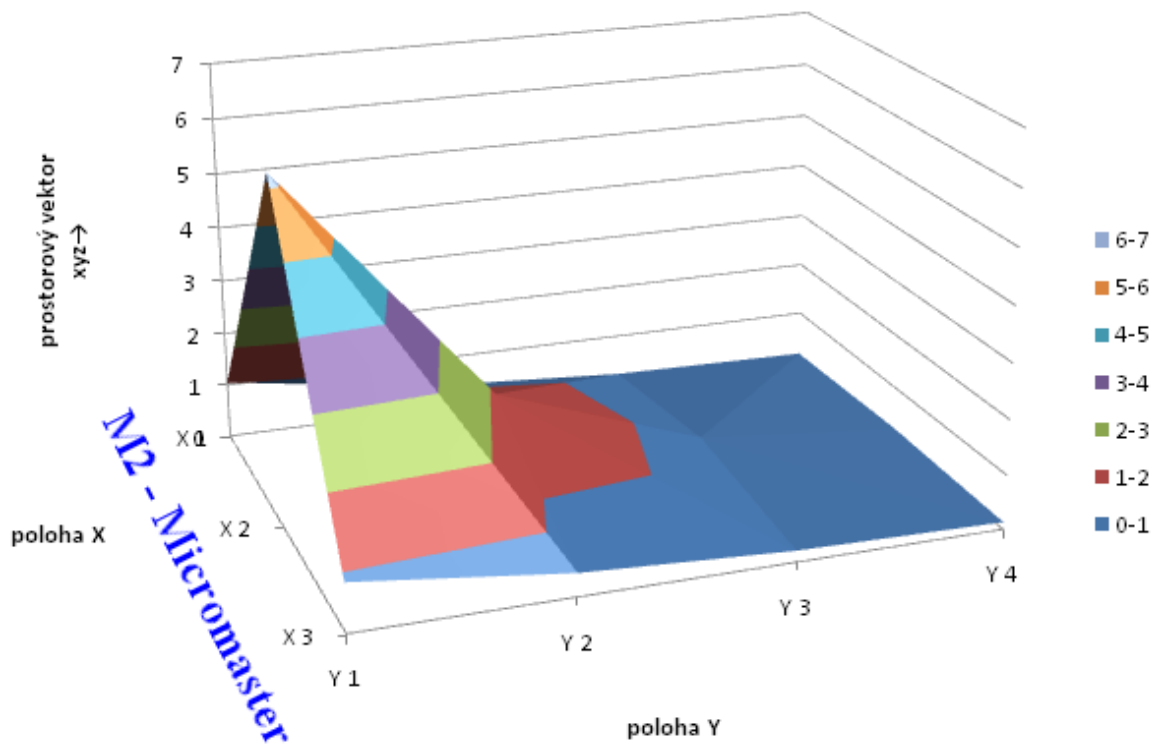
výška	Z 3								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]	B_x [G]	B_y [G]	B_z [G]
Y 1	0,78	0,42	0,44	0,24	1,70	2,77	0,43	0,53	0,55
Y 2	0,36	0,29	0,25	0,12	0,92	1,23	0,24	0,31	0,30
Y 3	0,17	0,17	0,14	0,08	0,47	0,45	0,14	0,20	0,14
Y 4	0,11	0,12	0,10	0,05	0,29	0,18	0,09	0,14	0,09

Tab. 105. Hodnoty plošných vektorů u motoru M2.

výška	Z 3								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / osa sondy	$yz ; \vec{x}$	$xz ; \vec{y}$	$xy ; \vec{z}$	$yz ; \vec{x}$	$xz ; \vec{y}$	$xy ; \vec{z}$	$yz ; \vec{x}$	$xz ; \vec{y}$	$xy ; \vec{z}$
Y 1	0,61	0,90	0,89	3,25	2,78	1,71	0,77	0,70	0,68
Y 2	0,38	0,44	0,46	1,54	1,23	0,93	0,43	0,38	0,39
Y 3	0,22	0,22	0,24	0,65	0,46	0,48	0,24	0,20	0,24
Y 4	0,16	0,15	0,17	0,34	0,19	0,29	0,16	0,13	0,16

Tab. 106. Hodnoty prostorových vektorů u motoru M2.

výška	Z 3		
body X	X 1	X 2	X 3
body Y / osa sondy	\overrightarrow{xyz}	\overrightarrow{xyz}	\overrightarrow{xyz}
Y 1	1,05	6,23	0,88
Y 2	0,48	1,89	0,42
Y 3	0,22	0,56	0,21
Y 4	0,15	0,21	0,13

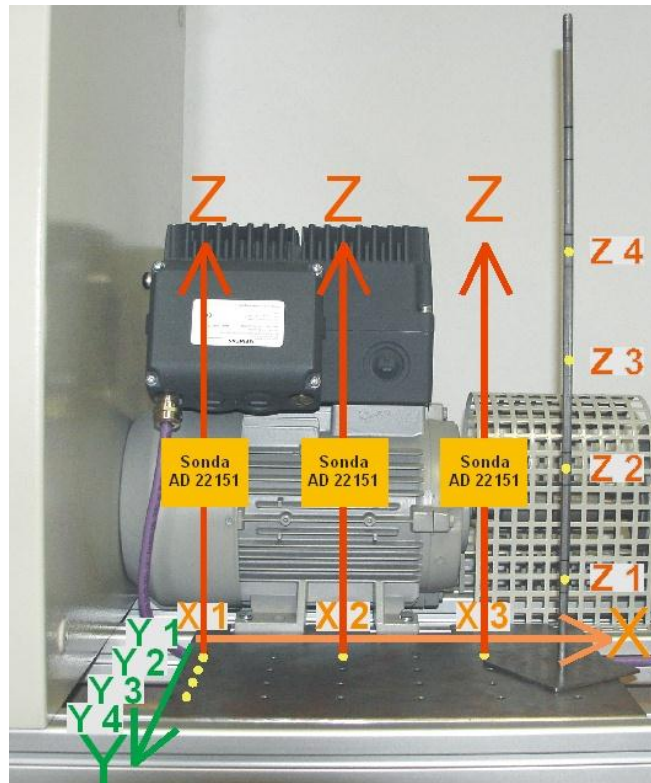


Graf 36. Vizualizace prostorového vektoru u motoru **M2** ve výškovém bodě **Z 3** při třetí konfiguraci otáček.

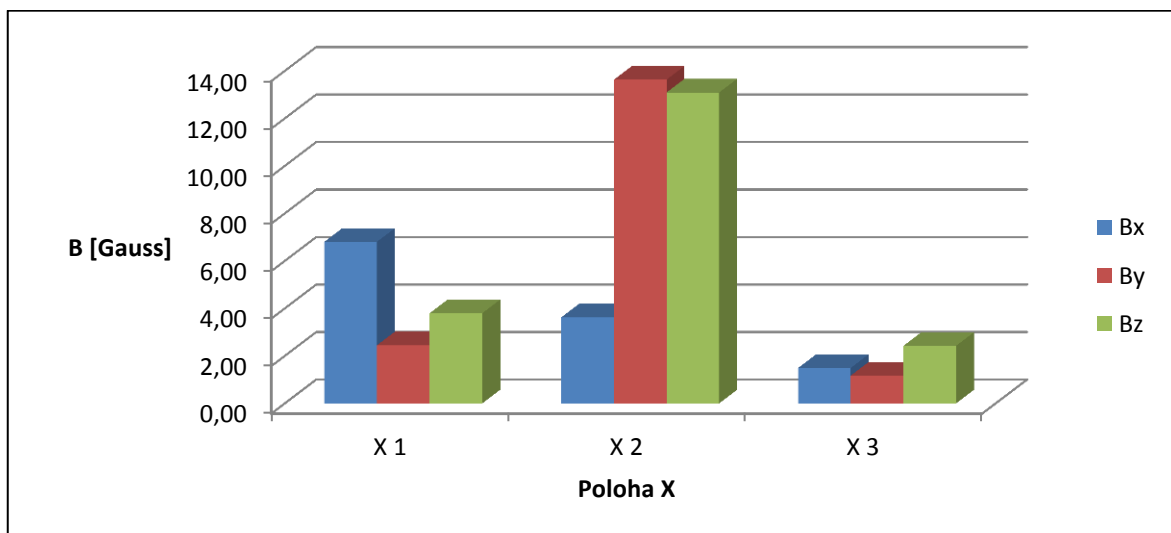
Velikosti magnetické indukce u obou motorů M1, M2 byly následně graficky zpracovány a porovnány v závislosti na konfiguraci otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster na základně výše uvedených tabulkových hodnot. Ze široké škály bodů měření byly použity pro grafické zpracování a porovnání pouze ty body, ve kterých byly naměřeny významné hodnoty magnetické indukce B . Pro lepší představu, ze kterých bodů měření jsou grafy zpracovány, byly doloženy fotografie s vyznačenou polohou měřící sondy AD22151 vůči měřenému zařízení.

10.2.1 Porovnání naměřených hodnot magnetické indukce v bodě X1 až X3

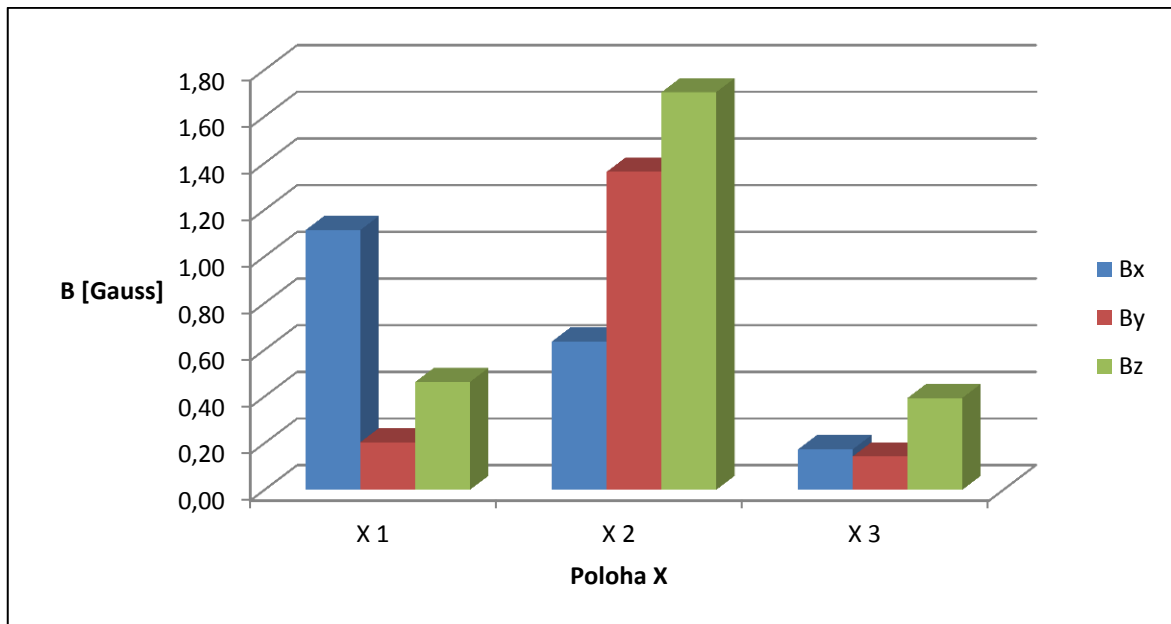
Pro porovnání naměřených hodnot magnetické indukce získané 3osou sondou AD22151 v konstantní poloze Y1, Z2 a v proměnné poloze X1 - X3 při třech variantách konfigurace otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster byly využity data z tabulek Tab. 28, Tab. 44, Tab. 60 a pro motor **M2** byly data čerpány z tabulek Tab. 76, Tab. 88, Tab. 100.



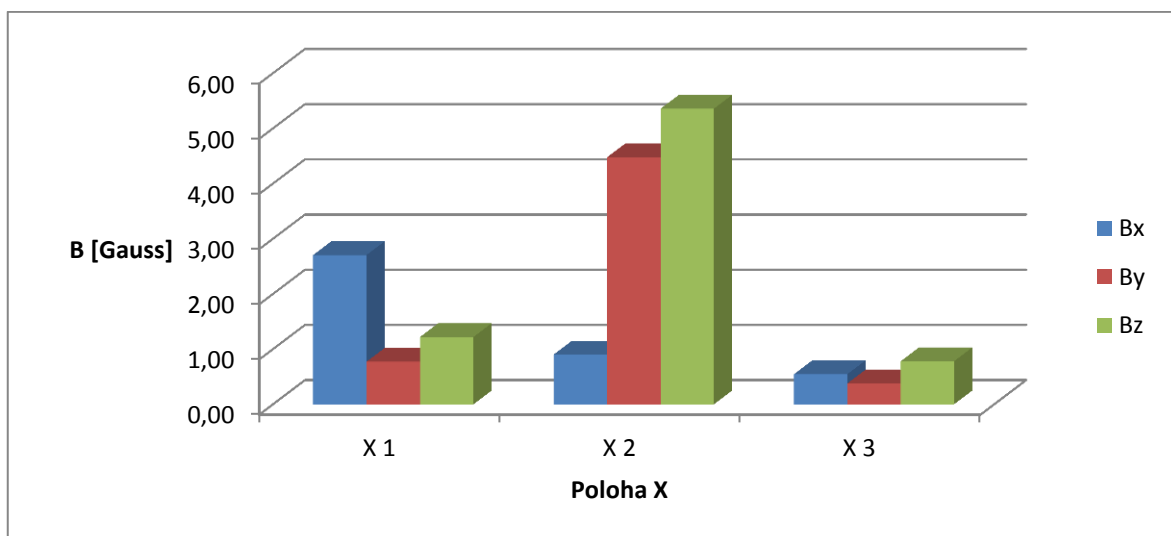
Obr. 68. Grafické zobrazení měření v poloze X1 – X3, Y1, Z2.



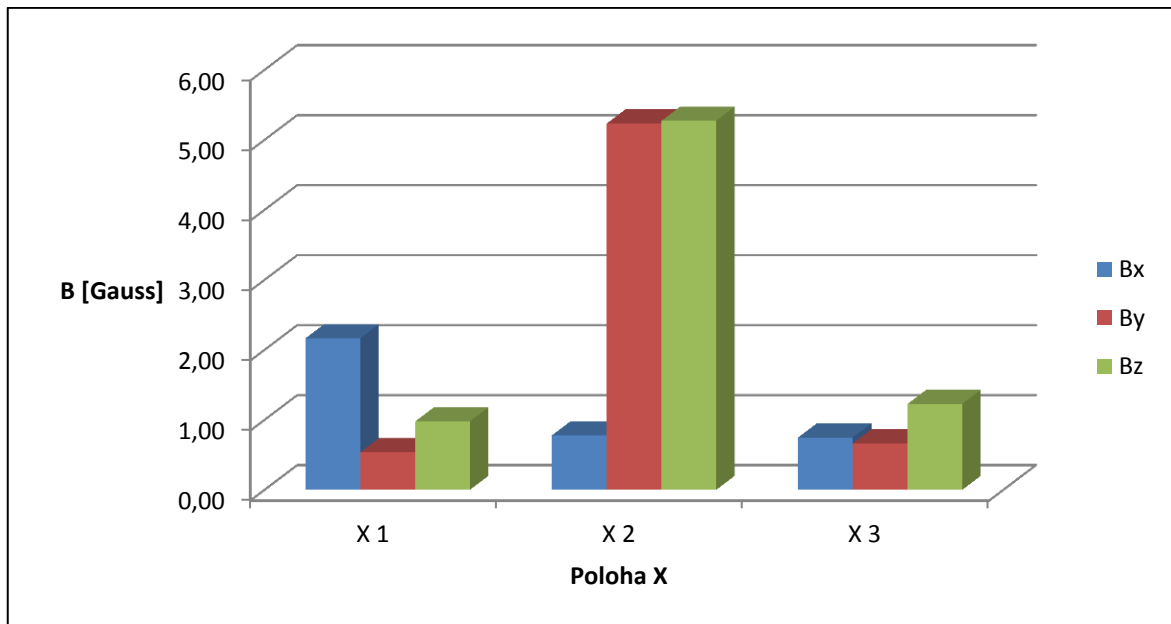
Graf 37. Velikost magnetické indukce B u motoru $M1$ v poloze sondy AD22151 X1 – X3, Y1, Z2 při konfiguraci otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster 25% - 15%.



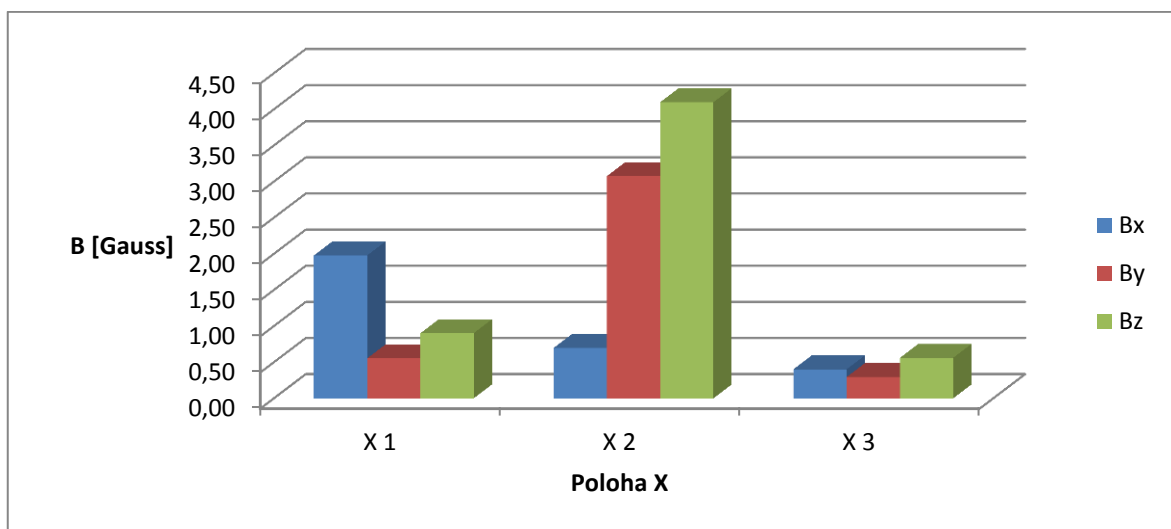
Graf 38. Velikost magnetické indukce B u motoru **M2** poloze sondy AD22151 X1 – X3, Y1, Z2 při konfiguraci otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster 25% - 15%.



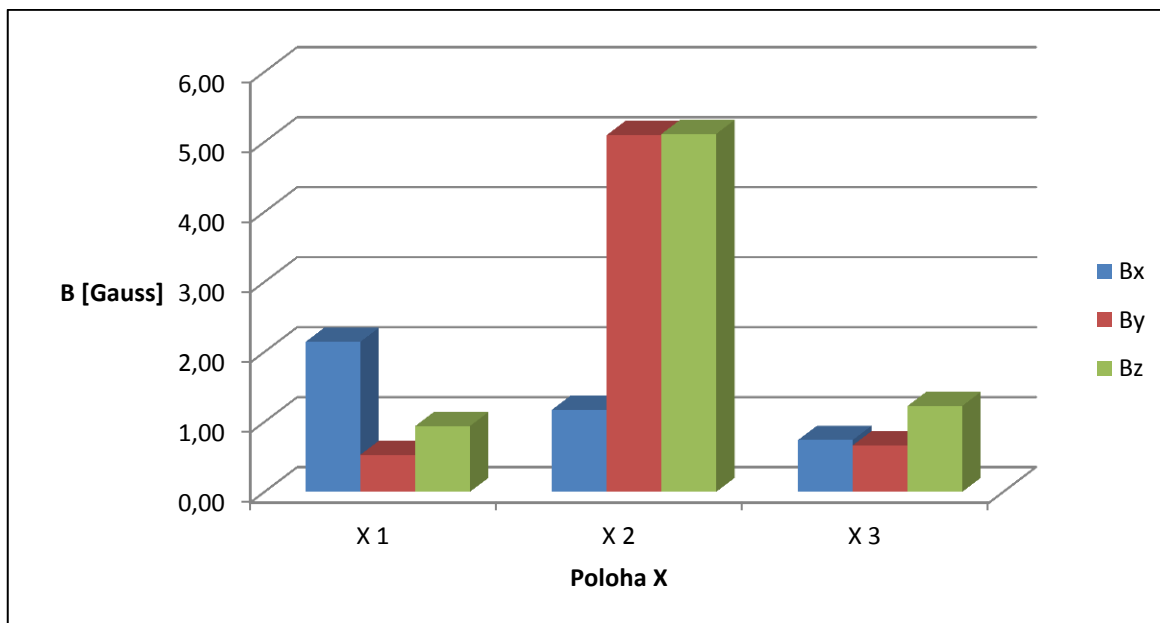
Graf 39. Velikost magnetické indukce B u motoru **M1** v poloze sondy AD22151 X1 – X3, Y1, Z2 při konfiguraci otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster 60% - 50%.



Graf 40. Velikost magnetické indukce B u motoru $M2$ v poloze sondy AD22151 X1 – X3, Y1, Z2 při konfiguraci otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster 60% - 50%.



Graf 41. Velikost magnetické indukce B u motoru $M1$ v poloze sondy AD22151 X1 – X3, Y1, Z2 při konfiguraci otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster 90% - 85%.

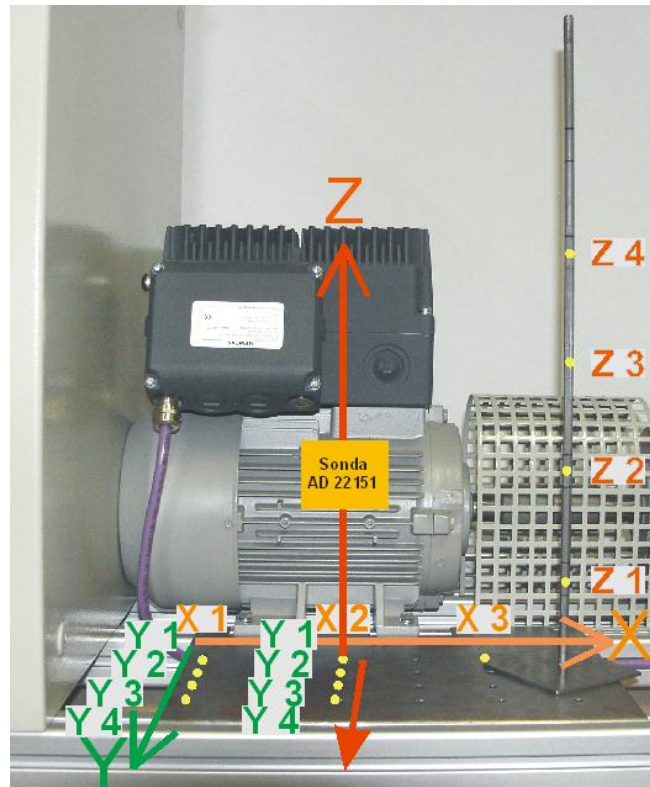


Graf 42. Velikost magnetické indukce B u motoru **M2** v poloze sondy AD22151 X1 – X3, Y1, Z2 při konfiguraci otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster 90% - 85%.

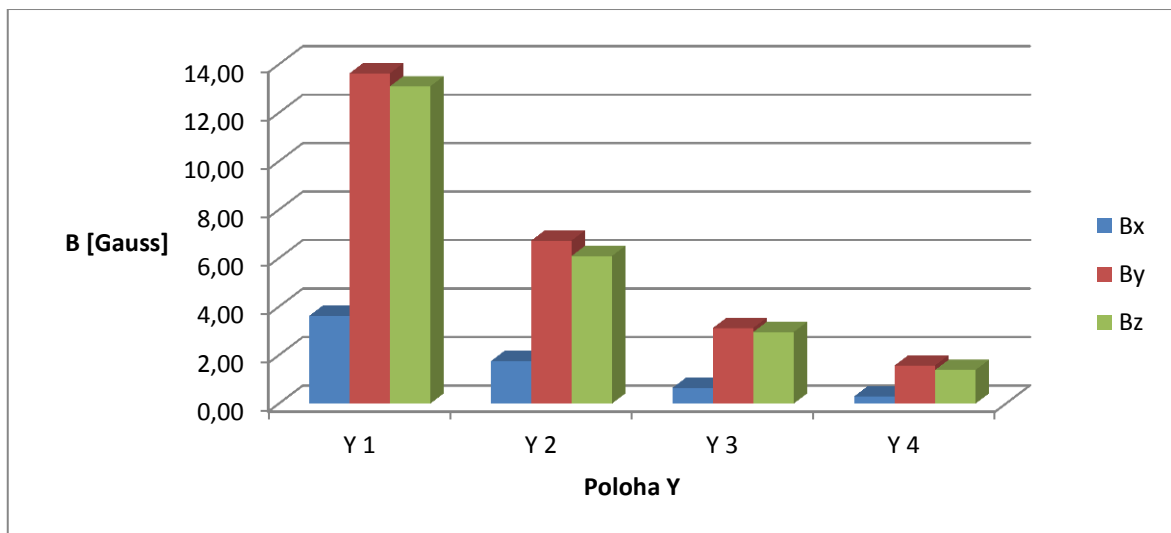
Při porovnání naměřených hodnot magnetické indukce na osách „x“, „y“, „z“ v podélných bodech X1 až X3 u motorů M1, M2 bylo zjištěno, že nejvyšší hodnota magnetické indukce ve všech osách, kromě osy „x“ se nachází v prostřední části kovového pláště motoru.

10.2.2 Porovnání naměřených hodnot magnetické indukce v bodě Y1 až Y4

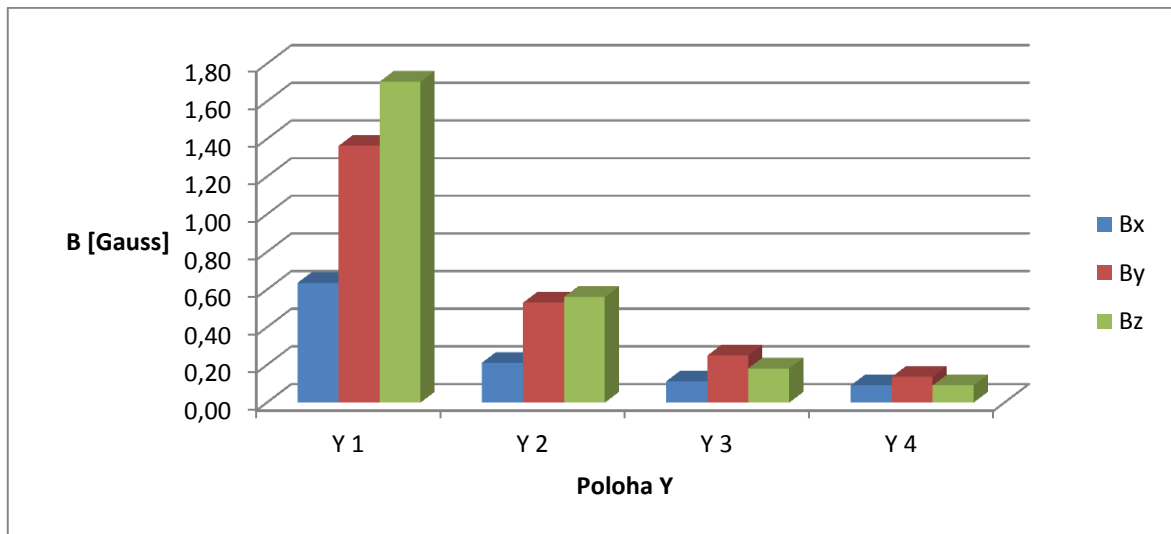
Pro porovnání naměřených hodnot magnetické indukce získané 3osou sondou AD22151 v konstantní poloze X2, Z2 a v proměnné poloze Y1 – Y4 při třech variantách konfigurace otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster byly využity data z tabulek Tab. 28, Tab. 44, Tab. 60 a pro motor **M2** byly data čerpány z tabulek Tab. 76, Tab. 88, Tab. 100.



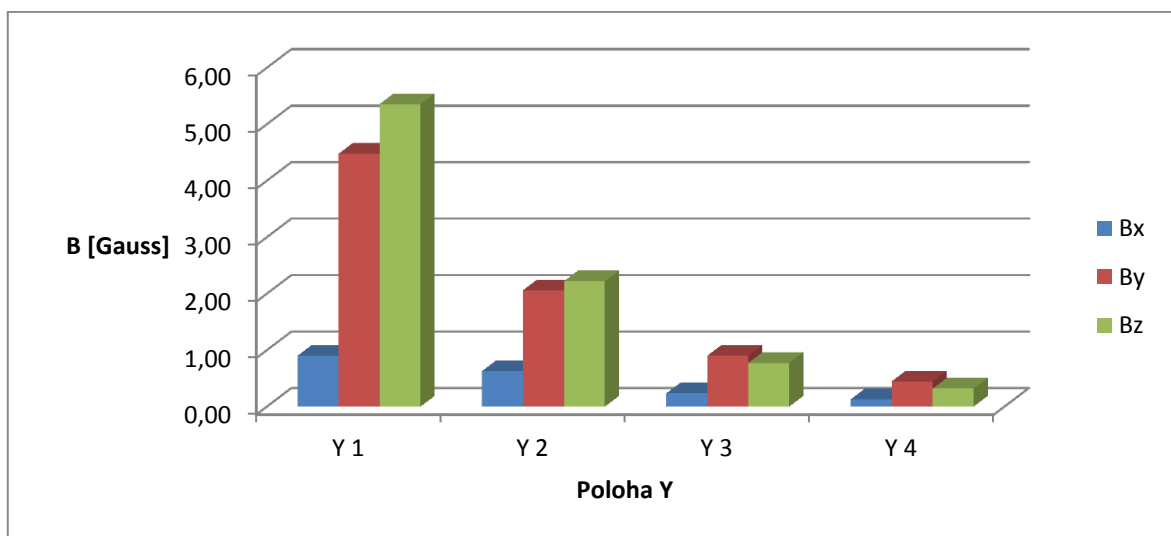
Obr. 69. Grafické zobrazení měření v poloze X2, Y1 – Y4, Z2.



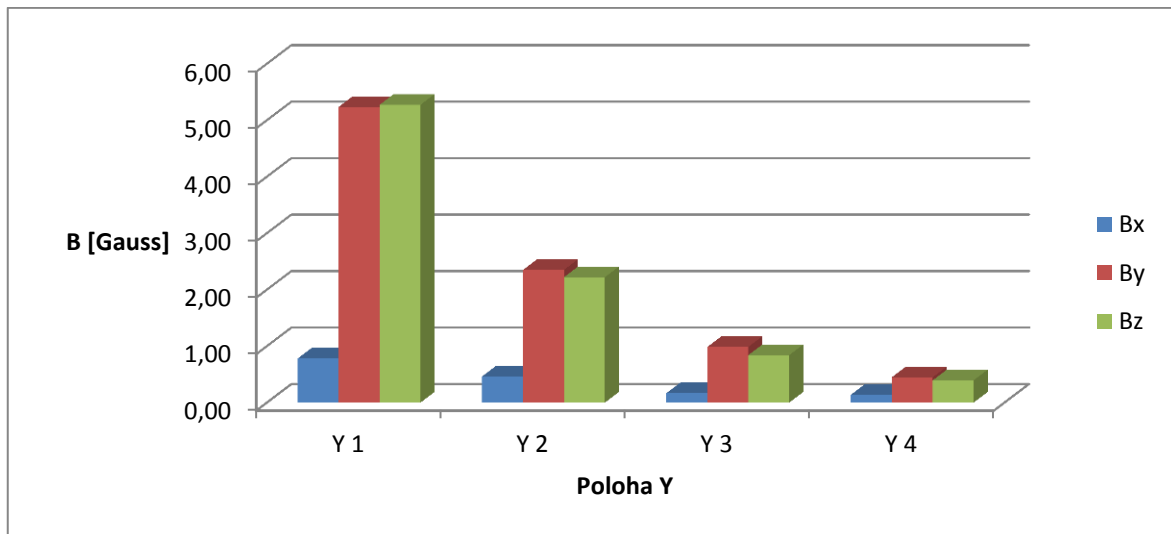
Graf 43. Velikost magnetické indukce B u motoru $M1$ v poloze sondy AD22151 X2, Y1 - Y4, Z2 při konfiguraci otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster 25% - 15%.



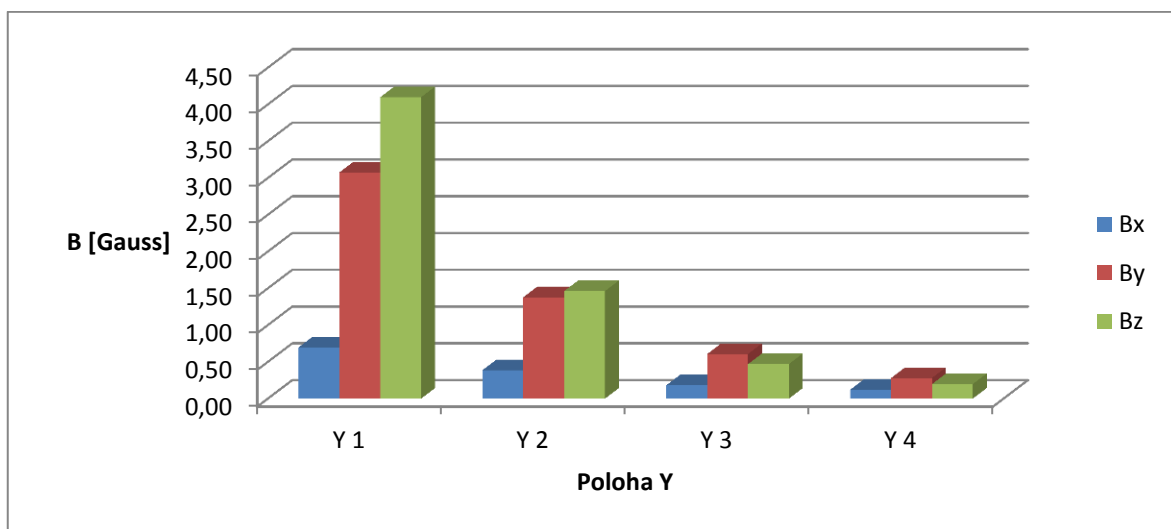
Graf 44. Velikost magnetické indukce B u motoru $M2$ v poloze sondy AD22151 X2, Y1 - Y4, Z2 při konfiguraci otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster 25% - 15%.



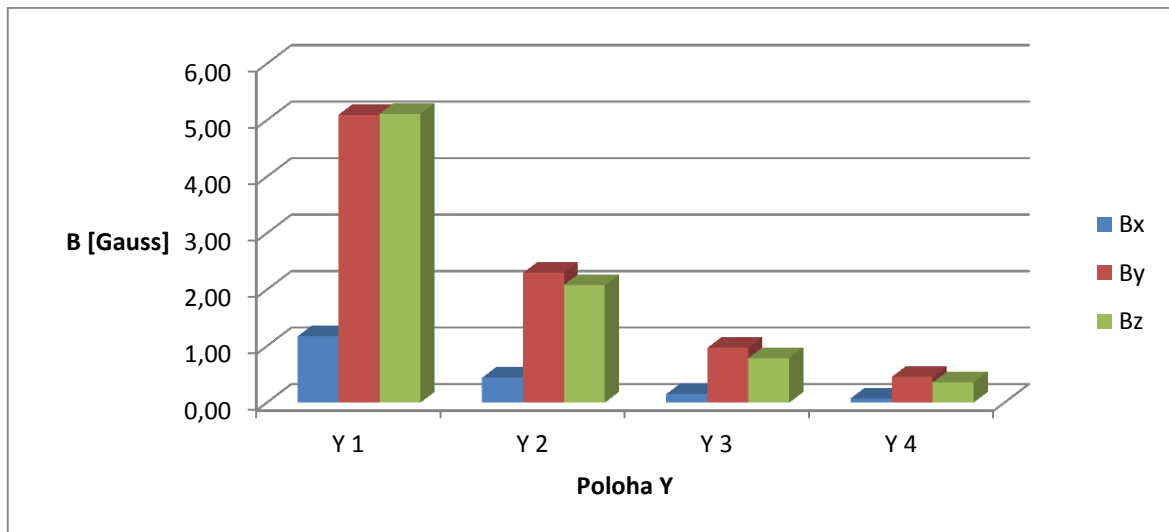
Graf 45. Velikost magnetické indukce B u motoru $M1$ v poloze sondy AD22151 X2, Y1 - Y4, Z2 při konfiguraci otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster 60% - 50%.



Graf 46. Velikost magnetické indukce B u motoru $M2$ v poloze sondy AD22151 X2, Y1 - Y4, Z2 při konfiguraci otáček $M1$ Combimaster – $M2$ Micromaster 60% - 50%.



Graf 47. Velikost magnetické indukce B u motoru $M1$ v poloze sondy AD22151 X2, Y1 - Y4, Z2 při konfiguraci otáček $M1$ Combimaster – $M2$ Micromaster 90% - 85%.

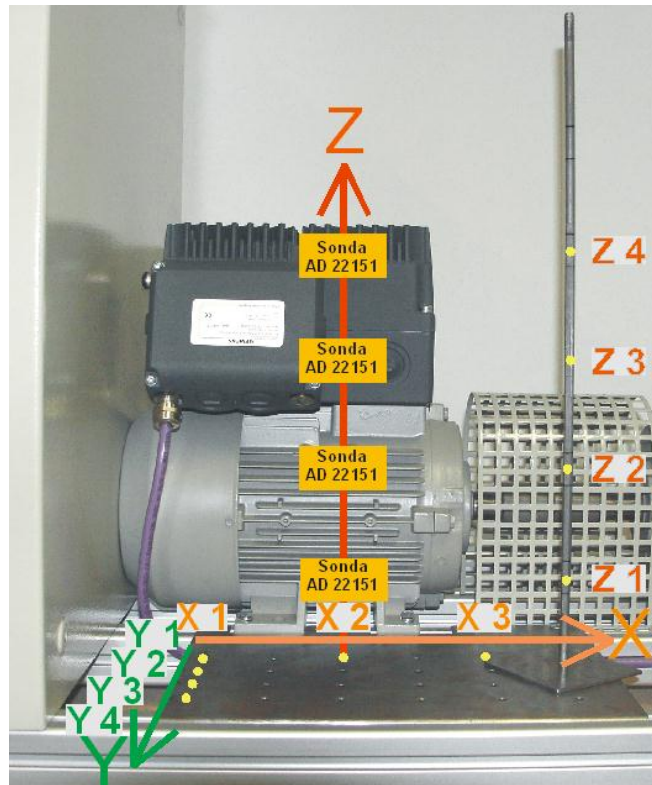


Graf 48. Velikost magnetické indukce B u motoru $M2$ v poloze sondy AD22151 X2, Y1 - Y4, Z2 při konfiguraci otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster 90% - 85%.

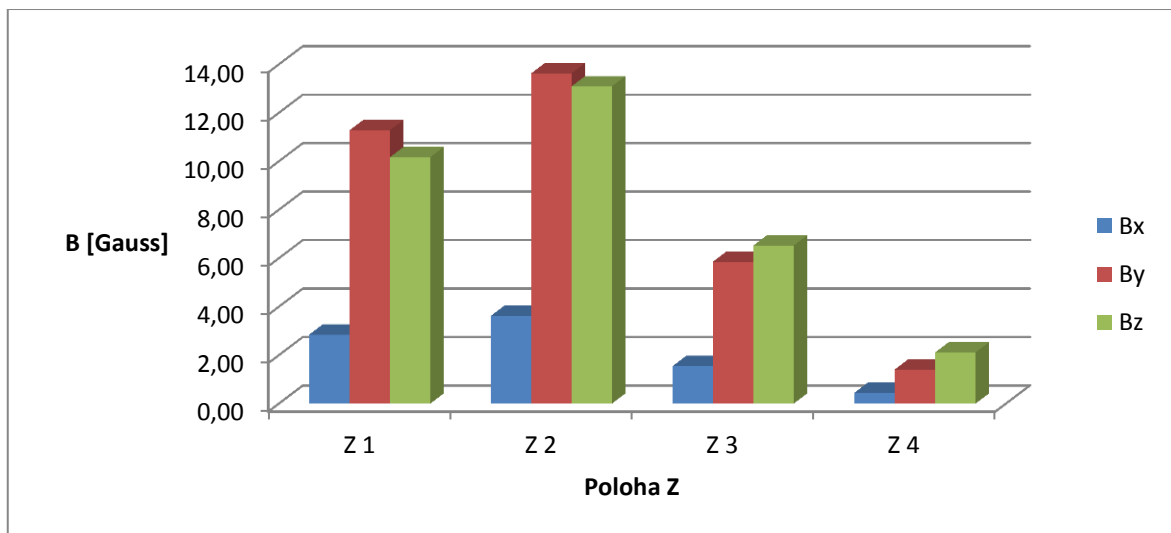
Z porovnání naměřených hodnot magnetické indukce v osách „x“, „y“, „z“ lze získat představu, jakým způsobem dochází k poklesu hodnot magnetické indukce se zvyšující se vzdáleností Y1 až Y4 od motorů M1, M2.

10.2.3 Porovnání naměřených hodnot magnetické indukce v bodě Z1 až Z4

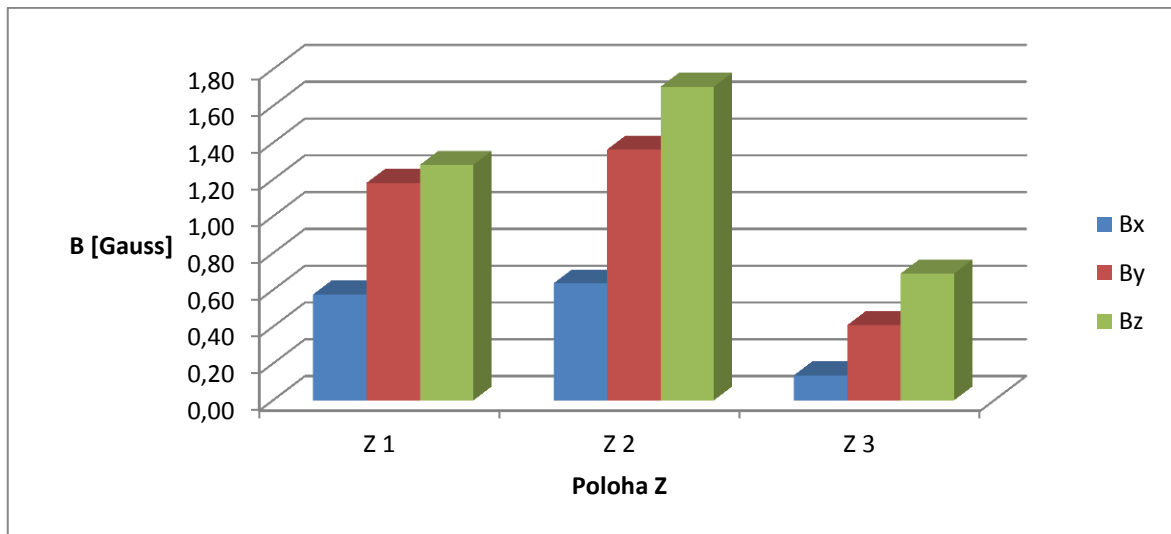
Pro porovnání naměřených hodnot magnetické indukce získané 3osou sondou AD22151 v konstantní poloze X2, Y1 a ve vertikální proměnné poloze Z1 – Z4 při třech variantách konfigurace otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster byly využity pro motor $M1$ hodnoty magnetické indukce z tabulek Tab. 24, Tab. 28, Tab. 32, Tab. 36, Tab. 40, Tab. 44, Tab. 48, Tab. 52, Tab. 56, Tab. 60, Tab. 64, Tab. 68 a pro grafické znázornění velikosti magnetické indukce ve výše uvedených bodech u motoru $M2$ byly využity tabulky Tab. 72, Tab. 76, Tab. 80, Tab. 84, Tab. 88, Tab. 92, Tab. 96, Tab. 100, Tab. 104.



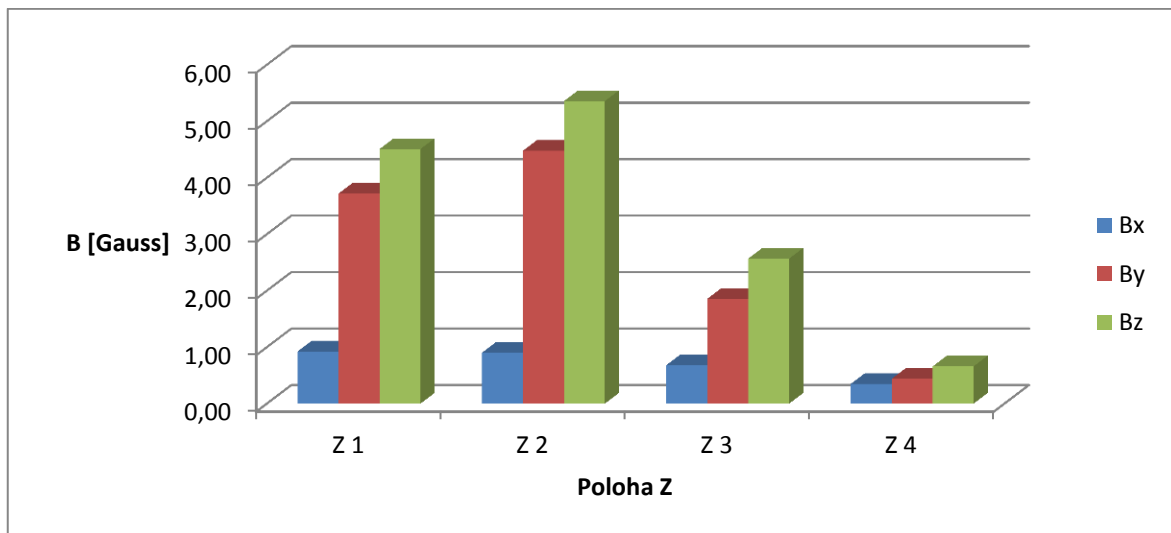
Obr. 70. Grafické zobrazení měření v poloze X2, Y1, Z1 – Z4.



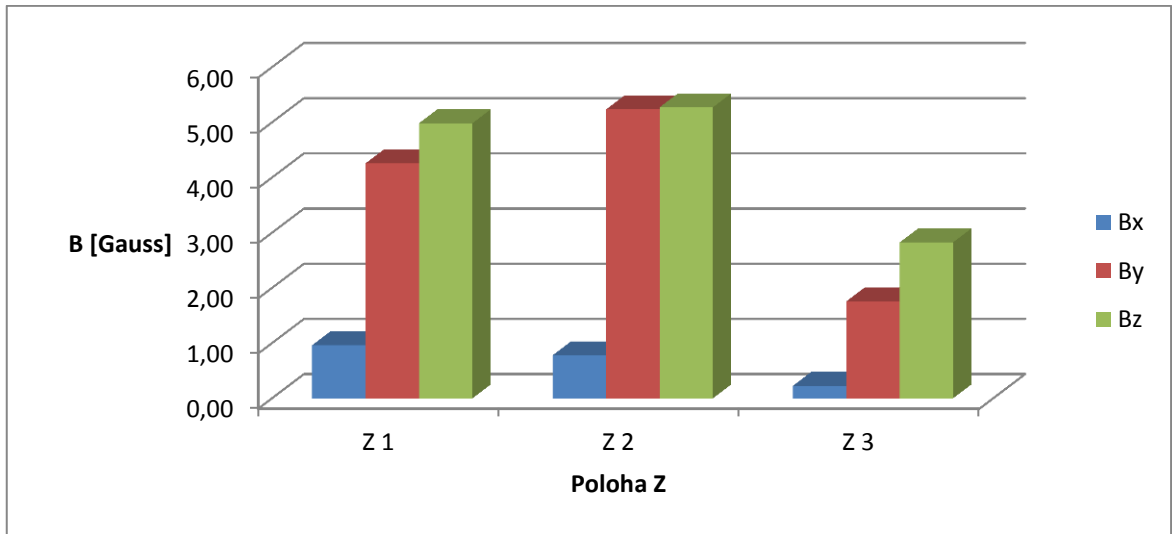
Graf 49. Velikost magnetické indukce B u motoru $M1$ v poloze sondy AD22151 X2, Y1, Z1 – Z4 při konfiguraci otáček $M1$ Combimaster – $M2$ Micromaster 25% - 15%.



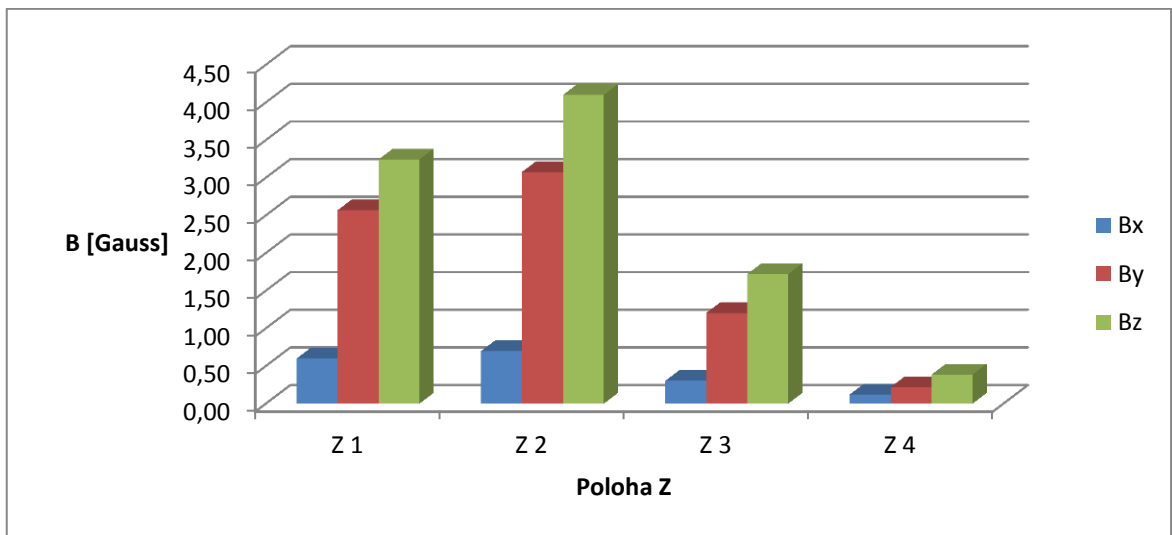
Graf 50. Velikost magnetické indukce B u motoru $M2$ v poloze sondy AD22151 X2, Y1, Z1 – Z3 při konfiguraci otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster 25% - 15%.



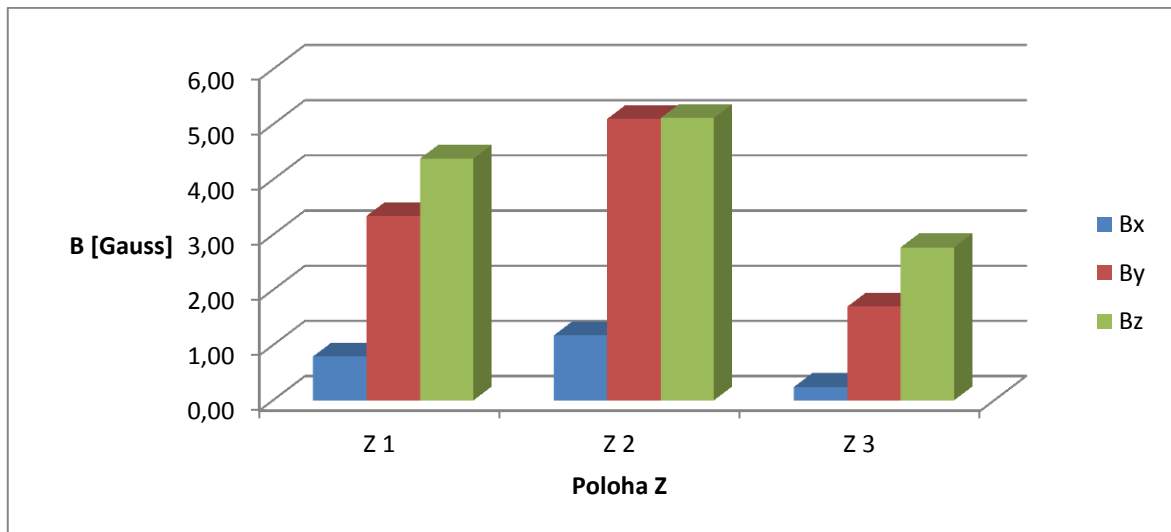
Graf 51. Velikost magnetické indukce B u motoru $M1$ v poloze sondy AD22151 X2, Y1, Z1 – Z4 při konfiguraci otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster 60% - 50%.



Graf 52. Velikost magnetické indukce B u motoru M2 v poloze sondy AD22151 X2, Y1, Z1 – Z3 při konfiguraci otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster 60% - 50%.



Graf 53. Velikost magnetické indukce B u motoru M1 v poloze sondy AD22151 X2, Y1, Z1 – Z4 při konfiguraci otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster 90% - 85%.

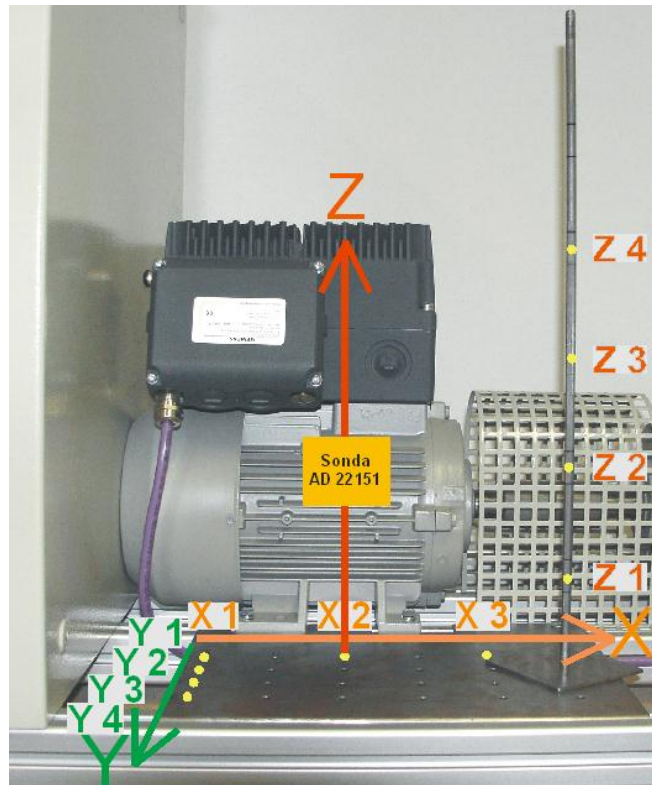


Graf 54. Velikost magnetické indukce B u motoru $M2$ v poloze sondy AD22151 X2, Y1, Z1 – Z3 při konfiguraci otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster 90% - 85%.

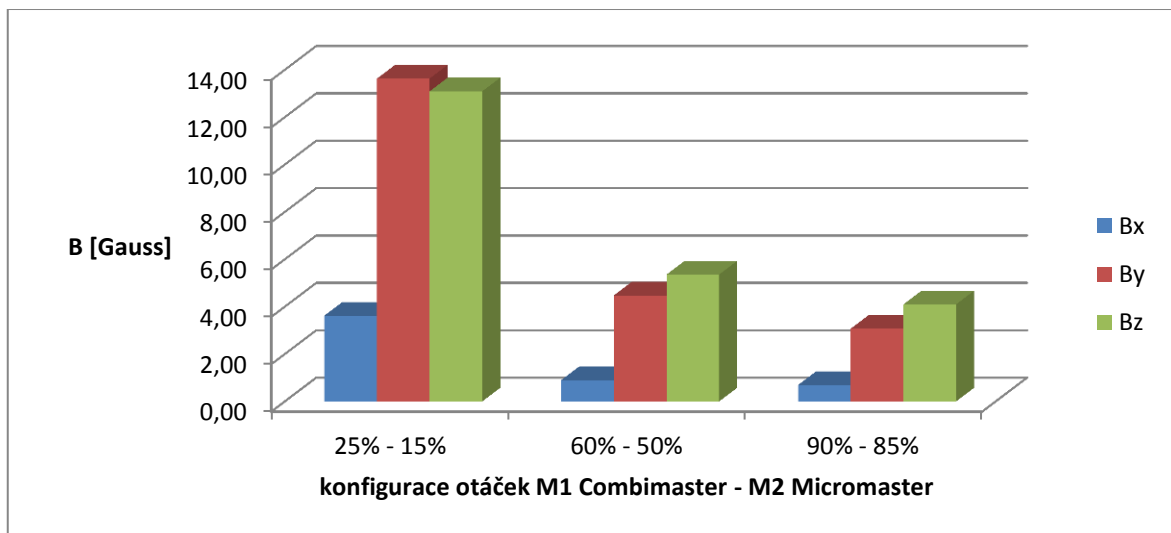
Z porovnání naměřených hodnot magnetické indukce ve vertikální rovině motoru $M1$ Z1 až Z4 (u motoru $M2$ Z1 až Z3) bylo grafickou formou potvrzeno, že velikost magnetické indukce v osách „x“, „y“, „z“ při třech variantách nastavení otáček je největší ve vertikálním bodě Z2.

10.2.4 Porovnání naměřených hodnot magnetické indukce v souřadnici bodů X2, Y1, Z2

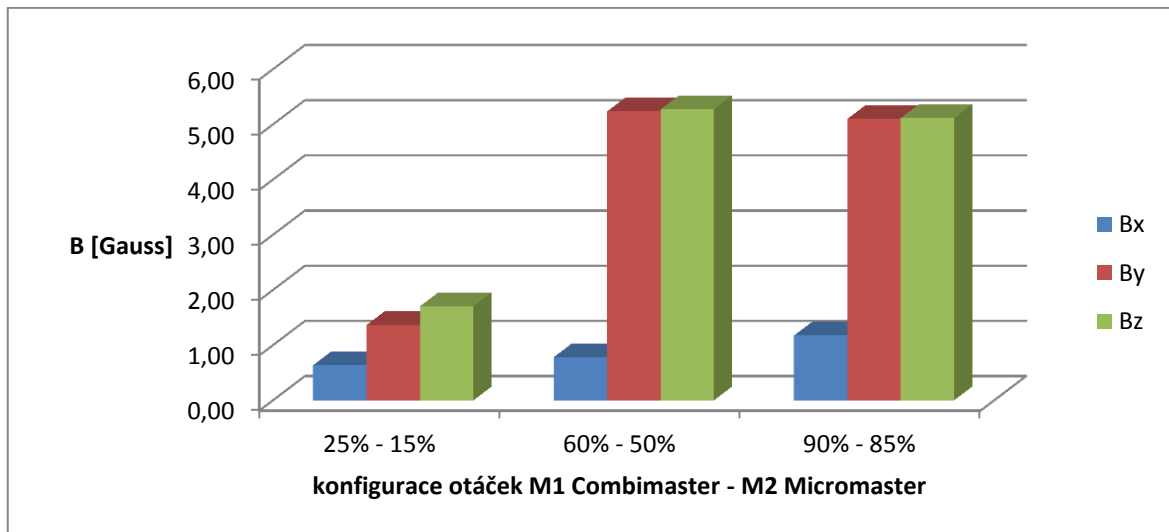
Pro porovnání naměřených hodnot magnetické indukce v osách „x“, „y“, „z“ získané 3osou sondou AD22151 v konstantní poloze X2, Y1, Z2 při třech variantách konfigurace otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster byly využity pro motor $M1$ data z tabulek Tab. 28, Tab. 44, Tab. 60 a pro motor $M2$ hodnoty magnetické indukce z tabulek Tab. 76, Tab. 88, Tab. 100.



Obr. 71. Grafické zobrazení měření v poloze X2, Y1, Z2.



Graf 55. Porovnání velikosti magnetické indukce B u motoru $M1$ v poloze sondy AD22151 X2, Y1, Z2 při všech variantách konfigurace otáčků M1 Combimaster – M2 Micromaster.



Graf 56. Porovnání velikosti magnetické indukce B u motoru $M2$ v poloze sondy AD22151 X2, Y1, Z2 při všech variantách konfigurace otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster.

Z výše uvedených grafů lze vyčíst, že nejnižší hodnoty magnetické indukce byly naměřeny u obou motorů M1, M2 v ose „x“. U motoru M1 hodnoty magnetické indukce se zvyšujícími otáčkami klesaly. Motor M2 generoval do okolí magnetické pole, jehož hodnoty magnetické indukce v ose „y“, „z“ byly nejvyšší u druhé konfiguraci otáček, i když v porovnání s hodnotami magnetické indukce v osách „y“, „z“ u třetí konfiguraci otáček byl rozdíl hodnot velice malý.

10.2.5 Výpočet polárních úhlů

Výpočet polárních úhlů byl proveden při všech třech variantách nastavení otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster u motoru M1. Došlo k redukci měřících bodů na X1 – X3, Y1 – Y2 a Z1 – Z3, ve kterých byly naměřeny poměrně vysoké hodnoty magnetické indukce. Pro výpočet polárních úhlů byly použity následující vztahy:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{r\sin\varphi}{r\cos\varphi} = \frac{y}{x} \Rightarrow \varphi = \operatorname{arctg}\left(\frac{y}{x}\right) \quad (x > 0, y > 0) \quad (34)$$

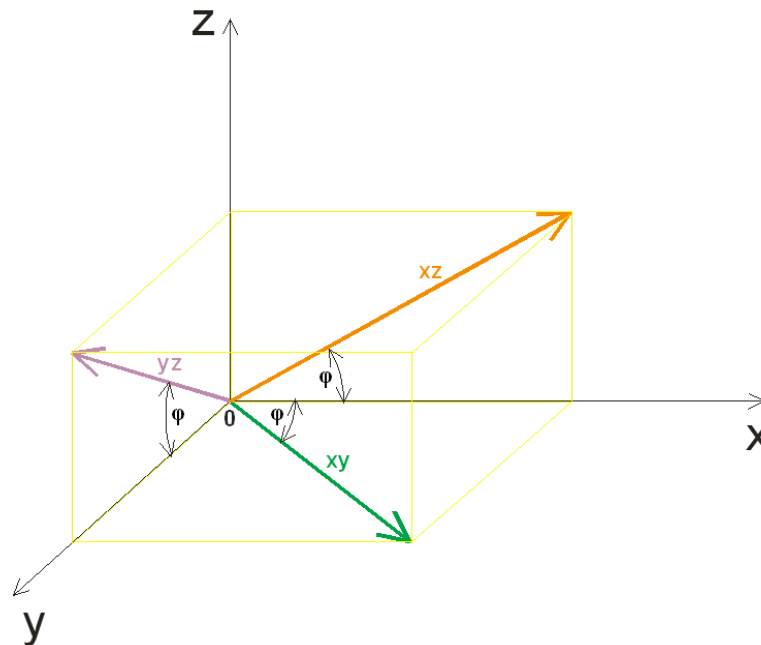
$$\varphi_{xy} = \frac{180}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{y}{x} \quad (35)$$

$$\varphi_{xz} = \frac{180}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{z}{x} \quad (36)$$

$$\varphi_{yz} = \frac{180}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{z}{y} \quad (37)$$

Ve výpočtech byla užita hodnota $\pi = 3,141$.

Pro následné grafické zobrazení úhlového posunu vektoru byla pro zjednodušení a přehlednost kresby vybrána pouze rovina „xz“. Analogickým postupem lze zakreslit úhlový posun vektorů ve zbývajících rovinách „xy“, „yz“. U grafického zobrazení byla velikost úhlu „ φ “ zaokrouhlena na celá čísla.



Obr. 72. Obrázek 2.3. Vizualizace vektorů v rovině „xy“, „xz“, „yz“ se znázorněnými úhly „ φ “.

Zpracování polárních úhlů ve vertikální rovině Z1

1. konfigurace otáček

M1 Combimaster - 25%

M2 Micromaster - 15%

Pro výpočet velikosti polárních úhlů pro vertikální rovinu Z1 při třech variantách otáček motorů byly hodnoty magnetické indukce čerpány z tabulek Tab. 24, Tab. 40, Tab. 56.

Tab. 107. Hodnoty polárních úhlů v rovinách „xy“, „xz“, „yz“.

výška	Z 1								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / rovina	φ_{xy} [°]	φ_{xz} [°]	φ_{yz} [°]	φ_{xy} [°]	φ_{xz} [°]	φ_{yz} [°]	φ_{xy} [°]	φ_{xz} [°]	φ_{yz} [°]
Y 1	21,133	26,345	52,028	75,830	74,350	42,029	37,895	50,808	57,602
Y 2	28,682	37,724	54,733	74,123	75,281	47,276	39,371	52,186	57,512

2. konfigurace otáček

M1 Combimaster - 60%

M2 Micromaster - 50%

Tab. 108. Hodnoty polárních úhlů v rovinách „xy“, „xz“, „yz“.

výška	Z 1								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / rovina	φ_{xy} [°]	φ_{xz} [°]	φ_{yz} [°]	φ_{xy} [°]	φ_{xz} [°]	φ_{yz} [°]	φ_{xy} [°]	φ_{xz} [°]	φ_{yz} [°]
Y 1	18,375	17,642	43,756	76,048	78,415	50,472	29,963	39,070	54,621
Y 2	28,475	30,678	47,565	73,378	76,382	50,941	34,744	40,526	50,948

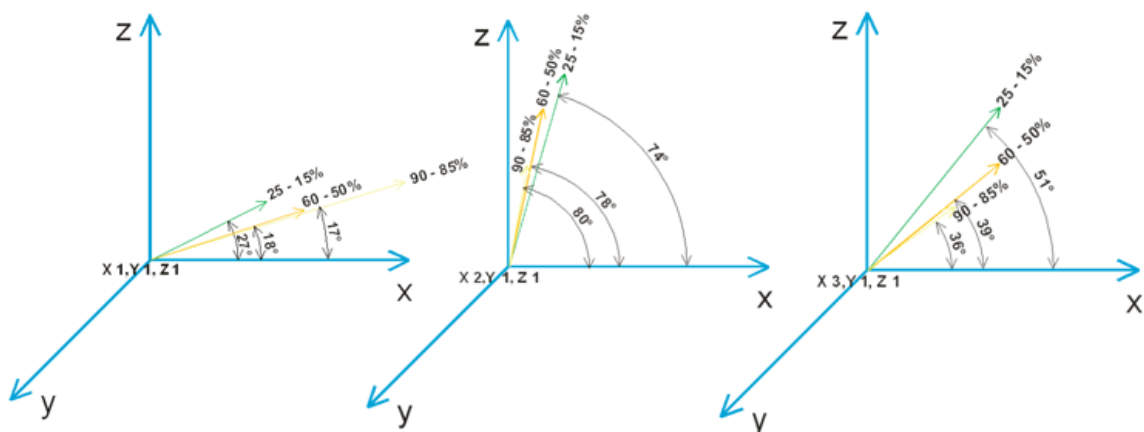
3. konfigurace otáček

M1 Combimaster - 90%

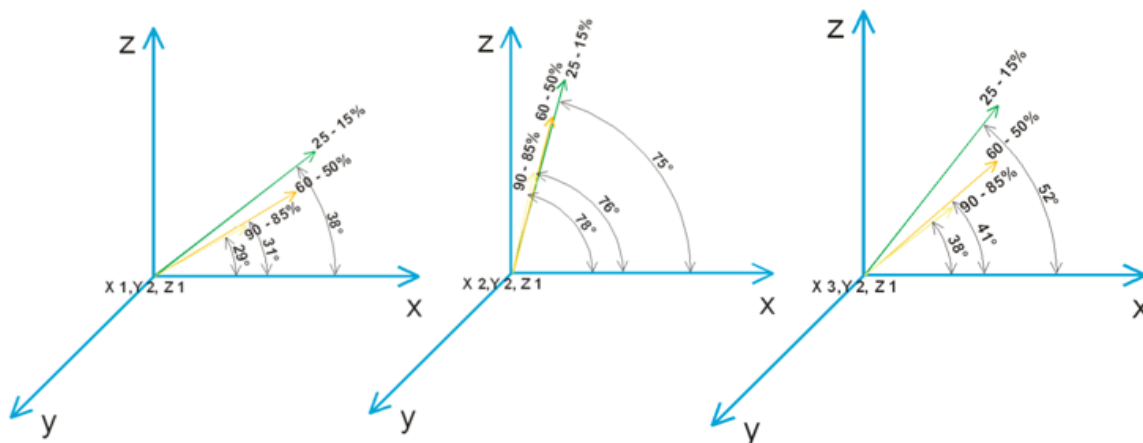
M2 Micromaster - 85%

Tab. 109. Hodnoty polárních úhlů v rovinách „xy“, „xz“, „yz“.

výška	Z 1								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / rovina	φ_{xy} [°]	φ_{xz} [°]	φ_{yz} [°]	φ_{xy} [°]	φ_{xz} [°]	φ_{yz} [°]	φ_{xy} [°]	φ_{xz} [°]	φ_{yz} [°]
Y 1	16,599	17,355	46,355	76,884	79,544	51,620	30,380	35,911	51,011
Y 2	27,450	28,721	46,470	74,645	77,711	51,577	32,382	37,973	50,908



Obr. 73. Velikost polárních úhlů vektoru v rovině „xz“ v bodech X1 - X3, Y1, Z1 při třech variantách nastavení otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster.



Obr. 74. Velikost polárních úhlů vektoru v rovině „xz“ v bodech X1 - X3, Y2, Z1 při třech variantách nastavení otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster.

Zpracování polárních úhlů ve vertikální rovině Z2

1. konfigurace otáček

M1 Combimaster - 25%

M2 Micromaster - 15%

Pro výpočet velikosti polárních úhlů pro vertikální rovinu Z2 při třech variantách otáček motorů byly hodnoty magnetické indukce využity z tabulek Tab. 28, Tab. 44, Tab. 60.

Tab. 110. Hodnoty polárních úhlů v rovinách „xy“, „xz“, „yz“.

výška	Z 2								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / rovina	φ_{xy} [°]	φ_{xz} [°]	φ_{yz} [°]	φ_{xy} [°]	φ_{xz} [°]	φ_{yz} [°]	φ_{xy} [°]	φ_{xz} [°]	φ_{yz} [°]
Y 1	19,784	29,158	57,191	75,122	74,540	43,848	38,197	58,384	64,158
Y 2	32,266	39,030	52,090	75,421	73,972	42,159	41,460	53,714	57,032

2. konfigurace otáček

M1 Combimaster - 60%

M2 Micromaster - 50%

Tab. 111. Hodnoty polárních úhlů v rovinách „xy“, „xz“, „yz“.

výška	Z 2								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / rovina	φ_{xy} [°]	φ_{xz} [°]	φ_{yz} [°]	φ_{xy} [°]	φ_{xz} [°]	φ_{yz} [°]	φ_{xy} [°]	φ_{xz} [°]	φ_{yz} [°]
Y 1	15,946	24,275	57,646	78,618	80,448	50,108	34,779	55,047	64,108
Y 2	26,871	31,523	50,442	73,033	74,186	47,130	36,086	45,483	54,374

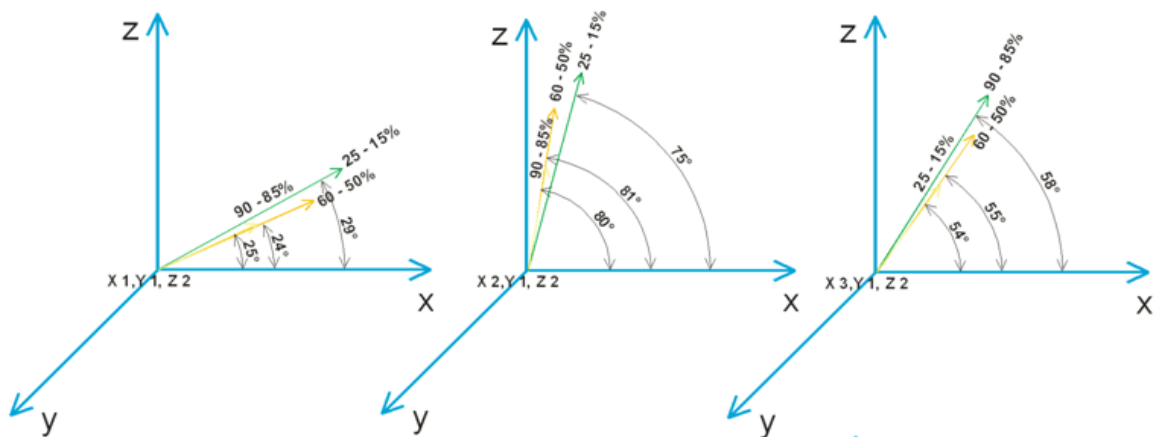
3. konfigurace otáček

M1 Combimaster - 90%

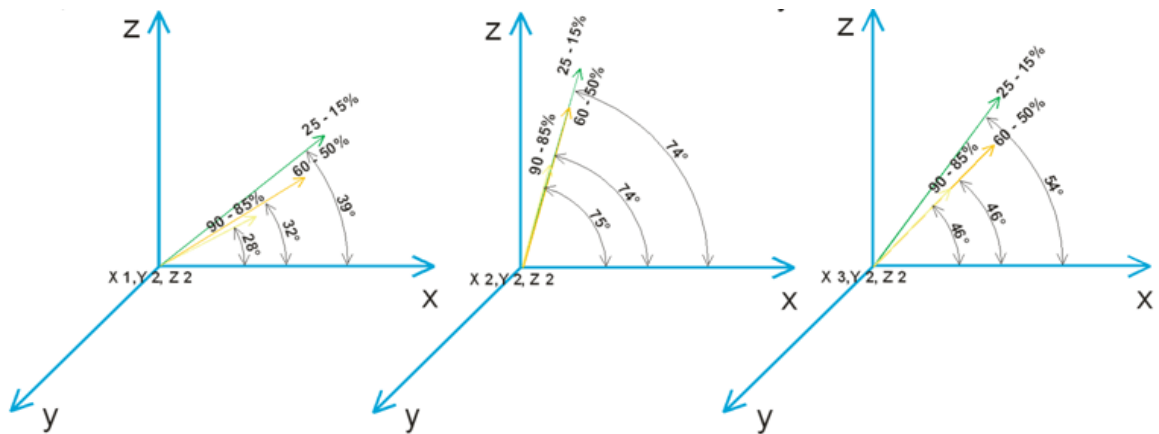
M2 Micromaster - 85%

Tab. 112. Hodnoty polárních úhlů v rovinách „xy“, „xz“, „yz“.

výška	Z 2								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / rovina	φ_{xy} [°]	φ_{xz} [°]	φ_{yz} [°]	φ_{xy} [°]	φ_{xz} [°]	φ_{yz} [°]	φ_{xy} [°]	φ_{xz} [°]	φ_{yz} [°]
Y 1	15,626	24,511	58,475	77,235	80,351	53,115	36,349	54,391	62,211
Y 2	24,016	27,689	49,668	74,348	75,200	46,682	41,989	45,709	48,717



Obr. 75. Velikost polárních úhlů vektoru v rovině „xz“ v bodech X1 - X3, Y1, Z2 při třech variantách nastavení otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster.



Obr. 76. Velikost polárních úhlů vektoru v rovině „xz“ v bodech X1 - X3, Y2, Z2 při třech variantách nastavení otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster.

*Zpracování polárních úhlů ve vertikální rovině Z3***1. konfigurace otáček**

M1 Combimaster - 25%

M2 Micromaster - 15%

Pro výpočet velikosti polárních úhlů pro vertikální rovinu Z3 při třech variantách otáček motorů byly hodnoty magnetické indukce čerpány z tabulek Tab. 32, Tab. 48, Tab. 64.

Tab. 113. Hodnoty polárních úhlů v rovinách „xy“, „xz“, „yz“.

výška	Z 3								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / rovina	φ_{xy} [°]	φ_{xz} [°]	φ_{yz} [°]	φ_{xy} [°]	φ_{xz} [°]	φ_{yz} [°]	φ_{xy} [°]	φ_{xz} [°]	φ_{yz} [°]
Y 1	39,675	40,966	46,309	75,219	76,673	48,084	46,164	43,966	42,805
Y 2	39,584	40,116	45,542	75,079	77,346	49,884	45,479	45,241	44,764

2. konfigurace otáček

M1 Combimaster - 60%

M2 Micromaster - 50%

Tab. 114. Hodnoty polárních úhlů v rovinách „xy“, „xz“, „yz“.

výška	Z 3								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / rovina	φ_{xy} [°]	φ_{xz} [°]	φ_{yz} [°]	φ_{xy} [°]	φ_{xz} [°]	φ_{yz} [°]	φ_{xy} [°]	φ_{xz} [°]	φ_{yz} [°]
Y 1	38,347	31,465	37,726	69,831	75,134	54,145	42,359	33,496	35,973
Y 2	37,477	29,540	36,470	70,516	73,473	50,015	42,399	33,978	36,432

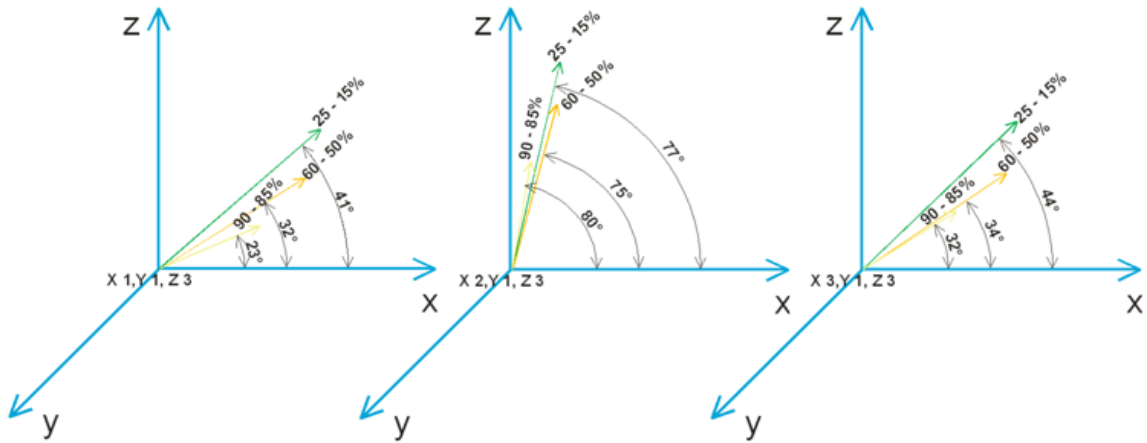
3. konfigurace otáček

M1 Combimaster - 90%

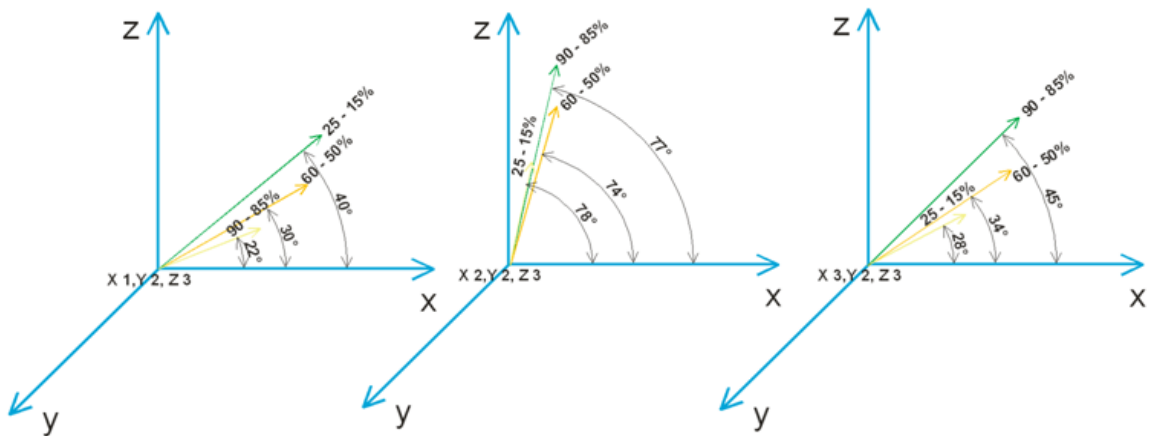
M2 Micromaster - 85%

Tab. 115. Hodnoty polárních úhlů v rovinách „xy“, „xz“, „yz“.

výška	Z 3								
body X	X 1			X 2			X 3		
body Y / rovina	φ_{xy} [°]	φ_{xz} [°]	φ_{yz} [°]	φ_{xy} [°]	φ_{xz} [°]	φ_{yz} [°]	φ_{xy} [°]	φ_{xz} [°]	φ_{yz} [°]
Y 1	32,401	22,933	33,691	75,881	80,009	54,993	47,071	32,006	30,174
Y 2	33,072	21,572	31,265	75,804	77,537	48,858	41,187	27,980	31,265



Obr. 77. Velikost polárních úhlů vektoru v rovině „xz“ v bodech $X_1 - X_3, Y_1, Z_3$ při třech variantách nastavení otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster.



Obr. 78. Velikost polárních úhlů vektoru v rovině „xz“ v bodech $X_1 - X_3, Y_2, Z_3$ při třech variantách nastavení otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster.

11 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ MAGNETICKÉHO POLE ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ M1 COMBIMASTER – M2 MICROMASTER

K důkladnějšímu měření magnetického pole, které generují do okolního prostředí asynchronní motory M1, M2, bylo potřeba zvolit kolem asynchronních motorů poměrně velké množství měřících bodů. 3osá Hallova sonda AD22151 byla umístěna v měřících bodech, které byly definovány souřadnicemi X, Y, Z. Na základě naměřených dat v přesně definovaných souřadnicích X1 – X3, Y1 – Y4, Z1 – Z4 byly vytvořeny prostorové a plošné grafy. Prostorové grafy znázorňují přibližný tvar magnetického pole pomocí prostorového vektoru „ \overline{xyz} “ v bodech o souřadnicích X1 – X3, Y1 – Y4 při dané výšce Z1 – Z4. Plošné grafy znázorňují hodnoty magnetické indukce v osách „x“, „y“, „z“ u jednotlivých měřících bodů a konfigurací otáček.

U obou motorů M1 Combimaster – M2 Micromaster byly nejvyšší hodnoty magnetické indukce naměřeny v ose „y“, „z“. Magnetické pole motoru M1 Combimaster vykazovalo nejvyšší hodnoty magnetické indukce při první konfiguraci otáček. U následujících dvou konfigurací otáček již hodnota magnetické indukce měla se zvyšujícím se počtem otáček klesající charakter. Motor M2 Micromaster generoval do okolního prostředí nejvyšší hodnotu magnetické indukce při druhé konfiguraci otáček a nejnižší hodnotu magnetické indukce generoval při první konfiguraci otáček. U obou motorů byly nejvyšší hodnoty magnetické indukce získány ve všech osách „x“, „y“, „z“ v poloze sondy o souřadnicích X2, Y1, Z2. Z výše uvedeného lze konstatovat, že intenzita magnetického pole obou motorů je závislá na počtu otáček.

Při analyzování průběhu výstupního napětí 3osé sondy osciloskopem bylo dokázáno, že asynchronní motory generují do okolí střídavé magnetické pole o frekvenci 50Hz totožné s frekvencí napájecí sítě. Toto magnetické pole se vyznačuje tepelnými účinky a je z krátkodobého hlediska pro lidský organismus neškodné.

Mimo jiné byly naměřené hodnoty nepříznivě ovlivněny cizími magnetickými poli, které měly parazitní vliv na výstupní napětí sondy AD22151 ve formě šumu. Naměřené hodnoty jsou z tohoto důvodu v toleranci $\pm 12\text{mV}$. Také mohlo dojít k deformaci šíření směru magnetických siločar díky železné konstrukci, na které byla sonda připevněna.

ZÁVĚR

Úkolem teoretické části diplomové práce bylo seznámit čtenáře s problematikou stěžejních částí nového vědeckotechnického oboru, který v sobě integruje vědní i technické disciplíny a má výrazný vliv na finanční a ekonomickou stránku v oblasti vývoje a výroby elektrotechnických zařízení.

Cílem praktické části bylo zaměřit se na magnetickou interferenci, která tvoří jeden ze dvou hlavních pilířů elektromagnetické kompatibility. Měření elektromagnetické interference bylo podrobena zařízení, tvořené soustavou asynchronních motorů M1 Combimaster - M2 Micromaster, které jsou řízené frekvenčními měniči. K měření magnetického pole jednotlivých asynchronních motorů byla použita 3osá Hallova sonda AD22151, která byla pomocí mechanické konstrukce umístěna v daných měřicích bodech. Zpočátku bylo potřeba důkladně analyzovat charakteristiku Hallovy sondy. K tomuto účelu byla využita miniaturní Hallova sonda A1321, protože původně zamýšlená sonda AD22151 byla díky svým větším rozměrům, které byly způsobeny deskou plošných spojů obsahující externí součástky nevhodná pro precizní měření její charakteristiky. Samotný problém bylo vytvoření magnetického homogenního pole, který byl vyřešen využitím nedokonalého magnetického homogenního pole, vyskytujícím se v kruhovém otvoru permanentního magnetu. Pro první měření magnetického pole asynchronních motorů byla citlivost sondy AD22151 nastavena na hodnotu odpovídající hodnotě citlivosti sondy A1321 tj. 5mV/G. Ukázalo se, že nastavená citlivost je pro měření magnetického pole asynchronních motorů nevhodná. Při následných pokusech a komparativních měření s axiální sondou Gaussmetru byla citlivost nastavena na hodnotu 132mV/G, která měla za následek nelinearitu Hallovy sondy. Nelinearita se projevovala při měření vysokých hodnot magnetické indukce. Samotné měření bylo také ovlivněno nepřesnými hodnotami výstupního napětí sondy AD22151, které kmitalo v rozmezí ± 12 mV.

Naměřené hodnoty byly následně graficky zpracovány plošnými a prostorovými grafy v prostředí MS Office Excel, aby podaly ucelenější představu o velikosti magnetické indukce v celé škále bodů měření při jednotlivých konfiguracích otáček motorů M1 Combimaster – M2 Micromaster.

Výsledky měření budou přínosem pro rozšíření laboratorní úlohy DE 4. Na základě změřených hodnot magnetické indukce se bude kolem motorů pohybovat manipulátor, který bude zaujímat konkrétní polohu dle zadané velikosti magnetické indukce.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

The task of the theoretical part of the thesis was to acquaint the reader with a key part of the new scientific discipline of electromagnetic compatibility, which integrates scientific and technical disciplines and has a significant impact on the financial and economical aspects in the development and manufacture of electrotechnical equipment.

Aim of the work was to focus on the magnetic interference, which is one of the two main pillars of electromagnetic compatibility. Device consisting of a system of induction motors M1 CombiMaster - Micromaster M2, which are controlled by frequency converters were subjected to electromagnetic interference measurements. 3-axis AD22151 Hall effect sensor, which was placed through a mechanical structure in the respective measuring points was used to measure the magnetic field of induction motors. Initially it was necessary to thoroughly analyze the characteristics of the Hall probe. For this purpose a miniature Hall probe A1321 was used because the originally proposed AD22151 probe was unsuitable for precise measurements of its characteristics due to its larger size, caused by a printed circuit board containing external components. The actual problem was to create a homogeneous magnetic field, which was solved by using an imperfect homogeneous magnetic field occurring in a circular opening of the permanent magnet. For the first measurement of the magnetic field of induction motors, the sensitivity of the probe AD22151 was set to a value equivalent to the sensitivity of the probe ie A1321 which is $5\text{mV} / \text{G}$. It turned out that the sensitivity set to measure the magnetic field induction motors was inappropriate. In subsequent experiments and comparative measurements with an axial probe Gaussmeter, sensitivity was set to $132\text{mV} / \text{G}$, which resulted in nonlinearity of Hall probe. Nonlinearity appeared, when measuring high values of magnetic induction. The actual measurement was also influenced by inaccurate values of the output voltage probes AD22151, which oscillated in the range of $\pm 12 \text{mV}$.

The measured values were then graphically proceeded in MS Excel, to give a more complete idea of the magnitude of magnetic induction in a variety of measurement points for each speed configuration of M1 CombiMaster and M2 Micromaster motors.

The measurement results will be beneficial to expand the laboratory exercise DE 4. On the basis of the resulting measured values of magnetic induction around the motor, the manipulator will move to the specific position given by the size of magnetic induction.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KAZDEROVÁ, Jaroslava. *Elektromagnetická interference a její vyhodnocování*. Zlín, 2010. 102 s. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky. Vedoucí diplomové práce Hruška František, doc. Ing. Ph.D.
- [2] SVAČINA, Jiří. *Elektromagnetická kompatibilita: Přednášky*. Brno: Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně, 2002. 171 s.
- [3] DYER, Stephen A. *Survey of instrumentation and measurement*. New York : John Wiley & Sons, 2001. 1096 s. ISBN 047139484X.
- [4] ČSN IEC 61000-1-2 . *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 1-2: Všeobecně - Metodika pro dosažení funkční bezpečnosti elektrického a elektronického zařízení s ohledem na elektromagnetické jevy*. Praha : ÚNMZ, 1.11.2002. 60 s.
- [5] KOVÁČ, Dobroslav; KOVÁČOVÁ, Irena; KAŇUCH, Ján. *EMC z hlediska teorie a aplikace*. Praha : BEN - technická literatura, 2006. 216 s. ISBN 8073002027.
- [6] SVAČINA, Jiří. *Elektromagnetická kompatibilita : principy a poznámky*. Brno : Vysoké učení technické, 2001 . 156 s. ISBN 8021418737.
- [7] HRUŠKA,F. *Projektování řídicích a informačních systémů*. Učební texty. 1.vyd. Zlín: UTB ve Zlíně, 2010, s.175. ISBN 9788073189792.
- [8] HRUŠKA,F. *Senzory pro systémy informatiky a automatizace*. Učební texty. 1.vyd. Zlín: UTB ve Zlíně, prosinec 2007, s.177. ISBN 9788073186302.
- [9] VACULÍKOVÁ, Polina; VACULÍK, Emil. *Elektromagnetická kompatibilita elektrotechnických systémů : Praktický průvodce techniky omezení elektromagnetického vř rušení*. Praha : Grada, 1998 . 487 s. ISBN 8071695688.
- [10] HOROVÁ, Zuzana. *Demonstrace základních vlastností šíření vln na datech umělých družic*. Praha, 2007. 105 s. Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze Matematicko-fyzikální fakulta.
- [11] KOCOUREK, Petr. *Vliv umělých elektromagnetických vln na živé organismy*. Tábor, 2006. 31 s. Absolventská práce. Střední průmyslová škola strojnická.

- [12] C. SMITH, Douglas . *Emcesd* [online]. 2010 [cit. 2011-03-21]. High Frequency Measurements Web Page . Dostupné z WWW: <<http://www.emcesd.com/tt2010/tt010110.htm>>.
- [13] SCHWAB, Adolf J. *Elektromagnetische Verträglichkeit*. Berlin : Springer Verlag, 1991. 440 s.
- [14] ARMSTRONG, Keith. *EMC Information Centre* [online]. 2001 [cit. 2011-03-21]. EMC Testing Part 2. Dostupné z WWW: <http://www.compliance-club.com/archive/old_archive/010422.htm>.
- [15] *Hensley Technologies* [online]. 2009 [cit. 2011-03-21]. Agilent N1996A CSA Spectrum Analyzer. Dostupné z WWW: <<http://www.hensleytech.com/agilent-n1996a-csa-spectrum-analyzer>>.
- [16] HABIGER , Erns. *Elektromagnetische Verträglichkeit*. Heidelberg : Hüthig Buch Verlag, 1992. 88 s. ISBN 9783341006207.
- [17] *Projekt Laboratoře integrované automatizace* [online]. 1.1.2006 [cit. 2011-04-26]. Laboratoře integrované automatizace. Dostupné z WWW: <<http://labi.fai.utb.cz>>.
- [18] *Allegro A1321* [online]. 2004 [cit. 2011-04-30]. Datasheet. Dostupné z WWW: <http://www.allegromicro.com/en/Products/Part_Numbers/1321/1321.pdf>.
- [19] *ANALOG DEVICE AD22151* [online]. 2003 [cit. 2011-04-30]. Datasheet. Dostupné z WWW: <http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD22151.pdf>.
- [20] *Gaussmeter Model 421* [online]. 2004 [cit. 2011-05-02]. Uživatelský manuál . Dostupné z WWW: <http://www.lakeshore.com/pdf_files/magnetics/421.pdf>.
- [21] *ME 3851A* [online]. 2005 [cit. 2011-05-01]. Uživatelský manuál . Dostupné z WWW: <<http://www.gigahertz-solutions.com/en/Downloads.html>>.
- [22] *Agilent 34410A* [online]. 2005 [cit. 2011-05-01]. Uživatelský manuál . Dostupné z WWW: <<http://www.htest.cz/download/34410A.pdf>>.
- [23] *Agilent DSO 6104A* [online]. 2010 [cit. 2011-05-01]. Uživatelský manuál . Dostupné z WWW: <http://www.upc.edu/pct/documents_equipment/d_296_id-772.pdf>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

EMC	Elektromagnetická kompatibilita
EMI	Elektromagnetická interference
EMS	Elektromagnetická susceptibilita
AK	Absorpční kleště
PS	Proudová sonda
ZZ	Zkoumané zařízení
MR	Měřič rušení
LISN	Umělá síť
AF	Anténní faktor
ČSN	České státní normy
CISPR	Mezinárodní poradní sbor pro rádiovou interferenci
EN	Evropská norma
EU	Evropská unie
ICE	Mezinárodní elektrotechnická komise
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
TC	Technická komise
CEN	Evropský výbor pro normalizaci
CENELEC	Evropská komise pro normalizaci v elektrotechnice
ETSI	Evropský ústav pro telekomunikační normy
ČNI	Český normalizační institut
TNK	Technická normalizační komise
SMD	Surface Mount Device
SOIC	Small Outline Integrated Circuit
DPS	Deska plošného spoje

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Základní členění problematiky EMC.	16
Obr. 2 Interferenční vlivy různých zdrojů rušení působící na zařízení.	16
<i>Obr. 3. Zařízení vystavené rušivým zdrojům a jejich ochrana před těmito rušivými vlivy, Ur – rušivé napětí.</i>	<i>17</i>
Obr. 4. Základní klasifikace interferenčních zdrojů.	18
Obr. 5. Elektromagnetická vazba: a) galvanická, b) kapacitní, c) induktivní, d) vyzařováním.	20
Obr. 6. Galvanická vazba společnou impedancí: a) v napájecím vedení, b) řídicím, c) zemnicím.[2].....	21
Obr. 7. Nežádoucí kapacitní vazba galvanicky oddělených obvodů. [16]	22
Obr. 8. Zmenšení nežádoucí kapacitní vazby oboustranným stíněním.[16].....	22
Obr. 9. Parazitní kapacitní vazba: a) vůči zemi, b) odstranění parazitní kapacity vůči zemi.[2].....	23
Obr. 10. Příklad induktivní vazby M u výstupního transformátoru.....	24
Obr. 11. Působení elektromagnetické vazby.	25
Obr. 12. Zapojení odrušovací tlumivky do vedení.	26
Obr. 13. Zapojení odrušovacího kondenzátoru do vedení.	27
Obr. 14. Mnohonásobné odrazy vznikající na stínicím bloku.	30
Obr. 15. Způsoby šíření rušivých elektromagnetických signálů.	31
Obr. 16. Způsoby měření rušení vedením a vyzařováním.[6]	32
Obr. 17. Blokové schéma pro měření rušení s umělou zátěží vedení.	33
Obr. 18. Schéma zapojení napěťové sondy.	33
Obr. 19. Konstrukce proudové sondy.[6]	34
Obr. 20. Měření rušivého proudu proudovou sondou.....	34
Obr. 21. Proudové sondy při měření rušivého proudu.[12]	35
Obr. 22. Konstrukce absorpčních kleští.[13]	35
Obr. 23. Absorpční kleště.[14].....	36
Obr. 24. Měření magnetické a elektrické složky.	37
Obr. 25. Rámová anténa.[6].....	38
Obr. 26. Symetrický půlvlnný dipól.[6].....	38

Obr. 27. Širokopásmové antény: a) bikonická anténa 30 – 300 MHz; b) logaritmicko-periodická anténa 200 – 1000 MHz; c) Složená širokopásmová anténa typu „Bilog“ pro pásmo 30 – 2000 MHz.[2]	39
Obr. 28. Soustava trychtýřových antén.[2]	39
Obr. 29. Spektrální analyzátor Agilent N1996A.[15].....	40
Obr. 30. Základní rozdělení EMS.	41
Obr. 31. Základní druhy vstupních signálů do zkoušeného zařízení.	43
Obr. 32. Logo ICE a ISO.[6]	45
Obr. 33. Logo CEN a CENELEC.[6]	46
Obr. 34. Logo ETSI.[6].....	46
Obr. 35. Logo ČSI.[6].....	47
Obr. 36. Měřené zařízení – soustava asynchronních motorů.....	50
Obr. 37. Schéma měřeného zařízení.[17]	51
Obr. 38. Skutečné hodnoty otáček a odebíraného proudu motorů M1 Combimaster – M2 Micromaster u první varianty konfigurace otáček.	52
Obr. 39. Skutečné hodnoty otáček a odebíraného proudu motorů M1 Combimaster – M2 Micromaster u druhé varianty konfigurace otáček.	54
Obr. 40. Skutečné hodnoty otáček a odebíraného proudu motorů M1 Combimaster – M2 Micromaster u třetí varianty konfigurace otáček.	55
Obr. 41. Pouzdro sondy A1321. [18].....	58
Obr. 42. Pouzdro SOIC.[19]	58
Obr. 43. Varianty zapojení AD22151, a) bipolární, b) unipolární.[19].....	59
Obr. 44. Čelní strana tříosé Hallovy sondy AD22151.	60
Obr. 45. Zadní část desek plošných spojů tříosé Hallovy sondy AD22151.	61
Obr. 46. Přední panel regulovatelného stejnosměrného napájecího zdroje Voltcraft 2256.....	61
Obr. 47. Digitální analyzátor elektrosmogu ME 3851A.[21].....	62
Obr. 48. Čelní panel Gaussmetru LakeShore 421.[20].....	63
Obr. 49. Zadní část Gaussmetru LakeShore 421.[20].....	64
Obr. 50. Axialní sonda MMA-2502-VH.[20].....	64
Obr. 51. Čelní panel multimetru Agilent 34410A.[22].....	65
Obr. 52. Zadní panel multimetru Agilent 34410A.[22].....	66
Obr. 53. Pravá část čelního panelu digitálního osciloskopu Agilent DSO 6104A.[23]	67
Obr. 54. Levá část čelního panelu digitálního osciloskopu Agilent DSO 6104A.[23].....	68

Obr. 55. Zadní panel digitálního osciloskopu Agilent DSO 6104A.[23]	68
Obr. 56. Blokové schéma měření Hallovy sondy A1321.7	70
Obr. 57. Hallova sonda bez vnějšího obalu s vyznačenými vzdálenostmi pro jednotlivé měření.	70
Obr. 58. Vnější nemagnetické pouzdro Hallovy sondy.	71
Obr. 59. Blokové schéma měření magnetického pole asynchronních motorů.	77
Obr. 60. Poloha sondy vůči měřenému asynchronnímu motoru pro komparační měření.	78
Obr. 61. Průběh klidového výstupního napětí třiosé Hallovy sondy umístěné v poloze X2, Y2, Z2.	79
Obr. 62. Průběh výstupního napětí třiosé Hallovy sondy na ose „y“ umístěné v poloze X2, Y2, Z2 u motoru M1 při nastavení otáček Combimaster 25% - Mikromaster 15%.	80
Obr. 63. Měřicí cívka se vzduchovým jádrem v ose „y“	86
Obr. 64. Rozmístění měřicích bodů kolem měřeného zařízení včetně jejich vzdáleností.	89
Obr. 65. Vzdálenosti jednotlivých bodů měření vůči měřenému zařízení.	89
Obr. 66. Vizualizace prostorového vektoru „xyz“	90
Obr. 67. Zvolené měřicí body u motoru M2 Micromaster.	109
Obr. 68. Grafické zobrazení měření v poloze X1 – X3, Y1, Z2.	125
Obr. 69. Grafické zobrazení měření v poloze X2, Y1 – Y4, Z2.	129
Obr. 70. Grafické zobrazení měření v poloze X2, Y1, Z1 – Z4.	133
Obr. 71. Grafické zobrazení měření v poloze X2, Y1, Z2.	137
Obr. 72. Obrázek 2.3. Vizualizace vektorů v rovině „xy“, „xz“, „yz“ se znázorněnými úhly „ φ “	139
Obr. 73. Velikost polárních úhlů vektoru v rovině „xz“ v bodech X1 - X3, Y1, Z1 při třech variantách nastavení otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster.	140
Obr. 74. Velikost polárních úhlů vektoru v rovině „xz“ v bodech X1 - X3, Y2, Z1 při třech variantách nastavení otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster.	141
Obr. 75. Velikost polárních úhlů vektoru v rovině „xz“ v bodech X1 - X3, Y1, Z2 při třech variantách nastavení otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster.	142
Obr. 76. Velikost polárních úhlů vektoru v rovině „xz“ v bodech X1 - X3, Y2, Z2 při třech variantách nastavení otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster.	142

- Obr. 77. Velikost polárních úhlů vektoru v rovině „ xz “ v bodech X1 - X3, Y1, Z3 při třech variantách nastavení otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster..... 144
- Obr. 78. Velikost polárních úhlů vektoru v rovině „ xz “ v bodech X1 - X3, Y2, Z3 při třech variantách nastavení otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster..... 144

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Nejvyšší přípustné hodnoty indukovaných proudů, absorbovaných výkonů a hustoty ozáření podle vyhlášky Ministerstva zdravotnictví ČR č. 480/2000 Sb. [2]	13
Tab. 2. Zavedené limity okamžitých hodnot E_{\max} a P_{\max} hygienikem ČR pro běžné obyvatelstvo.....	14
Tab. 3. Zavedené limity okamžitých hodnot E_{\max} a P_{\max} pro lékařsky kontrolovanou skupinu lidí pracující na vysokofrekvenčních zařízeních.	14
Tab. 4. Kmitočtové spektrum některých zdrojů rušení.....	20
Tab. 5. Doporučené kapacity k odrušení daných kmitočtových pásem.....	27
Tab. 6. Přehled měřících antén pro systém EMI.	36
Tab. 7. Seznam součástí měřeného zařízení.[18].....	51
Tab. 8. Vybrané parametry Hallovy sondy A1321.....	58
Tab. 9. Vybrané parametry Hallovy sondy AD22151.....	59
Tab. 10. Hodnoty použitých součástek.....	60
Tab. 11. Parametry axiální sondy.....	65
Tab. 12. Hodnoty napětí U_1 a magnetické indukce B získané při měření 1 až 3.....	71
Tab. 13. Hodnoty napětí U_1 a magnetické indukce B získané při měření 4 a 5.	72
Tab. 14. Hodnoty napětí U_1 a magnetické indukce B získané při měření 6 a 7.	72
Tab. 15. Hodnoty elektrického a magnetického pole naměřené při třech variantách konfigurace otáček.	75
Tab. 16. Naměřené hodnoty magnetické indukce sondou AD22151 a axiální sondou u motorů M1 , M2 při první konfiguraci otáček.	81
Tab. 17. Rozdíly naměřených hodnot u motorů M1 , M2 při první konfiguraci otáček.	81
Tab. 18. Naměřené hodnoty magnetické indukce sondou AD22151 a axiální sondou u motorů M1 , M2 při druhé konfiguraci otáček.	83
Tab. 19. Rozdíly naměřených hodnot u motorů M1 , M2 při druhé konfiguraci otáček.....	83
Tab. 20. Naměřené hodnoty magnetické indukce sondou AD22151 a axiální sondou u motorů M1 , M2 při třetí konfiguraci otáček.	84
Tab. 21. Rozdíly naměřených hodnot u motorů M1 , M2 při třetí konfiguraci otáček.	84
Tab. 22. Naměřené hodnoty cívky u motorů M1 , M2 při všech variantách konfigurace otáček.	86

Tab. 23. Hodnoty napětí na jednotlivých osách sondy AD22151 u motoru M1	91
Tab. 24. Hodnoty magnetické indukce u motoru M1	91
Tab. 25. Hodnoty plošných vektorů u motoru M1	91
Tab. 26. Hodnoty prostorových vektorů u motoru M1	91
Tab. 27. Hodnoty napětí na jednotlivých osách sondy AD22151 u motoru M1	92
Tab. 28. Hodnoty magnetické indukce u motoru M1	92
Tab. 29. Hodnoty plošných vektorů u motoru M1	93
Tab. 30. Hodnoty prostorových vektorů u motoru M1	93
Tab. 31. Hodnoty napětí na jednotlivých osách sondy AD22151 u motoru M1	94
Tab. 32. Hodnoty magnetické indukce u motoru M1	94
Tab. 33. Hodnoty plošných vektorů u motoru M1	94
Tab. 34. Hodnoty prostorových vektorů u motoru M1	94
Tab. 35. Hodnoty napětí na jednotlivých osách sondy AD22151 u motoru M1	95
Tab. 36. Hodnoty magnetické indukce u motoru M1	95
Tab. 37. Hodnoty plošných vektorů u motoru M1	96
Tab. 38. Hodnoty prostorových vektorů u motoru M1	96
Tab. 39. Hodnoty napětí na jednotlivých osách sondy AD22151 u motoru M1	97
Tab. 40. Hodnoty magnetické indukce u motoru M1	97
Tab. 41. Hodnoty plošných vektorů u motoru M1	97
Tab. 42. Hodnoty prostorových vektorů u motoru M1	97
Tab. 43. Hodnoty napětí na jednotlivých osách sondy AD22151 u motoru M1	98
Tab. 44. Hodnoty magnetické indukce u motoru M1	98
Tab. 45. Hodnoty plošných vektorů u motoru M1	99
Tab. 46. Hodnoty prostorových vektorů u motoru M1	99
Tab. 47. Hodnoty napětí na jednotlivých osách sondy AD22151 u motoru M1	100
Tab. 48. Hodnoty magnetické indukce u motoru M1	100
Tab. 49. Hodnoty plošných vektorů u motoru M1	100
Tab. 50. Hodnoty prostorových vektorů u motoru M1	100
Tab. 51. Hodnoty napětí na jednotlivých osách sondy AD22151 u motoru M1	101
Tab. 52. Hodnoty magnetické indukce u motoru M1	101
Tab. 53. Hodnoty plošných vektorů u motoru M1	102
Tab. 54. Hodnoty prostorových vektorů u motoru M1	102
Tab. 55. Hodnoty napětí na jednotlivých osách sondy AD22151 u motoru M1	103
Tab. 56. Hodnoty magnetické indukce u motoru M1	103

Tab. 57. Hodnoty plošných vektorů u motoru M1	103
Tab. 58. Hodnoty prostorových vektorů u motoru M1	103
Tab. 59. Hodnoty napětí na jednotlivých osách sondy AD22151 u motoru M1	104
Tab. 60. Hodnoty magnetické indukce u motoru M1	104
Tab. 61. Hodnoty plošných vektorů u motoru M1	105
Tab. 62. Hodnoty prostorových vektorů u motoru M1	105
Tab. 63. Hodnoty napětí na jednotlivých osách sondy AD22151 u motoru M1	106
Tab. 64. Hodnoty magnetické indukce u motoru M1	106
Tab. 65. Hodnoty plošných vektorů u motoru M1	106
Tab. 66. Hodnoty prostorových vektorů u motoru M1	106
Tab. 67. Hodnoty napětí na jednotlivých osách sondy AD22151 u motoru M1	107
Tab. 68. Hodnoty magnetické indukce u motoru M1	107
Tab. 69. Hodnoty plošných vektorů u motoru M1	108
Tab. 70. Hodnoty prostorových vektorů u motoru M1	108
Tab. 71. Hodnoty napětí na jednotlivých osách sondy AD22151 u motoru M2	110
Tab. 72. Hodnoty magnetické indukce u motoru M2	110
Tab. 73. Hodnoty plošných vektorů u motoru M2	110
Tab. 74. Hodnoty prostorových vektorů u motoru M2	110
Tab. 75. Hodnoty napětí na jednotlivých osách sondy AD22151 u motoru M2	111
Tab. 76. Hodnoty magnetické indukce u motoru M2	111
Tab. 77. Hodnoty plošných vektorů u motoru M2	112
Tab. 78. Hodnoty prostorových vektorů u motoru M2	112
Tab. 79. Hodnoty napětí na jednotlivých osách sondy AD22151 u motoru M2	113
Tab. 80. Hodnoty magnetické indukce u motoru M2	113
Tab. 81. Hodnoty plošných vektorů u motoru M2	113
Tab. 82. Hodnoty prostorových vektorů u motoru M2	113
Tab. 83. Hodnoty napětí na jednotlivých osách sondy AD22151 u motoru M2	114
Tab. 84. Hodnoty magnetické indukce u motoru M2	115
Tab. 85. Hodnoty plošných vektorů u motoru M2	115
Tab. 86. Hodnoty prostorových vektorů u motoru M2	115
Tab. 87. Hodnoty napětí na jednotlivých osách sondy AD22151 u motoru M2	116
Tab. 88. Hodnoty magnetické indukce u motoru M2	116
Tab. 89. Hodnoty plošných vektorů u motoru M2	117
Tab. 90. Hodnoty prostorových vektorů u motoru M2	117

Tab. 91. Hodnoty napětí na jednotlivých osách sondy AD22151 u motoru M2	118
Tab. 92. Hodnoty magnetické indukce u motoru M2	118
Tab. 93. Hodnoty plošných vektorů u motoru M2	118
Tab. 94. Hodnoty prostorových vektorů u motoru M2	118
Tab. 95. Hodnoty napětí na jednotlivých osách sondy AD22151 u motoru M2	119
Tab. 96. Hodnoty magnetické indukce u motoru M2	120
Tab. 97. Hodnoty plošných vektorů u motoru M2	120
Tab. 98. Hodnoty prostorových vektorů u motoru M2	120
Tab. 99. Hodnoty napětí na jednotlivých osách sondy AD22151 u motoru M2	121
Tab. 100. Hodnoty magnetické indukce u motoru M2	121
Tab. 101. Hodnoty plošných vektorů u motoru M2	122
Tab. 102. Hodnoty prostorových vektorů u motoru M2	122
Tab. 103. Hodnoty napětí na jednotlivých osách sondy AD22151 u motoru M2	123
Tab. 104. Hodnoty magnetické indukce u motoru M2	123
Tab. 105. Hodnoty plošných vektorů u motoru M2	123
Tab. 106. Hodnoty prostorových vektorů u motoru M2	123
Tab. 107. Hodnoty polárních úhlů v rovinách „xy“, „xz“, „yz“.....	139
Tab. 108. Hodnoty polárních úhlů v rovinách „xy“, „xz“, „yz“.....	140
Tab. 109. Hodnoty polárních úhlů v rovinách „xy“, „xz“, „yz“.....	140
Tab. 110. Hodnoty polárních úhlů v rovinách „xy“, „xz“, „yz“.....	141
Tab. 111. Hodnoty polárních úhlů v rovinách „xy“, „xz“, „yz“.....	141
Tab. 112. Hodnoty polárních úhlů v rovinách „xy“, „xz“, „yz“.....	142
Tab. 113. Hodnoty polárních úhlů v rovinách „xy“, „xz“, „yz“.....	143
Tab. 114. Hodnoty polárních úhlů v rovinách „xy“, „xz“, „yz“.....	143
Tab. 115. Hodnoty polárních úhlů v rovinách „xy“, „xz“, „yz“.....	143

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1. Závislost velikosti otáček motorů M1, M2 na čase.	53
Graf 2. Závislost odebíraného proudu motorů M1, M2 na čase.	53
Graf 3. Závislost velikosti otáček motorů M1, M2 na čase.	54
Graf 4. Závislost odebíraného proudu motorů M1, M2 na čase.	55
Graf 5. Závislost velikosti otáček motorů M1, M2 na čase.	56
Graf 6. Závislost odebíraného proudu motorů M1, M2 na čase.	56
Graf 7. Lineární závislost výstupního napětí na magnetické indukci.	73
Graf 8. Závislost velikosti magnetické indukce na úhlu natočení pouzdra sondy A1321.	73
Graf 9. Charakteristika Hallovy sondy A1321 znázorněna paprskovým grafem.	74
Graf 10. Závislost velikosti elektrického pole na konfiguraci otáček motorů.	75
Graf 11. Závislost velikosti magnetického pole na konfiguraci otáček motorů.	76
Graf 12. Velikost magnetické indukce B naměřené sondou AD22151 a axiální sondou v ose „x“, „y“, „z“ u motorů M1 , M2 při první konfiguraci otáček.	82
Graf 13. Velikost magnetické indukce B naměřené sondou AD22151 a axiální sondou v ose „x“, „y“, „z“ u motorů M1, M2 při druhé konfiguraci otáček.	83
Graf 14. Velikost magnetické indukce B naměřené sondou AD22151 a axiální sondou v ose „x“, „y“, „z“ u motorů M1, M2 při třetí konfiguraci otáček.	84
Graf 15. Závislost velikosti magnetické indukce cívky v ose „x“, „y“, „z“ u motorů M1, M2 při všech konfiguracích otáček.	86
Graf 16. Vizualizace prostorového vektoru u motoru M1 ve výškovém bodě Z 1 při první konfiguraci otáček.	92
Graf 17. Vizualizace prostorového vektoru u motoru M1 ve výškovém bodě Z 2 při první konfiguraci otáček.	93
Graf 18. Vizualizace prostorového vektoru u motoru M1 ve výškovém bodě Z 3 při první konfiguraci otáček.	95
Graf 19. Vizualizace prostorového vektoru u motoru M1 ve výškovém bodě Z 4 při první konfiguraci otáček.	96
Graf 20. Vizualizace prostorového vektoru u motoru M1 ve výškovém bodě Z 1 při druhé konfiguraci otáček.	98
Graf 21. Vizualizace prostorového vektoru u motoru M1 ve výškovém bodě Z 2 při druhé konfiguraci otáček.	99

Graf 22. Vizualizace prostorového vektoru u motoru M1 ve výškovém bodě Z 3 při druhé konfiguraci otáček.....	101
Graf 23. Vizualizace prostorového vektoru u motoru M1 ve výškovém bodě Z 4 při druhé konfiguraci otáček.....	102
Graf 24. Vizualizace prostorového vektoru u motoru M1 ve výškovém bodě Z 1 při třetí konfiguraci otáček.....	104
Graf 25. Vizualizace prostorového vektoru u motoru M1 ve výškovém bodě Z 2 při třetí konfiguraci otáček.....	105
Graf 26. Vizualizace prostorového vektoru u motoru M1 ve výškovém bodě Z 3 při třetí konfiguraci otáček.....	107
Graf 27. Vizualizace prostorového vektoru u motoru M1 ve výškovém bodě Z 4 při třetí konfiguraci otáček.....	108
Graf 28. Vizualizace prostorového vektoru u motoru M2 ve výškovém bodě Z 1 při první konfiguraci otáček.....	111
Graf 29. Vizualizace prostorového vektoru u motoru M2 ve výškovém bodě Z 2 při první konfiguraci otáček.....	112
Graf 30. Vizualizace prostorového vektoru u motoru M2 ve výškovém bodě Z 3 při první konfiguraci otáček.....	114
Graf 31. Vizualizace prostorového vektoru u motoru M2 ve výškovém bodě Z 1 při druhé konfiguraci otáček.....	116
Graf 32. Vizualizace prostorového vektoru u motoru M2 ve výškovém bodě Z 2 při druhé konfiguraci otáček.....	117
Graf 33. Vizualizace prostorového vektoru u motoru M2 ve výškovém bodě Z 3 při druhé konfiguraci otáček.....	119
Graf 34. Vizualizace prostorového vektoru u motoru M2 ve výškovém bodě Z 1 při třetí konfiguraci otáček.....	121
Graf 35. Vizualizace prostorového vektoru u motoru M2 ve výškovém bodě Z 2 při třetí konfiguraci otáček.....	122
Graf 36. Vizualizace prostorového vektoru u motoru M2 ve výškovém bodě Z 3 při třetí konfiguraci otáček.....	124
Graf 37. Velikost magnetické indukce B u motoru M1 v poloze sondy AD22151 X1 – X3, Y1, Z2 při konfiguraci otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster 25% - 15%.....	125

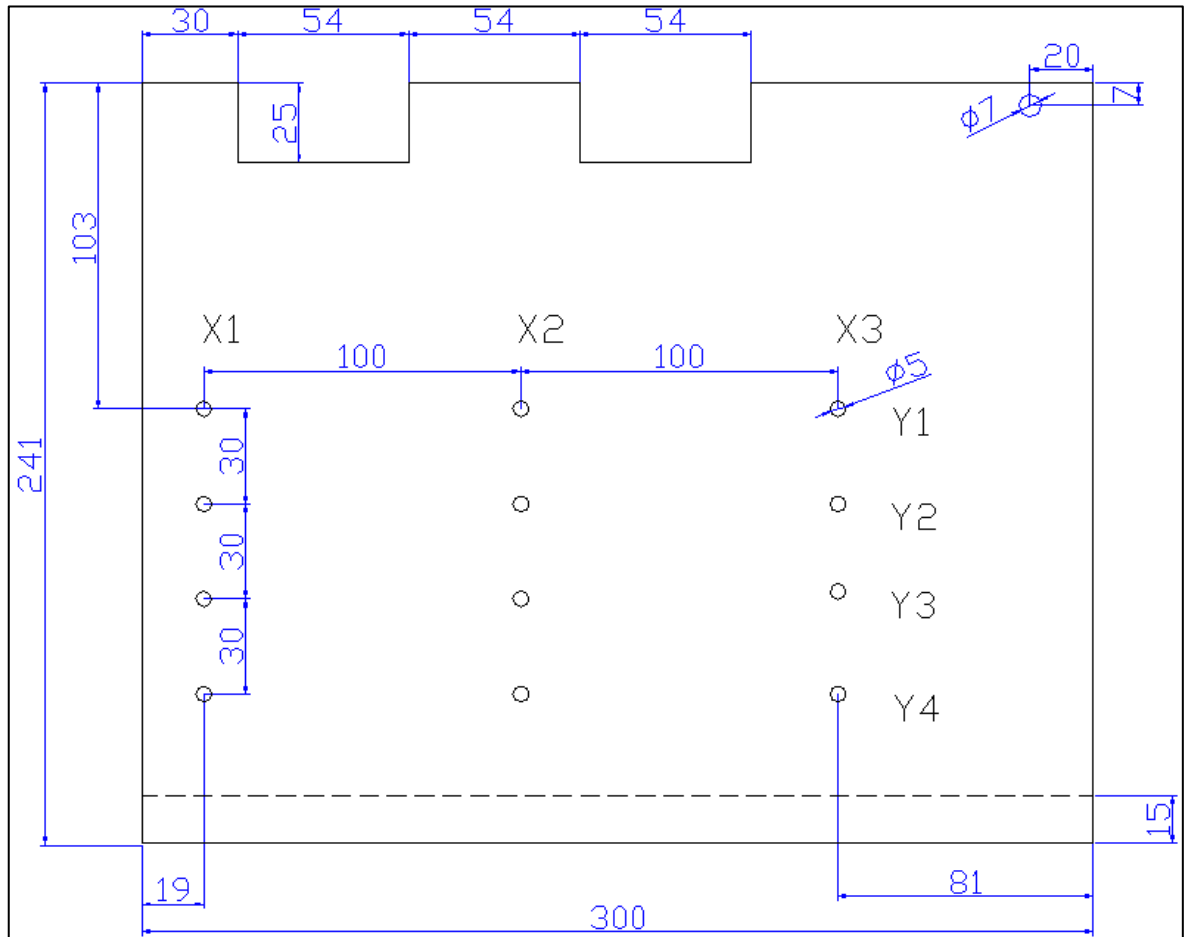
Graf 38. Velikost magnetické indukce B u motoru M2 poloze sondy AD22151 X1 – X3, Y1, Z2 při konfiguraci otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster 25% - 15%.....	126
Graf 39. Velikost magnetické indukce B u motoru M1 v poloze sondy AD22151 X1 – X3, Y1, Z2 při konfiguraci otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster 60% - 50%.....	126
Graf 40. Velikost magnetické indukce B u motoru M2 v poloze sondy AD22151 X1 – X3, Y1, Z2 při konfiguraci otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster 60% - 50%.....	127
Graf 41. Velikost magnetické indukce B u motoru M1 v poloze sondy AD22151 X1 – X3, Y1, Z2 při konfiguraci otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster 90% - 85%.....	127
Graf 42. Velikost magnetické indukce B u motoru M2 v poloze sondy AD22151 X1 – X3, Y1, Z2 při konfiguraci otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster 90% - 85%.....	128
Graf 43. Velikost magnetické indukce B u motoru M1 v poloze sondy AD22151 X2, Y1 - Y4, Z2 při konfiguraci otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster 25% - 15%.....	129
Graf 44. Velikost magnetické indukce B u motoru M2 v poloze sondy AD22151 X2, Y1 - Y4, Z2 při konfiguraci otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster 25% - 15%.....	130
Graf 45. Velikost magnetické indukce B u motoru M1 v poloze sondy AD22151 X2, Y1 - Y4, Z2 při konfiguraci otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster 60% - 50%.....	130
Graf 46. Velikost magnetické indukce B u motoru M2 v poloze sondy AD22151 X2, Y1 - Y4, Z2 při konfiguraci otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster 60% - 50%.....	131
Graf 47. Velikost magnetické indukce B u motoru M1 v poloze sondy AD22151 X2, Y1 - Y4, Z2 při konfiguraci otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster 90% - 85%.....	131
Graf 48. Velikost magnetické indukce B u motoru M2 v poloze sondy AD22151 X2, Y1 - Y4, Z2 při konfiguraci otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster 90% - 85%.....	132

Graf 49. Velikost magnetické indukce B u motoru M1 v poloze sondy AD22151 X2, Y1, Z1 – Z4 při konfiguraci otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster 25% - 15%.	133
Graf 50. Velikost magnetické indukce B u motoru M2 v poloze sondy AD22151 X2, Y1, Z1 – Z3 při konfiguraci otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster 25% - 15%.	134
Graf 51. Velikost magnetické indukce B u motoru M1 v poloze sondy AD22151 X2, Y1, Z1 – Z4 při konfiguraci otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster 60% - 50%.	134
Graf 52. Velikost magnetické indukce B u motoru M2 v poloze sondy AD22151 X2, Y1, Z1 – Z3 při konfiguraci otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster 60% - 50%.	135
Graf 53. Velikost magnetické indukce B u motoru M1 v poloze sondy AD22151 X2, Y1, Z1 – Z4 při konfiguraci otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster 90% - 85%.	135
Graf 54. Velikost magnetické indukce B u motoru M2 v poloze sondy AD22151 X2, Y1, Z1 – Z3 při konfiguraci otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster 90% - 85%.	136
Graf 55. Porovnání velikosti magnetické indukce B u motoru M1 v poloze sondy AD22151 X2, Y1, Z2 při všech variantách konfigurace otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster.	137
Graf 56. Porovnání velikosti magnetické indukce B u motoru M2 v poloze sondy AD22151 X2, Y1, Z2 při všech variantách konfigurace otáček M1 Combimaster – M2 Micromaster.	138

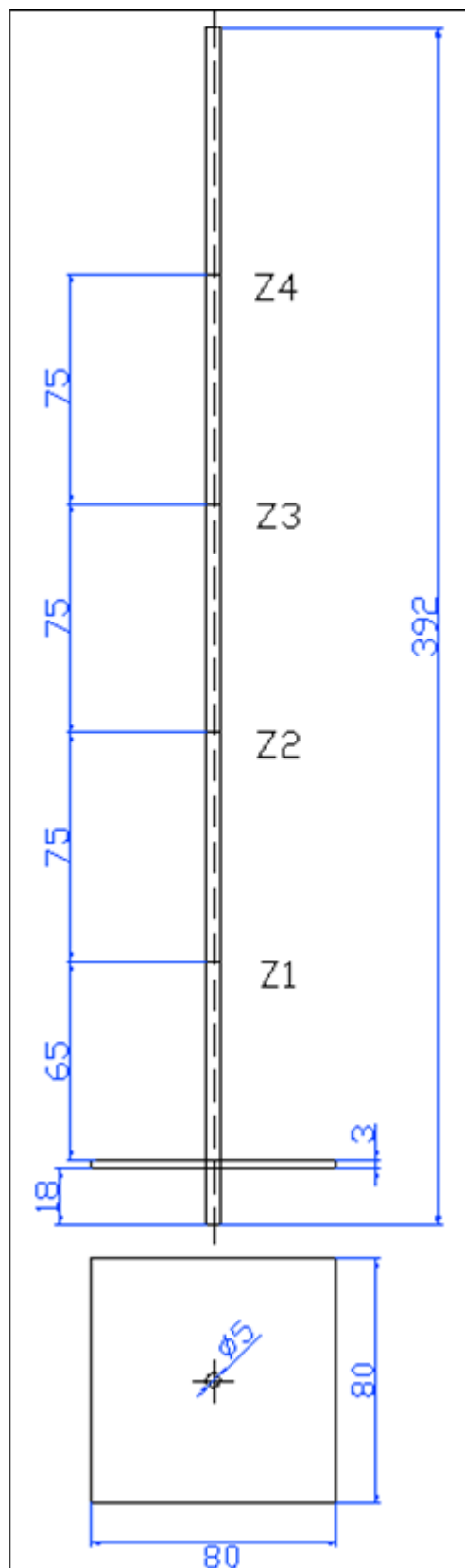
SEZNAM PŘÍLOH

- P I Konstrukční prvek - základový plech
- P II Konstrukční prvek - kovová tyč
- P III Seznam součástí včetně DPS pro AD22151
- P IV Tvar siločar magnetického pole včetně rotace pouzdra sondy A1321 v kruhovém otvoru permanentního magnetu

PŘÍLOHA P I: KONSTRUKČNÍ PRVEK - ZÁKLADOVÝ PLECH

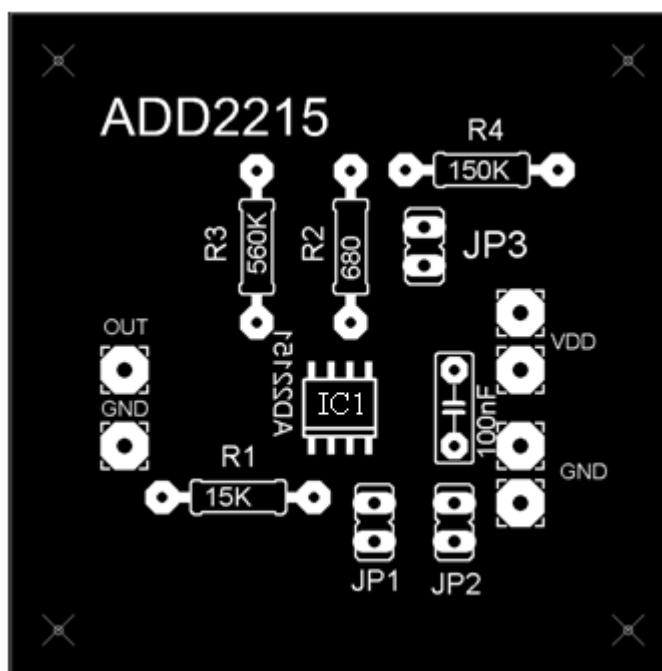
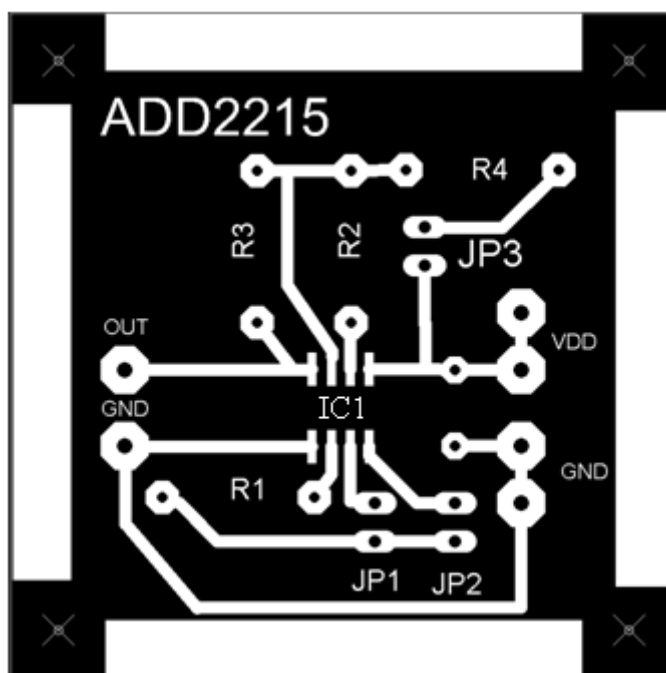


PŘÍLOHA P II: KONSTRUKČNÍ PRVEK - KOVOVÁ TYČ



PŘÍLOHA P III: SEZNAM SOUČÁSTEK VČETNĚ DPS AD22151

Klíč	Druh	Hodnota	Pouzdro
IC1	Hall sensor AD22151	-	SOIC
C1	kondenzátor	100 nF	keramické 50V
R1	rezistor	15 k Ω	500 mW
R2	rezistor	680 Ω	500 mW
R3	rezistor	560 k Ω	500 mW
R4	rezistor	561 k Ω	500 mW



**PŘÍLOHA P IV: TVAR SILOČAR MAGNETICKÉHO POLE VČETNĚ
ROTACE POUZDRA SONDY A1321 V KRUHOVÉM OTVORU
PERMANENTNÍHO MAGNETU**

