VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

DIAGNOSTIKA MALÝCH ELEKTRICKÝCH STROJŮ POMOCÍ ANALÝZY JEJICH VNĚJŠÍHO MAGNETICKÉHO POLE

DIAGNOSIS OF SMALL ELECTRICAL ENGINES THROUGH ANALYSIS OF THEIR OUTER MAGNETIC FIELD

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE — **Ing. Michal Matějásko**

AUTHOR

ŠKOLITEL — **doc. Ing. Robert Grepl, Ph.D.**

SUPERVISOR

BRNO 2022

Abstrakt

Tato disertační práce se zabývá nepříliš zkoumaným tématem *diagnostiky malých elektrických strojů pomocí analýzy jejich vnějšího magnetického pole*, skýtajícím specifické překážky dané charakterem unikajícího pole, jenž je slabé svou intenzitou s prudce se měnící orientací v malém prostoru. Konkrétně se tato práce zaměřuje na metody detekce směru rotace pro dva typy stejnosměrných strojů malých výkonů (< 0.5kW). Hlavní motivací pro zvolené téma byla pobídka z průmyslu, vycházející z potřeby řešit problém detekce směru rotace pro palivové pumpy automobilů.

V práci je představena metodika pro měření tohoto unikajícího magnetického pole, díky které lze překážky charakteru pole překonat. Další přínos této práce spočívá ve významném vylepšení již existující metody detekce směru rotace pro kartáčové motory. Podstatným přínosem této práce je rovněž představení zcela nové, doposud nepublikované metody detekce směru rotace (správnosti zapojení) elektricky komutovaných motorů. Veškerá tvrzení jsou představena pomocí měření provedených na reálných motorech, za použití dvou představených typů měřicích stanovišť.

Abstract

This thesis deals with a not much researched topic of *Diagnosis of Small Electrical Engines Through Analysis of Their Outer Magnetic Field*, that has specific obstacles given by the character of the escaping field, which is low in intensity with violently changing orientation within small space. Specifically, this thesis focuses on methods of detection of direction of rotation for two types of small power direct-current machines (< 0.5kW). The main motivation for the chosen topic was an incentive from industry, based on the need to solve the problem of detecting the direction of rotation for car fuel pumps.

The thesis presents a methodology for measuring of the escaping magnetic field, thanks to which the obstacles of the field character can be overcome. Another benefit of this thesis lies in the significant improvement of the already existing method of direction of rotation detection for brushed motors. A significant benefit of this thesis is also the introduction of a completely new, hitherto unpublished method of detecting the direction of rotation (correct connection) of electrically commutated motors. All statements are demonstrated with measurements performed on real engines, using two types of measurement stations, that are also presented.

Bibliografická citace

MATĚJÁSKO, Michal. Diagnostika malých elektrických strojů pomocí analýzy jejich vnějšího magnetického pole. Brno, 2022. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/137841. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce doc. Ing. Robert Grepl, PhD..

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracoval samostatně pod vedením školitele, s využitím vlastních znalostí nabytých nejen během studia, a že veškeré zdroje využité v této práci jsou citovány.

V Zürichu, Michal Matějásko, 2022

Poděkování

Chtěl bych poděkovat všem lidem mému srdci blízkým, kteří mi byli oporou při práci na této disertaci.
Dále děkuji panu doc. Ing. Robertu Greplovi, PhD. za nabídnutou příležitost v rámci doktorského studia, za jeho věnovaný čas a cenné postřehy. Stejně tak kolegům z mechatronické laboratoře za to, že byli super parta, a spoluvytvářeli inspirativní pracovní prostředí.
Nakonec bych rád poděkoval i svému minulému já za to, že to nevzdal a našel sílu tuto práci dorazit.

Obsah

1 Úvod **19**

2 Rešerše **21**
2.1 Unikající magnetické pole 21
2.2 Diagnostické metody založené na analýze unikajícího magnetického pole 22
2.3 Existující metoda detekce směru rotace pro DC motory 30

3 Specifikace cílů práce **35**

4 Měření unikajícího magnetického pole z opláštění malých elektrických motorů **37**
4.1 Charakteristiky pole 37
4.2 Výběr vhodného senzoru 40
4.3 Interpolace měřených dat 42
4.4 Robotické měřicí stanoviště 45
4.5 Návrh vhodného měřicího stanoviště 52
4.5.1 Požadavky na stanoviště 52
4.5.2 Mechanika stanoviště 53
4.5.3 Elektronika stanoviště 59
4.5.4 Software 61
4.6 Metodika měření 64

5 Detekce směru rotace DC motorů **67**
5.1 Unikající magnetické pole 67
5.2 Vylepšení metody detekce směru rotace 73
5.2.1 Návrh vylepšení metody 73
5.2.2 Kritéria optimálního místa pro měření 74
5.2.3 Algoritmus detekce směru rotace 75
5.2.4 Experimentální ověření 76
5.3 Výsledky měření na DC motorech 78

6 Detekce směru rotace BLDC motorů **83**
6.1 Unikající magnetické pole 83
6.2 Nová unikátní metoda detekce směru rotace (správnosti zapojení) . . 91
6.2.1 Návrh metody 91
6.2.2 Kritéria optimálního místa pro měření 92
6.2.3 Algoritmus detekce správnosti zapojení / směru rotace 94
6.2.4 Experimentální ověření 94
6.3 Výsledky měření na BLDC motorech 95

7 Závěr **101**
7.1 Přínosy disertační práce 102

8 Literatura **103**

A Seznam publikací autora **107**

Seznam obrázků

2.1 Zjednodušené schéma unikajícího magnetického pole z opláštění DC motoru. 21
2.2 Magnetické pole v okolí tří-fázového indukčního motoru se čtyřmi póly - nepoškozený a poškozený (simulační výsledky). Převzato z [5]. 23
2.3 Porovnání frekvenčních spekter zdravého motoru, a motoru s excentrickým rotorem. Lze zřetelně vidět rozdíly v amplitudách na určitých harmonických frekvencích. Převzato z [6]. 24
2.4 Porovnání měřené amplitudy v jedné z harmonických složek frekvenčního spektra motoru. Zdravý motor versus poškozený. Převzato z [7]. 25
2.5 Lissajousovy křivky porovnávající harmonie vnějšího rotujícího magnetického pole mezi zdravým motorem (vlevo) a několika typy poruch motoru (vpravo). Převzato z [8]. 26
2.6 Porovnání frekvenčního spektra v oblasti zájmu mezi zdravým motorem a poškozeným motorem – simulační výsledky. Převzato z [10]. . . 27
2.7 Simulační výsledky porovnávající vliv statorového proudu na vnější magnetické pole synchronního motoru s permanentními magnety. Převzato z [13]. 28
2.8 Porovnání frekvenčního spektra zdravého a poškozeného motoru. Převzato z [14]. 29
2.9 Průmyslový senzor DRH 090 od firmy *Process Control Electronic GmbH* pro detekci směru rotace DC motorů. Převzato z webu firmy [17]. 30
2.10 Prudké změny rozdílového magnetického pole (výřez) v oblasti mezery mezi statorovými magnety jednoho z měřených motorů pro rotaci oběma směry (*přímý pohled*). 31
2.11 Prudké změny rozdílového magnetického pole (výřez) v oblasti mezery mezi statorovými magnety jednoho z měřených motorů pro rotaci oběma směry (*isometrický pohled*). 32

2.12 Intenzita rozdílového magnetického pole, pro uvedenou metodu, okolo celého obvodu měřeného motoru (data získána měřením stejného motoru jako v kapitole 5). 33

4.1 Výřez ve změřeném unikajícím magnetickém poli v blízkosti pláště měřeného DC motoru, pro dva směry rotace. 38
4.2 Intenzita měřeného unikajícího magnetického pole v blízkosti měřeného DC motoru při průtoku proudu 1.2A ve vzdálenosti 2mm od těla motoru (*interpolovaná data*), pro oba směry rotace. 38
4.3 Výřez vypočteného pole z rozdílu polí mezi oběma směry rotace v okolí DC motoru. 39
4.4 Blokové schéma integrovaného senzoru MLX90393 od firmy Melexis (převzato z [19]). 41
4.5 Příklad lineární interpolace (červené vektory) pole, ve srovnání s přímo měřeným polem (modré vektory) v místě prudkých změn. . . . 44
4.6 Blokové schéma měřicího stanoviště s manipulátorem UR10e. 46
4.7 Deska plošných spojů se senzory pro robotické stanoviště. 47
4.8 Lokální souřadné systémy kinematiky robotického manipulátoru UR10e. Převzato z [26]. 49
4.9 Orientace souřadného systému senzorů vzhledem k souřadnému systému měřeného motoru (uprostřed, plnou čarou). 50
4.10 Robotické stanoviště během měření DC motoru. 52
4.11 Výkres základní desky stanoviště. 54
4.12 Výkres rotační platformy s montážními děrami pro uchycení měřených motorů. 54
4.13 Tištěná spojka krokového motoru s rotačním podstavcem pro úchyt měřených motorů. *Vlevo*: s uloženou platformou, *vpravo* - bez platformy. 55
4.14 Valivé ložisko s tištěným úchytem pro uložení rotační platformy. . . . 56
4.15 Tištěný držák pro DPS se senzory umístěný na čele lineárního posuvu. 56
4.16 Detail tištěného ozubeného spojení krokového motoru s lineárním posuvem, přes ozubení umístěné do drážky posuvu. 56
4.17 Držák vozíku lineárního posuvu a poháněj ící krokový motor. 57
4.18 Foto celé měřicí stanice. 58
4.19 Foto senzorické desky osazené 12-ti senzory magnetické indukce a jedním senzorem vzdálenosti. 59
4.20 Foto řídicí desky. 60
4.21 Schéma součástí firmwaru v mikrokontroléru. 61
4.22 Schéma souřadného systému senzorů a souřadného systému motoru umístěném na rotační podložce. 63

5.1 Vektory magnetické indukce v okolí měřeného DC motoru. Řezy rovinou, poloměr 22mm, směr 1. 68

5.2 Vektory magnetické indukce v okolí měřeného DC motoru. Řezy rovinou, poloměr 22mm, směr 2. 68
5.3 Vektory magnetické indukce v okolí měřeného DC motoru. Řezy rovinou, poloměr 32mm, směr 1. 69
5.4 Vektory magnetické indukce v okolí měřeného DC motoru. Řezy rovinou, poloměr 22mm, rozdílové pole. 70
5.5 Vektory magnetické indukce v okolí měřeného DC motoru. Řez ve výšce y = 30mm, poloměr 22mm, rozdílové pole, izometrický pohled. 71
5.6 Rozdílové pole v okolí měřeného DC motoru. Poloměr 22mm, izometrický pohled. 72
5.7 Velikost vektorů rozdílového pole v okolí motoru na poloměru 22mm. 74
5.8 Úspěšnost aplikace *původního* algoritmu detekce směru rotace v celém okolí měřeného DC motoru. 76
5.9 Úspěšnost aplikace *vylepšeného* algoritmu detekce směru rotace v celém okolí měřeného DC motoru. 77
5.10 Foto motoru během měření. 78
5.11 Vektory magnetické indukce v okolí měřeného motoru. Řezy rovinou, poloměr 40mm, směr 1. 78
5.12 Vektory magnetické indukce v okolí měřeného DC motoru. Řezy rovinou, poloměr 40mm, rozdílové pole. 79
5.13 Velikost vektorů rozdílového pole v okolí motoru na poloměru 40mm. 79
5.14 Foto motoru během měření. 80
5.15 Vektory magnetické indukce v okolí měřeného motoru. Řezy rovinou, poloměr 40mm, směr 1. 80
5.16 Vektory magnetické indukce v okolí měřeného DC motoru. Řezy rovinou, poloměr 40mm, rozdílové pole. 81
5.17 Velikost vektorů rozdílového pole v okolí motoru na poloměru 40mm. 81
5.18 Měřená kartáčová DC pumpa pro palivové, nádržové moduly. 82

6.1 Rozdílové magnetické pole v okolí BLDC motoru při sepnutí UV svorek, řezy rovinou. 84
6.2 Rozdílové magnetické pole v okolí BLDC motoru při sepnutí VW svorek, řezy rovinou. 84
6.3 Rozdílové magnetické pole v okolí BLDC motoru při sepnutí WU svorek, řezy rovinou. 85
6.4 Rozdílové magnetické pole v okolí BLDC motoru při sepnutí VU svorek, řezy rovinou. 86
6.5 Rozdílové magnetické pole v okolí BLDC motoru při sepnutí WV svorek, řezy rovinou. 86
6.6 Rozdílové magnetické pole v okolí BLDC motoru při sepnutí UW svorek, řezy rovinou. 87

6.7 Součtové magnetické pole v okolí BLDC motoru získané vektorovým součtem jednotlivých rozdílových polí. Řezy rovinou, *správné zapojení*. 88
6.8 Součtové magnetické pole v okolí BLDC motoru získané vektorovým součtem jednotlivých rozdílových polí. Řezy rovinou, *nesprávné zapojení*. 88
6.9 Součtové magnetické pole v okolí BLDC motoru získané vektorovým součtem jednotlivých rozdílových polí. Plná obálka v konstantní vzdálenosti, izometrický pohled, *správné zapojení*. 89
6.10 Součtové magnetické pole v okolí BLDC motoru získané vektorovým součtem jednotlivých rozdílových polí. Plná obálka v konstantní vzdálenosti, izometrický pohled, *nesprávné zapojení*. 90
6.11 Velikost úhlů mezi součtovými vektory polí pro *správně* a *nesprávně* zapojený motor. 93
6.12 Velikost intenzity součtového pole *správně* zapojeného motoru. 93
6.13 Úspěšnost aplikace algoritmu detekce směru rotace (správnosti zapojení) v celém okolí měřeného BLDC motoru. 94
6.14 Foto motoru během měření. 95
6.15 Součtové magnetické pole v okolí měřeného motoru získané vektorovým součtem jednotlivých rozdílových polí. Řezy rovinou, *správné zapojení*. 95
6.16 Součtové magnetické pole v okolí měřeného motoru získané vektorovým součtem jednotlivých rozdílových polí. Řezy rovinou, *nesprávné zapojení*. 96
6.17 Velikost úhlů mezi součtovými vektory polí pro *správně* a *nesprávně* zapojený motor. 96
6.18 Velikost intenzity součtového pole *správně* zapojeného motoru. 97
6.19 Foto motoru během měření. 97
6.20 Součtové magnetické pole v okolí měřeného motoru získané vektorovým součtem jednotlivých rozdílových polí. Řezy rovinou, *správné zapojení*. 98
6.21 Součtové magnetické pole v okolí měřeného motoru získané vektorovým součtem jednotlivých rozdílových polí. Řezy rovinou, *nesprávné zapojení*. 98
6.22 Velikost úhlů mezi součtovými vektory polí pro *správně* a *nesprávně* zapojený motor. 99
6.23 Velikost intenzity součtového pole *správně* zapojeného motoru. 99
6.24 Měřená kartáčová BLDC pumpa pro palivové, nádržové moduly. . . . 100

Seznam tabulek

4.1 DH parametry robotického manipulátoru UR10e. Volně převzato ze stránek výrobce [27]. 49

1 Úvod

Diagnostika elektrických strojů hraje důležitou roli jak ve výrobním procesu tak během jejich provozu, a v posledních letech nabývá na důležitosti rovněž v oboru prediktivní údržby. Ve všech případech je jednou z hlavních motivací finanční stránka věci. Vznikne-li problém na výrobní lince, může dojít k produkci defektních výrobků, zpoždění výroby a případně vzniku prodlev ve výrobním taktu, a nebo může být narušeno plánování a plnění nasmlouvaných dodávek. Obdobným způsobem lze uvažovat také při problémech s elektrickými stroji vzniklých při jejich provozu. Je tedy zřejmé, že o metody, které umožní podobným ekonomickým ztrátám předcházet nebo je efektivně řešit, bude v průmyslu i vědě zájem.

Zejména z důvodů finanční náročnosti diagnostiky a opravy, v porovnání s prostou výměnou porouchaného elektrického stroje, byla v minulosti pozornost upřena zejména na elektrické stroje vyšších výkonů (kW, MW). Tomu odpovídaly používané technologie a postupy zaměřené na problémy typické pro tuto kategorii strojů. S postupem vývoje technologií, miniaturizace, zlevňování komponent ale také zvyšování výkonu procesorových jader, přichází problematika diagnostiky elektrických strojů také ke strojům nižších výkonů (W). Motivovány stejnými ekonomickými důvody jako předchozí zmíněná kategorie strojů, dostávají se metody diagnostiky a problémy spojené s touto kategorií do popředí zájmu průmyslové i vědecké komunity.

V závislosti na typu elektrického stroje je část problémů, které se u el. strojů vyskytují stejná jako u strojů vyšších výkonů, avšak některé problémy jsou pro stroje nižších výkonů unikátní. Určitá specifika vycházejí z typu konstrukce konkrétního elektrického stoje (stroje napájené stejnosměrným napětím se v kategorii vyšších výkonů v podstatě nevyskytují), jiná jsou spojena například s jejich menšími rozměry.

Tato práce představuje na konkrétních měřených datech některé fenomény spojené s diagnostikou elektrických strojů nižších výkonů a zaměřuje se na specifický problém *detekce směru rotace z unikajícího magnetického pole vně opláštění stroje*. Práce přináší vhled do podoby unikajícího magnetického pole pro dva typy stejnosměrných elektrických strojů a to stejnosměrného kartáčového stroje (dále označovaný jako DC motor) a stejnosměrného bezkartáčového, elektronicky komutovaného stroje (dále označovaný jako BLDC motor).

Pro DC motor tato práce představuje vylepšení již existující metody detekce směru rotace z unikajícího magnetického pole. Pro BLDC motor potom představuje metodu zcela unikátní, zatím ve vědecké komunitě nepředstavenou. V obou případech hraje důležitou roli nalezení vhodného místa pro měření, ve kterém lze představené metody úspěšně aplikovat.

Dále jsou představena dvě měřicí stanoviště, pomocí nichž byla v průběhu zpracování práce data získávána. První představené robotické stanoviště, které bylo použito pro získání dat a poznatků později publikovaných ve článku v časopise, mělo z hlediska vhodnosti využití pro potřebná měření určité nedostatky. Tyto byly odstraněny návrhem stanoviště vhodného, které poté posloužilo k získání výsledků prezentovaných v této práci.

Na základě získaných poznatků jsou diskutovány obtíže spojené s měřením a interpretací unikajícího magnetického pole, a je představena metodika pro tato měření, která usnadňuje aplikaci diagnostických metod pro, v této práci zkoumané, stejnosměrně napájené elektrické stroje nižších výkonů.

2 Rešerše

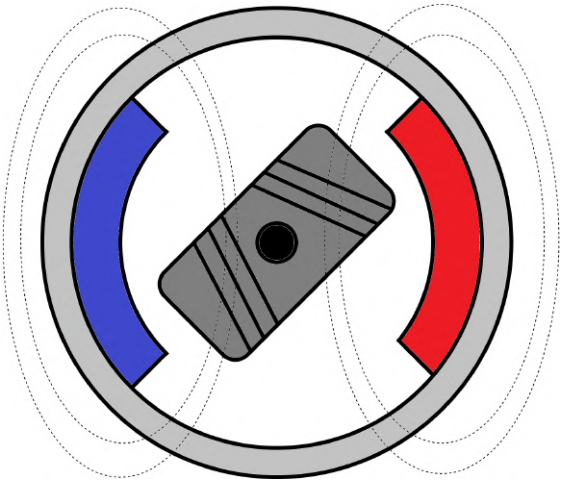
2.1 Unikající magnetické pole

Jako *unikající magnetické pole* (anglicky: *Stray Magnetic Field*) v souvislosti s elektrickými stroji označujeme magnetické pole, které uniká uzavření uvnitř jejich opláštění. Jedná se o nechtěný efekt způsobený mechanickými charakteristikami konstrukce těchto strojů, kterému nelze zcela předejít, avšak je možné a žádoucí jej v maximální možné míře omezit.

Toto magnetické pole lze zjednodušeně popsat jako

$$\mathbf{B}_t(p) = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}(p) \tag{2.1}$$

kde $\mathbf{B}_t(p)$ je celkový vektor magnetické indukce v daném bodě p, $\mathbf{B}_0$ je magnetické indukce pozadí, ať už se jedná o magnetické pole Země nebo jiné vlivy okolního prostředí, a $\mathbf{B}(p)$ je funkce pole permanentních magnetů přítomných v motoru a pole indukovaného protékajícím proudem cívkami elektrického stroje. Na obrázku 2.1 lze vidět schématické znázornění právě takového unikajícího magnetického pole.



Obrázek 2.1: Zjednodušené schéma unikajícího magnetického pole z opláštění DC motoru.

Tohoto nechtěného efektu lze pro potřeby diagnostiky elektrických strojů využít. Jak bude dále ukázáno, lze z unikajícího magnetického pole zjistit relativně hodně informací o vnitřním stavu zkoumaného stroje. Mezi hlavní výzvy pro všechny diagnostické metody založené na analýze unikajícího magnetického pole patří jeho slabá intenzita (zejména u strojů nižších výkonů) a místy lokálně prudké změny v orientaci pole.

2.2 Diagnostické metody založené na analýze unikajícího magnetického pole

Existující diagnostické metody elektrických strojů, které principiálně využívají jejich unikající magnetické pole, mohou být rozděleny do třech základních podskupin: metody založené na matematickém modelu (anglicky *model-based methods*), metody založené na znalosti dat (anglicky *data-driven methods*) a metody analytické.

Metody založené na matematickém modelu (popisu) magnetického pole fungují na základě dynamických rovnic systému, které předpovídají jeho chování v čase a porovnávají tuto předpověď s měřenými daty. Oproti tomu metody založené na znalosti dat porovnávají měřená data s daty měřenými dříve, která jsou známa pro reprezentaci určitých správných nebo chybových stavů pro daný typ diagnostikovaného elektrického stroje. Analytické metody obvykle využívají určitých fyzikálních fenoménů, jimiž jsou např. změny ve frekvenčním spektru magnetického pole, přechody přes nulové hodnoty, četnosti výskytu, atp.

Mezi nejčastější problémy, které se pomocí diagnostiky unikajícího magnetického pole v současné době diagnostikují, patří:

- Poškozené vinutí [5][6][10][11][14]
- Excentricita [5][6][9]
- Zátěž [7][12]
- Nerovnováhy [8]
- Detekce pozice rotoru [13]

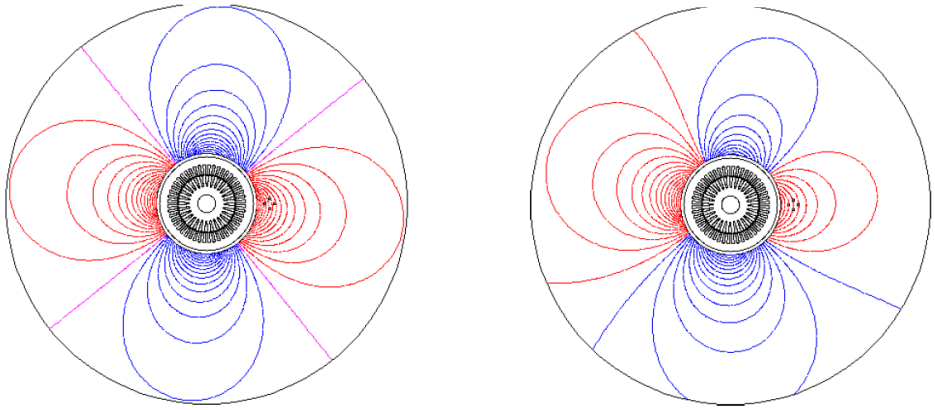
Následuje přehled publikací zabývajících se diagnostikou elektrických strojů z unikajícího magnetického pole.

Advances in Diagnosis of Electrical Machines Through External Magnetic Field [5]

V tomto článku autoři představují přehled několika různých metod měření unikající magnetické indukce a diskutují, jakým způsobem se na ní určité typy poruch projeví. Problematice se věnuje v oblasti třífázových motorů vyšších výkonů (kW). Nejprve se autoři věnují výběru vhodných senzorů a jejich umístění vzhledem k měřenému motoru. Z hlediska výběru typu senzorů autoři uvádí, že nejčastěji používanými jsou Hallova sonda, magneto-rezistivní senzory a nebo jednoduchá snímací cívka.

Pro diagnostické metody založené na analýze frekvenčního spektra unikajícího magnetického pole se obvykle volí právě snímací cívka, která má oproti zbývajícím dvěma zmíněným typům senzorů vysokou frekvenční propustnost. Na praktickém příkladu uvedeném v článku je právě tento typ senzoru použit.

V článku je ukázáno, že dopady částečně zkratovaného vinutí na podobu unikajícího magnetického pole jsou výrazně větší, než je pozorovatelné z měření elektrického proudu tekoucím zkoumaným motorem. Svá zjištění autoři nadále podporují za pomoci výpočtové analýzy metodou konečných prvků. Pro některé typy poruch jsou vypočtené změny v unikající magnetické indukci prezentovány jako na obrázku 2.2 níže.

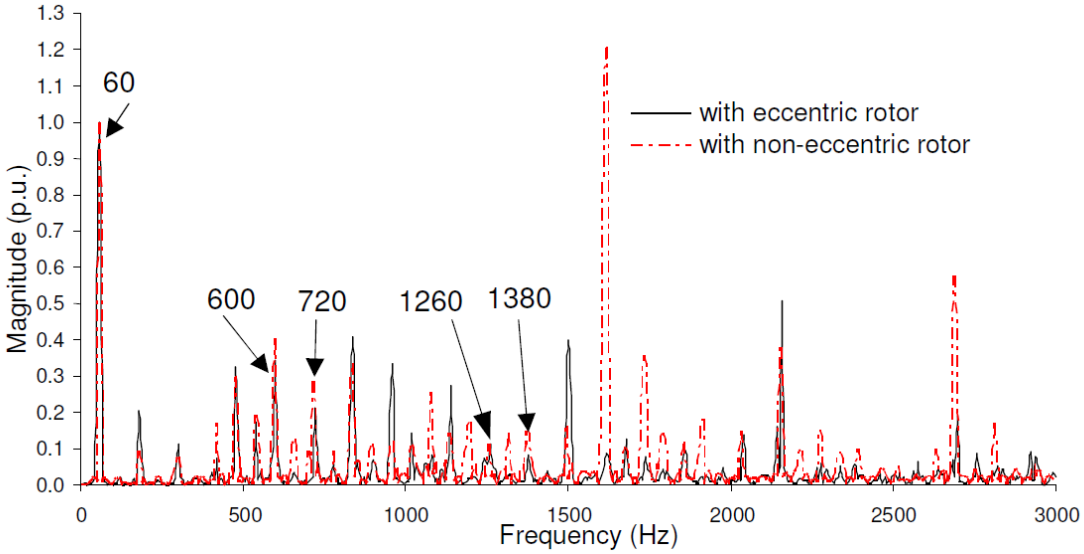


Obrázek 2.2: Magnetické pole v okolí tří-fázového indukčního motoru se čtyřmi póly - nepoškozený a poškozený (simulační výsledky). Převzato z [5].

Detection and Analysis of Rotor Faults in Induction Motors by the Measurement of the Stray Magnetic Fluxasdasd [6]

Podobně jako v publikaci předchozí, i zde se autoři zabývají třífázovými motory vyšších výkonů. Rovněž používají metodu analýzy frekvenčního spektra magnetického pole, s užitím snímací cívky jako senzoru.

Článek se soustřeďuje na analýzu vlivu excentricity a představuje také experimentální výsledky projevů poškozených žeber vinutí u indukčních motorů. Autoři prozkoumávají různé harmonické frekvence ve frekvenčním spektru magnetického pole a porovnávají výsledky simulační analýzy s výsledky reálného experimentu. Závěry ukazují, ze provedené analýzy a experimenty potvrzují výsledky jiných studií a lze tedy provádět detekci představených poruch, pro zkoumaný typ elektrického stroje, z unikajícího magnetického pole. Porovnání frekvenčních spekter unikajících magnetických polí pro motor zdravý a s excentrickým rotorem lze vidět na obrázku 2.3 níže.

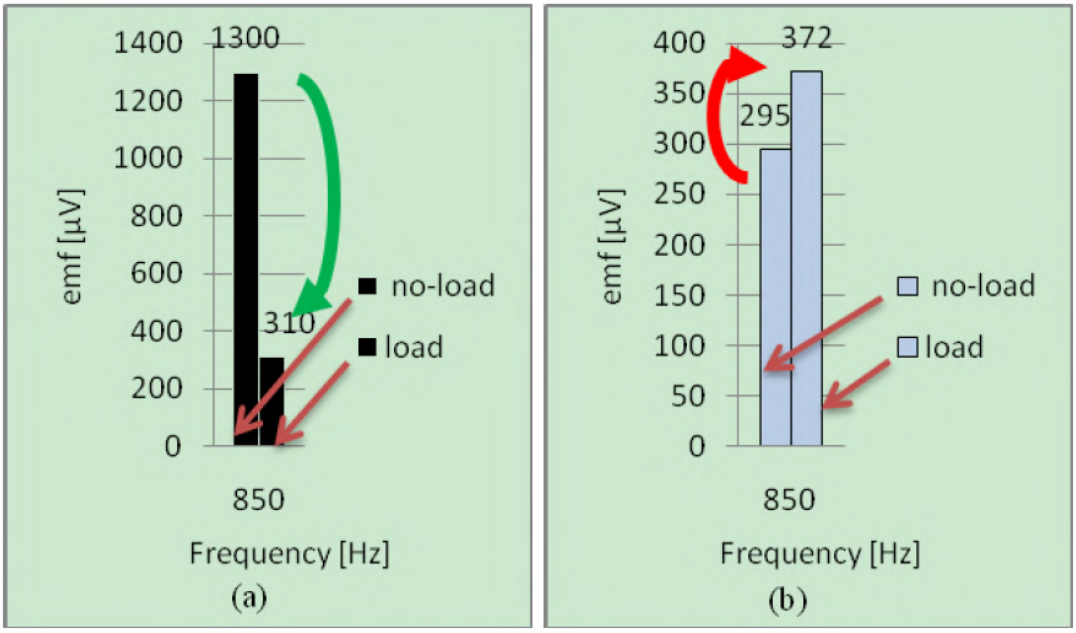


Obrázek 2.3: Porovnání frekvenčních spekter zdravého motoru, a motoru s excentrickým rotorem. Lze zřetelně vidět rozdíly v amplitudách na určitých harmonických frekvencích. Převzato z [6].

An Online Universal Diagnosis Procedure Using Two External Flux Sensors Applied to the AC Electrical Rotating Machines [7]

V této publikaci autoři prezentují výsledky diagnostiky magnetického pole třífázového elektrického stroje vyššího výkonu. Zajímavostí je metoda, kterou autoři představují, jež využívá dva protilehlé senzory. Dle tvrzení autorů přináší využití dvou protilehlých senzorů tu výhodu, že není potřeba znát tzv. "obraz zdravého motoru"pro potřeby diagnostiky stroje – což mnoho jiných metod vyžaduje.

Také v tomto článku autoři provádí frekvenční analýzu magnetického spektra a porovnávají naměřená data pro motor nezatížený s motorem zatíženým. Z představených výsledků vyplývá, že v určitých harmonických frekvencích dochází u nepoškozeného motoru k poklesu amplitudy mezi nezatíženým a zatíženým stavem. U motoru trpícím zkoumanou poruchou tomu bude naopak - amplituda v dané frekvenci vzroste. Jeden s výsledků prezentovaných v článku lze vidět na obrázku 2.4 níže. Jedná se tak o robustní a velice jednoduchou metodu diagnostiky.



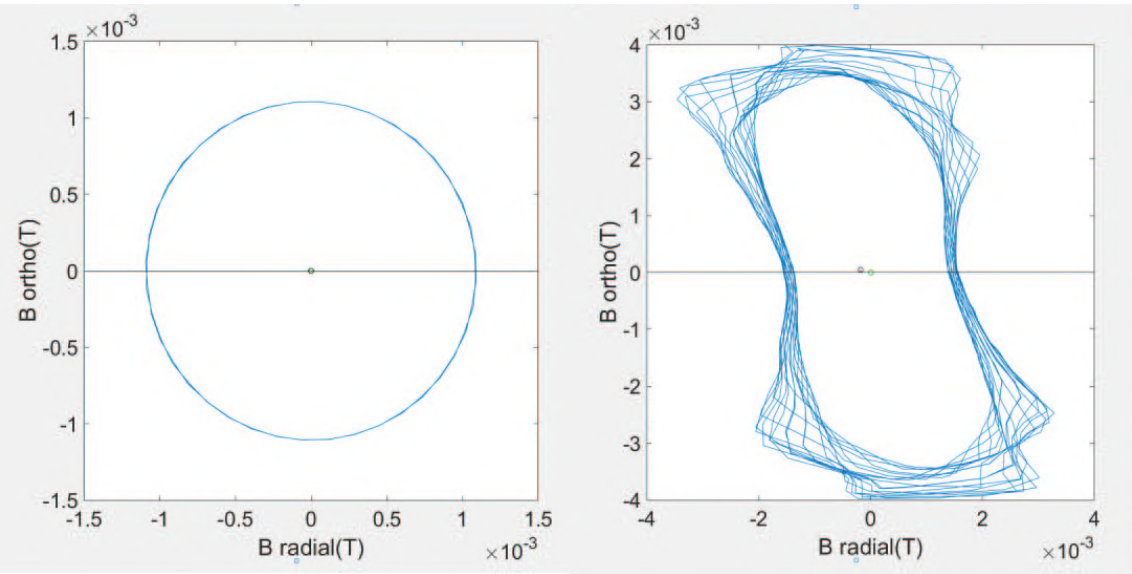
Obrázek 2.4: Porovnání měřené amplitudy v jedné z harmonických složek frekvenčního spektra motoru. Zdravý motor versus poškozený. Převzato z [7].

Stray Magnetic Field Analysis Applied to the Internal Unbalances Diagnosis of Low Power Single Phase Induction Motor [8]

Publikace se zabývá diagnostikou široce rozšířeného jednofázového indukčního motoru. Jedná se o motor s kondenzátorem mezi hlavním a pomocným vinutím, napájený z klasické distribuční sítě, čili 230V/50Hz, o výkonu 90W. Lze tedy říci, že motor svými parametry spadá do kategorie elektrických strojů nižších výkonů.

I zde autoři využívají analýzy magnetického frekvenčního spektra, avšak díky mechanické konstrukci motoru (poměrně dlouhý k průměru těla) mohou zanedbat axiální složku magnetické indukce ve středu těla motoru, což je místo kam umístili senzory. Sledována jsou tedy pouze složky radiální a tangenciální, které jsou následně vyneseny do tzv. Lissajuových křivek (viz obrázek 2.5 níže).

Pomocí této relativně jednoduché vizualizační metody autoři představují snadno pochopitelnou reprezentaci dějů ve vnějším magnetickém poli měřeného motoru. Ukazuje se, že rozdíl mezi zdravým motorem a motorem s poruchou je tak snadno a rychle rozeznatelný.



Obrázek 2.5: Lissajousovy křivky porovnávající harmonie vnějšího rotujícího magnetického pole mezi zdravým motorem (vlevo) a několika typy poruch motoru (vpravo). Převzato z [8].

Using the surrounding magnetic field in diagnosis of the BLDC motor [9]

V tomto článku se autoři zabývají diagnostikou elektricky komutovaného, stejnosměrně napájeného motoru (BLDC). Nejprve je představen elektrický model motoru a poté model magnetický. Věrohodnost magnetického modelu je dokazována porovnáním s výsledky FEM simulace. Experimentální dokazování je provedeno na 1kW motoru, na němž jsou testovány různé typy poruch.

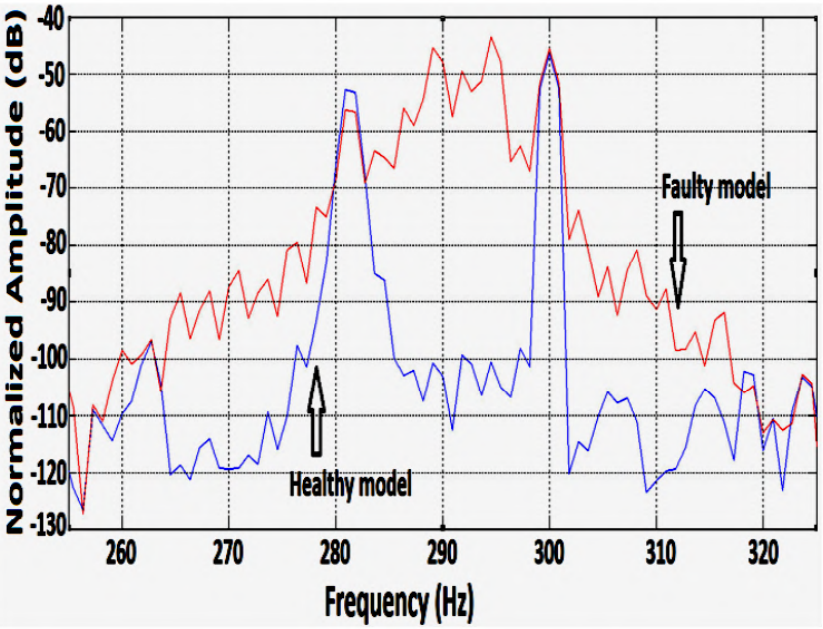
Z představených výsledků vyplývá, že ve frekvenčním spektru dominují liché harmonické frekvence vynásobené počtem pólů. Tím byly potvrzeny výsledky ze simulačních modelů, kde se jednotlivé poruchy projevily jak do kvazi-statického magnetického pole, tak také do pole dynamického, při plné rychlosti rotace motoru.

The Influence of the Broken Bar Fault on the Magnetic Field and Electromagnetic Torque in 3-phase Induction Motors [10]

Článek se zabývá vlivem poruchy poškozeného žebrového vinutí na klasickém asynchronním motoru. Stejně jako v předchozích článcích i zde je využita metoda analýzy magnetického frekvenčního spektra. Autoři se konkrétně zaměřují na vliv zmíněného poškození na elektromagnetický točivý moment motoru.

Na výsledcích se ukazuje, že nejviditelnější důkaz přítomnosti poškození lze vidět ve frekvenčním spektru kolem 300Hz. Toto zjištění vyplývá z faktu, že poškozené vinutí přímo ovlivní výkon a rychlost motoru. Výsledky simulací jsou

ve článku srovnány s výsledky experimentálně ověřenými, jak lze vidět z obrázku 2.6 níže.



Obrázek 2.6: Porovnání frekvenčního spektra v oblasti zájmu mezi zdravým motorem a poškozeným motorem – simulační výsledky. Převzato z [10].

Unambiguous Detection of Broken Bars in Asynchronous Motors by Means of a Flux Measurement-Based Procedure [11]

Autoři publikace představují novou metodu diagnostiky, pomocí které lze analyzovat testovaný asynchronní motor i při dynamických změnách zatížení a změnách frekvence napájení. Tato metoda přináší významné vylepšení oproti dříve představeným metodám. Diagnostika je experimentálně provedena na asynchronním stoji o výkonu 11kW.

Představená metoda se soustřeďuje na analýzu magnetické indukce spojené s jedním "zubem"vinutí statoru. Autoři zde používají velice jednoduchého přístupu v podobě pozorování času mezi po sobě jdoucími přechody emitované magnetické indukce přes nulu. Ty se dějí ve chvílích změny polarity / směru. Rozdíl mezi zdravým a poškozeným motorem lze poté rozpoznat ze změn v pravidelnosti těchto přechodů.

Non-invasive load monitoring of induction motor drives using magnetic flux sensors [12]

Tato publikace představuje diagnostickou metodu, zabývající se odhadem točivého momentu asynchronního elektrického stroje. Jde o studii podobnou těm, které již

byly v této práci představeny dříve, zabývající se asynchronními stroji vyšších výkonů Avšak v této studii autoři využívají tzv. GMR senzory, neboli senzory, s velkou magnetickou rezistivitou.

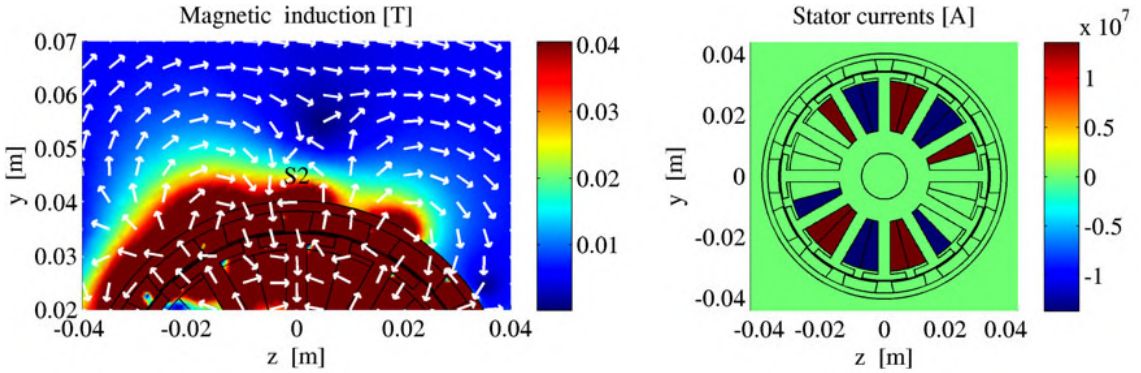
Nejdříve je stanoveno vhodné místo pro měření za pomoci FEM simulace, a výsledky jsou následně ověřeny experimentálně na třech různých typech motorů. Jsou zkoumány jak ustálené tak přechodově stavy strojů. Závěry tohoto článku v podstatě potvrzují závěry předchozích studií založených na stejném principu, a to analýzy odezvy ve frekvenčním spektru.

Magnetic stray field based position detection in BLDC outer rotor permanent magnet synchronous machines [13]

Tento článek se zabývá využitím unikajícího magnetického pole k určení polohy rotoru pro BLDC motor. Autoři článku kladou důraz na stanovení nejvhodnějšího místa pro umístění senzorů. To je docíleno provedením 2D a 3D simulačních analýz magnetických modelů pro zkoumaný motor.

Nadále jsou zkoumány vlivy tloušťky opláštění a statorových proudů na měřená data. Z výsledků vyplývá, že tloušťka pláště ovlivňuje amplitudu a statorové proudy fázově posouvají měřené vektory magnetické indukce. Zmíněny jsou také vlivy orientace senzorů, nebo teplota měřeného motoru na výslednou kvalitu dat.

Prezentované výsledky dokazují, že lze s relativně malou ztrátou spolehlivosti využít vnějšího pole ke komutaci motoru, a to i u strojů nižších výkonů. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při umístění senzorů přímo na opláštění motoru. Ovšem je potřeba dbát na přesné umístění senzorů o 120° elektrických od sebe. Vzhledem k malým rozměrům motoru se siločáry magnetické indukce silně zakřivují na relativně malém prostoru, jak lze vidět i z FEM simulace na obrázku 2.7 níže.

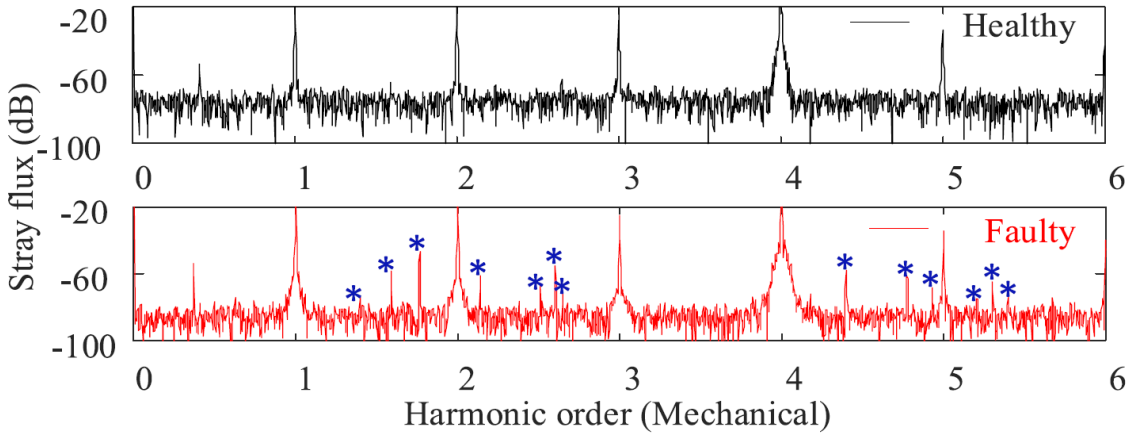


Obrázek 2.7: Simulační výsledky porovnávající vliv statorového proudu na vnější magnetické pole synchronního motoru s permanentními magnety. Převzato z [13].

Effect of Magnets Asymmetry on Stray Magnetic Flux Based Bearing Damage Detection in PMSM [14]

Autoři článku se zaměřují na detekci poškozeného vinutí u motorů s permanentními magnety, avšak posunují problematiku dále a sledují, jaký vliv na kvalitu diagnostiky mají asymetrie permanentních magnetů. V článku jsou podrobeny experimentu dva typy konstrukce motorů, jeden s permanentními magnety na povrchu těla (*surface mounted permanent magnet synchronous motor*) a druhý s magnety uvnitř konstrukce (*interior permanent magnet motor*). Oba motory spadají výkonově do kategorie nižších výkonů, tedy méně něž 1kW.

V experimentu je magnetické pole motorů měřeno pomocí integrovaného obvodu *fluxgate* senzoru, což je obdoba snímací cívky s permeabilním jádrem, které jsou připevněny k jejich tělu. Autoři opět využívají analýzy frekvenčního spektra a porovnávají motory při různých stavech provozu (zatížený, nezatížený, atd.). Dosažené experimentální výsledky dále porovnávají s výsledky simulačními.



Obrázek 2.8: Porovnání frekvenčního spektra zdravého a poškozeného motoru. Převzato z [14].

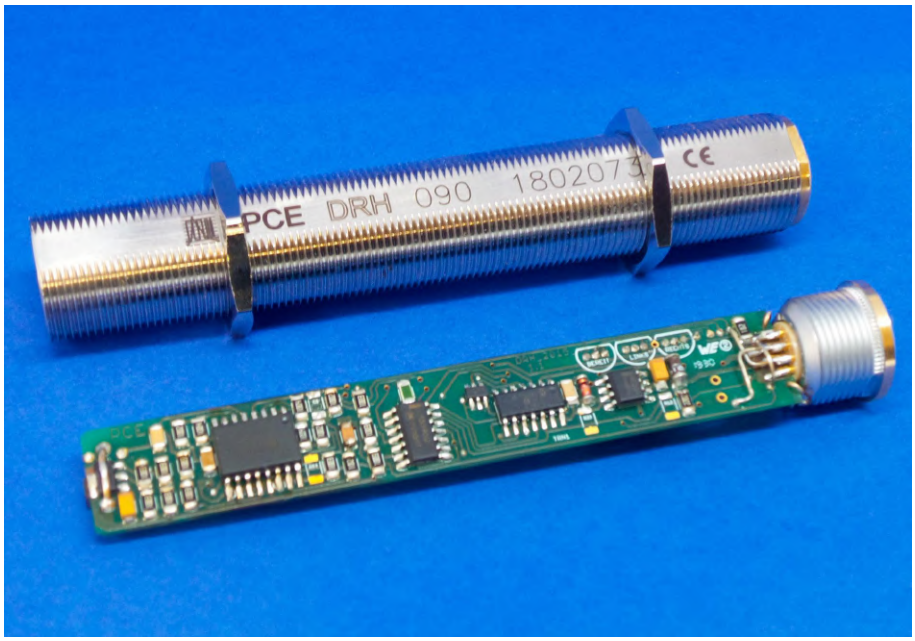
Recent Trends in Magnetic Sensors and Flux Based Condition Monitoring of Electromagnetic Devices [15]

Tento článek shrnuje trendy na poli diagnostických metod založených na analýze unikajícího magnetického pole. Vzhledem k publikaci článku v čase psaní této práce (05/2022), představují autoři velmi aktuální přehled aplikovaných metod a zkoumaných problémů. Autoři diskutují zejména aktuální téma detekce poruch a porovnávají metody založené na analýze proudu s těmi založenými na analýze magnetického pole.

Ani v tomto aktuálním přehledu se nenachází jediná zmínka o výzkumu na poli metod detekce směru rotace elektrických strojů.

2.3 Existující metoda detekce směru rotace pro DC motory

Na trhu existuje jen několik málo senzorů určených pro detekci směru rotace stejnosměrných strojů nižších výkonů z jejich unikajícího magnetického pole. Tyto senzory produkované německou firmou *Process Control Electronic GmbH* [16] lze použít na kartáčově komutované stroje - DC motory. Na obrázku 2.9 můžeme vidět právě jeden z těchto senzorů, který je aplikačně shodný s oblastí zájmu této disertační práce.



Obrázek 2.9: Průmyslový senzor DRH 090 od firmy *Process Control Electronic GmbH* pro detekci směru rotace DC motorů. Převzato z webu firmy [17].

V dalších částech této práce, zejména v kapitole 5.2, je odkazováno na komerční, existující senzor nebo řešení. Odkazováno je tím právě na tento senzor. Z technické specifikace lze zjistit, že senzor lze použít rovněž pro detekci směru rotace tří-fázových elektrických strojů napájených střídavým napětím. Tato funkcionalita senzoru není pro účely této práce dále uvažována.

Senzor funguje velice jednoduchým způsobem: porovnává hodnoty magnetické indukce před a během rotace motoru, vně pláště v oblasti mezery mezi statorovými magnety. Senzor je potřeba umístit v daném rozmezí vzdálenosti a také je potřeba jej správně orientovat. Pro potřeby různých aplikací výrobce poskytuje rozdílné konstrukční varianty senzoru [17].

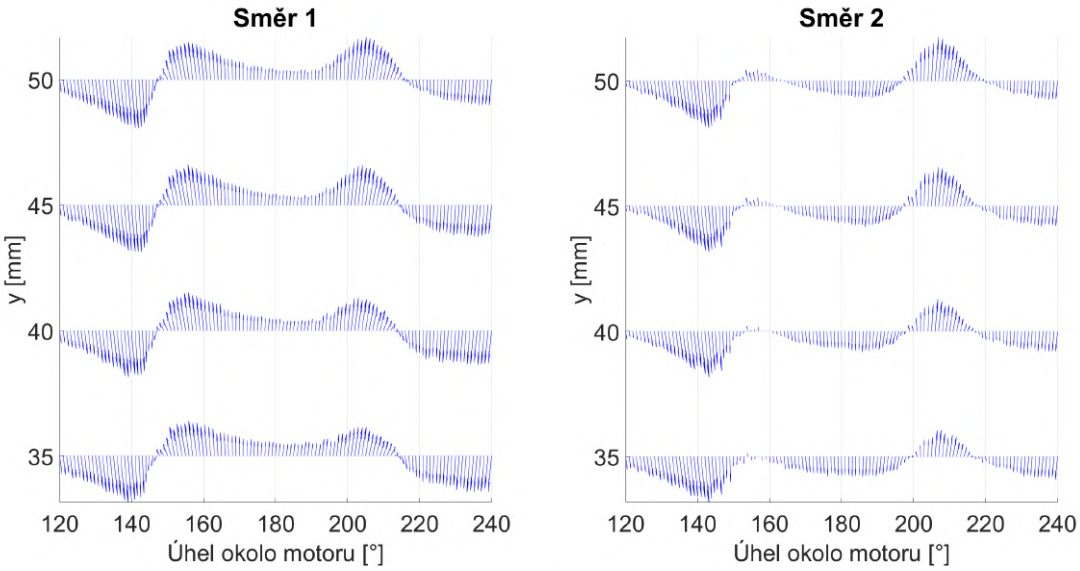
Algoritmus měření se senzorem funguje přibližně takto:

1. Senzor se umístí do blízkosti pláště motoru v místě mezery mezi statorovými magnety, v dané vzdálenosti a se stanovenou orientací.
2. Je provedeno měření vektoru magnetické indukce $\boldsymbol{b}_{klid}$. Motorem neprotéká žádný proud.
3. Na svorky motoru je přivedeno napětí. Motorem protéká proud a rotor motoru se otáčí.
4. Je provedeno měření vektoru magnetické indukce $\boldsymbol{b}_{rotujici}$.
5. Senzor stanoví výsledek vypočtením vektoru magnetické indukce jako:

$$\boldsymbol{b} = \boldsymbol{b}_{rotujici} - \boldsymbol{b}_{klid} \tag{2.2}$$

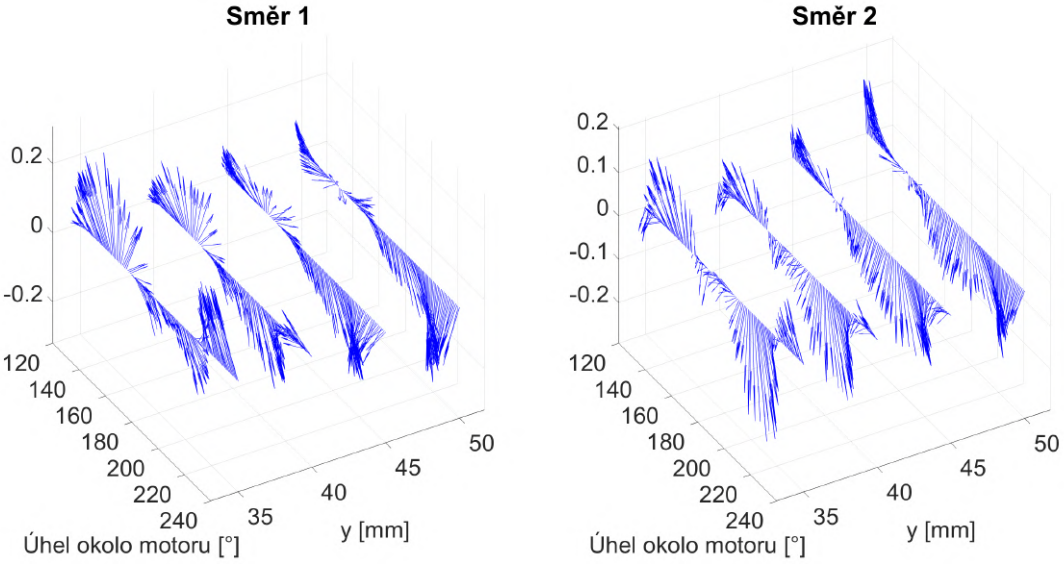
Takto vypočítané vektory magnetického pole budou v souvislosti s tímto komerčním senzorem nadále označovány jako *rozdílový vektor* nebo *rozdílové pole*, v závislosti na kontextu. Jak je zřejmé, název je odvozen od užité matematické operace.

Bylo již zmíněno, že je senzor potřeba umístit do mezery mezi statorovými magnety. Toto místo spojeno s prudkými změnami v orientaci a intenzitě unikajícího magnetického pole, jak je dokazováno níže a také později v kapitole 4.1.



Obrázek 2.10: Prudké změny rozdílového magnetického pole (výřez) v oblasti mezery mezi statorovými magnety jednoho z měřených motorů pro rotaci oběma směry (*přímý pohled*).

Na obrázcích 2.10 a 2.11 lze ve výřezu vidět podobu měřeného magnetického pole právě v okolí mezery mezi statorovými magnety, pro oba směry rotace, z přímého a isometrického pohledu. Jedná se o vypočtené rozdílové pole přesně tak, jak popisuje výše uvedený algoritmus a rovnice (2.2). Je důležité si povšimnout, jak podobná si tato pole jsou. Můžeme zřetelně vidět, že zejména v místech okolo 150° a 210° se orientace pole mění velice prudce. Kde se mezera mezi magnety nachází, je závislé na orientaci motoru při měření a také na jeho konstrukci, a zmíněné úhly zde slouží pouze pro lepší orientaci v obrázku.



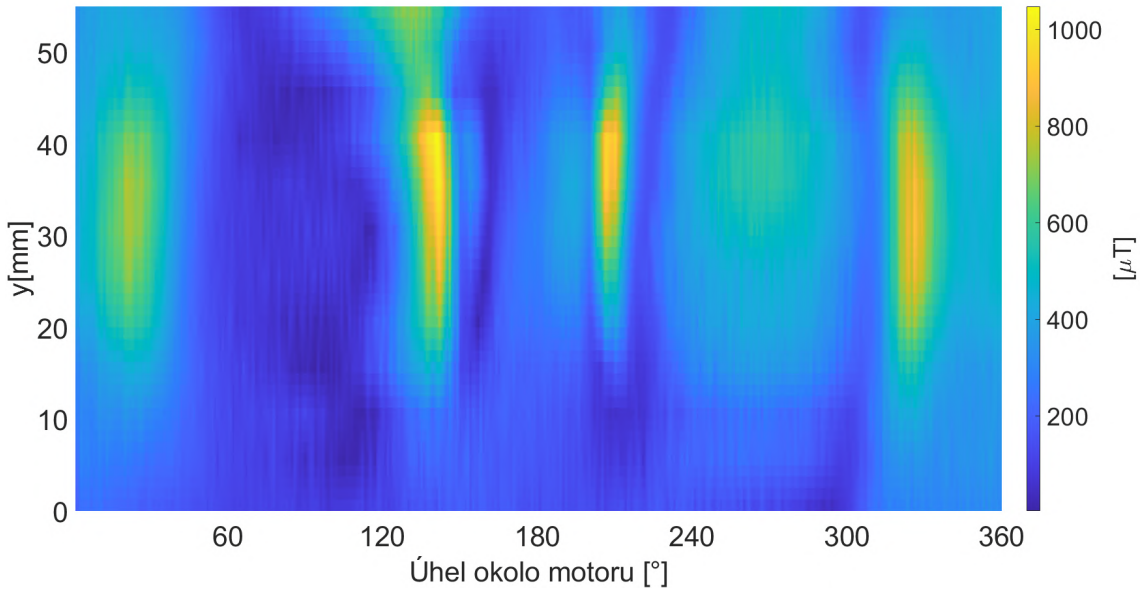
Obrázek 2.11: Prudké změny rozdílového magnetického pole (výřez) v oblasti mezery mezi statorovými magnety jednoho z měřených motorů pro rotaci oběma směry (*isometrický pohled*).

Data vykreslená v těchto obrázcích jsou získána z měření stejného motoru jako v kapitole 5, kde lze nalézt detailnější informace. Úhlový krok měření (pozice každé ze zobrazených šipek) byl 1° na poloměru 22mm, osa y označuje svislou osu podélně s výškou motoru.

Další pohled, který napoví o problematice polohování tohoto komerčního senzoru více, poskytuje obrázek 2.12. Na obrázku můžeme vidět intenzitu rozdílového pole v okolí celého motoru. Lze vypozorovat, že z hlediska intenzity se v okolí nachází celkem 4 vhodná místa pro měření. Spojí-li se ovšem informace ze všech tří obrázků dohromady, lze vidět, oblast kde lze uvedenou metodu pomocí tohoto komerčního senzoru úspěšně aplikovat je skutečně malá.

Z obrázku 2.12 lze vidět, že oblast s velkou intenzitou o souřadnicích [135°-145°, 30mm-40mm] by byla pro měření vhodná. Avšak obrázky 2.10 a 2.11 odhalují, že právě v této oblasti dochází k prudké změně orientace pole, a proto je efektivní oblast

aplikace výrazně menší. Díky tomu musí být při použití senzoru v praxi nejprve tato oblast co nejpřesněji stanovena.



Obrázek 2.12: Intenzita rozdílového magnetického pole, pro uvedenou metodu, okolo celého obvodu měřeného motoru (data získána měřením stejného motoru jako v kapitole 5).

Z uvedených poznatků a z podobností rozdílových polí pro oba směry vyplývá, že správné polohování senzoru při měření hraje významnou roli, jelikož se senzor snaží rozlišit právě mezi těmito dvěma. To je zcela zásadní nevýhoda zmíněného komerčního senzoru, kterou jsme popsali v článku publikovaném v časopise [1]. Hlavním problémem této metody je, že vytváří rozdílový vektor mezi klidovým a rotujícím stavem. V kapitole 5 je představeno vylepšení této metody detekce směru rotace.

3 Specifikace cílů práce

Konkrétní cíle disertační práce jsou stanoveny takto:

Cíl teoretický 1: Návrh metodiky měření a interpretace magnetického pole v okolí malých elektrických strojů.

Jak již bylo zmíněno, diagnostika malých elektrických strojů na základě analýzy jejich unikajícího magnetického pole s sebou nese řadu nesnází. Významnou roli hrají zejména malé rozměry strojů, které vedou v přímém důsledku k výrazným změnám měřeného indukčního toku na relativně malém prostoru. Rovněž změny v magnetické indukci, které jsou jedním z důležitých cílů pro analýzu, jsou velmi malé. V závislosti na konkrétním analyzovaném stroji často blízké intenzitě magnetického pole Země při povrchu.

Abychom byli schopni zachytit děje a charakter měřené magnetické indukce a zejména dějících se změn, je potřeba klást důraz na použití správného postupu a také vybavení. Navrhneme tedy metodiku, která bude představené problémy vhodným způsobem řešit.

V rámci cíle budou prozkoumány nejvhodnější postupy, jakými lze analýzu vykonat (od výběru vhodného senzoru až po vlastní provedení). Dále budou prozkoumány různé interpolační metody vedoucí k vhodné interpretaci měřeného magnetického pole, a to zejména v místech největších zakřivení magnetických siločár.

Cíl teoretický 2: Významné vylepšení metody detekce směru rotace DC kartáčových strojů ze změn v magnetické indukci vně opláštění.

Z provedených experimentů vyplynulo, že lze popsat metodu, pomocí které je možné určit směr rotace malého stejnosměrného kartáčového stroje. Toho lze docílit měřením změn v magnetické indukci téměř v celém okolí elektrického stroje.

Existující komerční řešení, které nabízí potřebnou funkcionalitu, má svá omezení zejména v podobě úzkého měřicího prostoru. Představením nové, vylepšené metody použitelné v širším okolí měřeného motoru tak přispěje k celkové robustnosti možnosti detekce směru rotace pro malé kartáčové motory.

V rámci tohoto cíle bude popsáno, jak metoda funguje a na sadě měření, pomocí metodiky z teoretického cíle 1, bude experimentálně prokázána její robustnost. Součástí budou vizualizace magnetického pole pro tento typ stroje z reálně naměřených dat.

Cíl teoretický 3: Vývoj nové unikátní metody detekce správnosti zapojení malých elektricky komutovaných strojů ze změn v magnetické indukci vně opláštění. Z provedených experimentů vyplynulo, že lze rovněž popsat metodu,

pomocí které bude možno určit správnost zapojení malých elektricky komutovaných motorů. Bylo rovněž ukázáno, že magnetické pole v okolí těchto motorů má zcela rozdílný charakter, než je tomu u motorů kartáčových.

Není známo, že by byla podobná metoda někde publikována, nebo existovalo řešení pro tento problém. Proto bude uvedení metody zcela unikátní a nové. Výstupem cíle bude teoretický popis metody a algoritmu, kterým je potřeba metodu aplikovat. Výsledky budou doprovozeny sadou měření pomocí metodiky z teoretického cíle 1, čímž bude prokázána její funkčnost a robustnost.

Cíl praktický 1: Návrh měřicího stanoviště pro měření a vizualizaci magnetického pole v okolí malých el. motorů. Pro aplikaci výše uvedených metod do praxe, bude vyvinuta a zprovozněna vhodná měřicí stanice. Tato stanice bude sestávat z mechaniky, výkonové elektroniky, měřicí a komunikační elektroniky a PC softwaru, který umožní magnetické pole analyzovat a vizualizovat.

Konstrukce a software měřicího stanoviště bude přesně specializovaný pro potřeby provedení analýzy magnetického pole u malých strojů. Tím se dosáhne značné časové a cenové úspory na provedenou analýzu.

Měřicí stanice se bude sestávat z:

- potřebné elektroniky zajišťující vlastní měření dat,
- výkonové elektroniky schopné spínat fáze motorů dle potřeby algoritmů,
- mechanismu zajišťujícím rotaci měřeného elektrického stroje,
- snadno uživatelsky-rozšiřitelný PC software pro ovládání měření, vizualizaci a provádění analýz výsledků.

Řešení jednotlivých cílů je zpracováno v těchto kapitolách:

1. Navrhovaná metodika měření (kapitola 4.6) a interpretace unikajícího magnetického pole (kapitola 4.3) přináší vhodný přístup k řešení specifických překážek s tímto polem spojených (kapitola 4.1).
2. Existující metoda detekce směru rotace DC motorů (kapitola 2.3) je významně vylepšena (kapitola 5.2).
3. Je představena zcela nová, unikátní metoda detekce směru rotace BLDC motorů (kapitola 6.2).
4. Nedostatky měřicího stanoviště s robotickým ramenem (kapitola 4.4) jsou vyřešeny návrhem stanoviště výrazně levnějšího a pro potřebné účely vhodnějšího (kapitola 4.5).

4 Měření unikajícího magnetického pole z opláštění malých elektrických motorů

Aby bylo možné unikající magnetické pole z opláštění malých elektrických strojů správně měřit, interpretovat a analyzovat, je nejdříve potřeba odpovědět na několik základních otázek. Těmi jsou:

- Jak na magnetické pole nahlížet?
- Jak pole měřit?
- Jak spínat měřený motor?
- Kde pole měřit?

Tato kapitola se pokouší na tyto otázky nalézt odpověď.

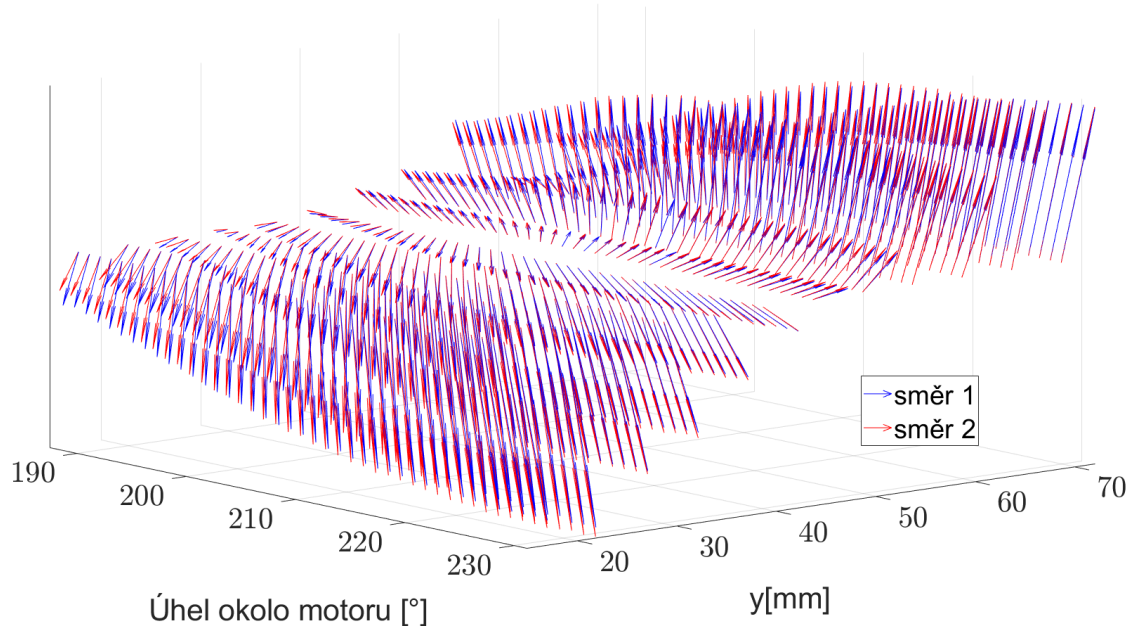
Jak je představeno v přehledu existujících diagnostických metod analyzujících unikající magnetické pole v kapitole 2.2, řada z nich využívá analýzy komponent ve frekvenčním spektru. V této disertační práci se budou dále uváděné poznatky a měření zakládat pouze na analýze pole nízko-frekvenčního. Všechny komponenty pole vyšších frekvencí budou filtrovány a nebo zanedbány.

Tvrzení v této kapitole jsou představena pomocí měření provedených na malém DC motoru - palivové pumpě pro nádrže benzínových automobilů, měřeném při napětí 5V, za hodnoty protékajícího proudu 1.2A při dosažení přibližně 1420 ot./min. Tento motor lze vidět dále v této kapitole na obrázku 4.10, který usnadní orientaci v následujících obrázcích, kde osa y znační výšku motoru.

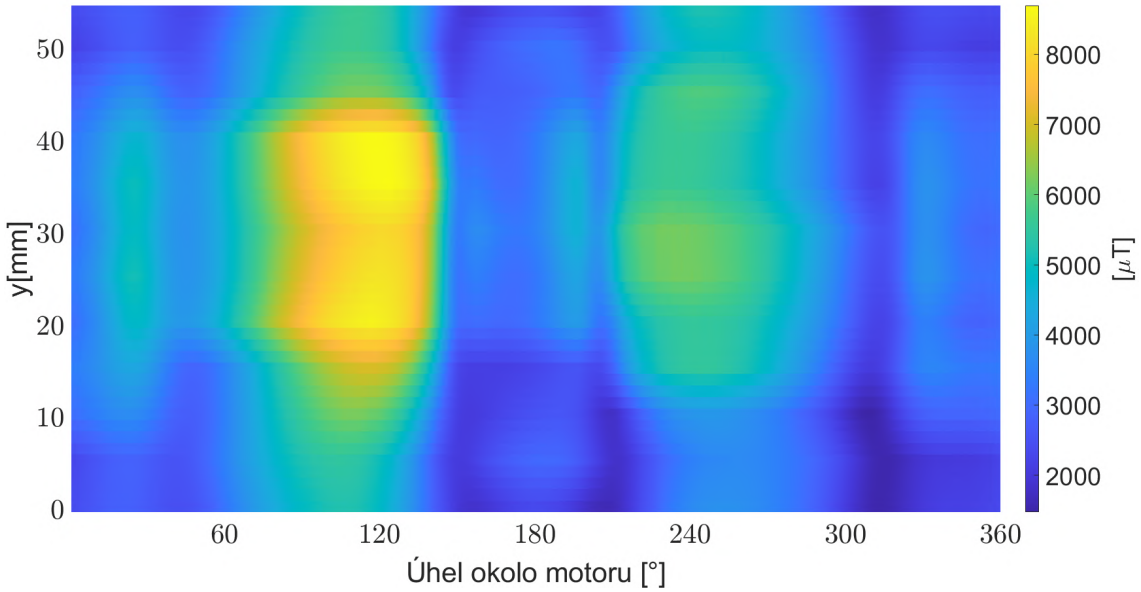
4.1 Charakteristiky pole

Na měřené magnetické pole lze nahlížet několika způsoby. Jednou z možností je pole změřit a dané vektory magnetické indukce jednoduše vykreslit. Takové měření může poskytnout informace o intenzitě měřeného pole a jeho orientaci.

Na obrázku 4.1 je vykreslen výřez pole právě při takovém měření, a to pro rotaci motoru - protékajícím proudu - oběma možnými směry. Z obrázku lze vidět, jak se orientace magnetického pole v daném místě mění, dále lze vidět změnu jeho intenzity v závislosti na místě měření (toto lze usoudit z relativní velikosti vykreslených šipek), ale zejména, že mezi magnetickými poli při rotaci motoru oběma směry není velký rozdíl z pohledu jejich orientace a intenzity.



Obrázek 4.1: Výřez ve změřeném unikajícím magnetickém poli v blízkosti pláště měřeného DC motoru, pro dva směry rotace.



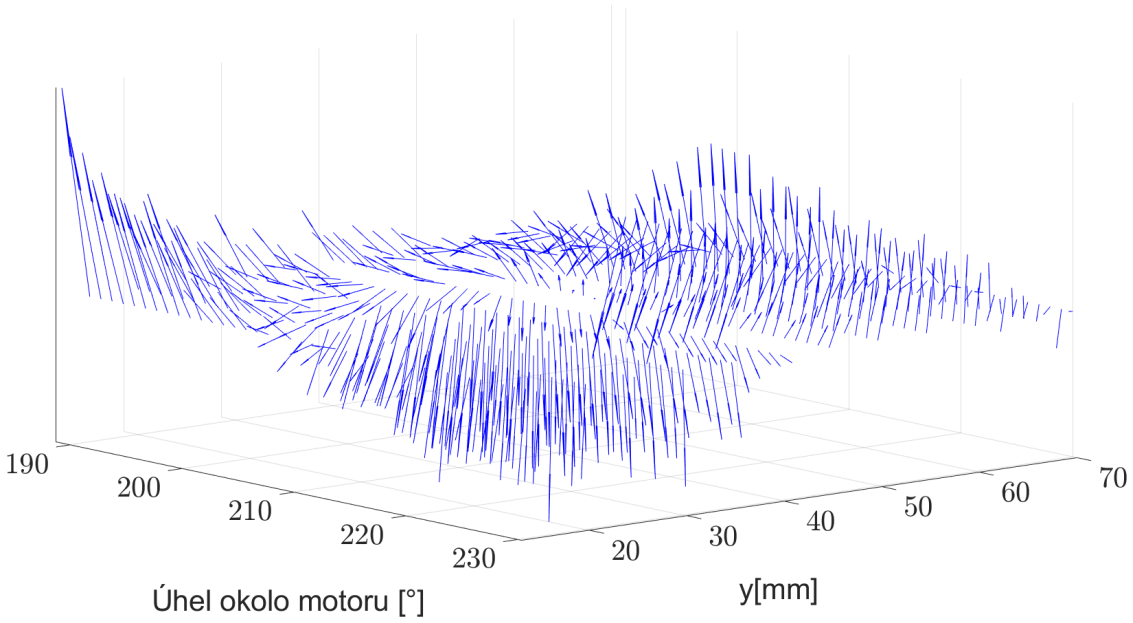
Obrázek 4.2: Intenzita měřeného unikajícího magnetického pole v blízkosti měřeného DC motoru při průtoku proudu 1.2A ve vzdálenosti 2mm od těla motoru (*interpolovaná data*), pro oba směry rotace.

V kapitole 2.1 bylo již zmíněno, že hlavní výzvy pro měření a analýzu unikajícího magnetického pole jsou jeho slabá intenzita a lokálně prudké změny jeho orientace.

Určitý vhled změn v orientaci pole už poskytly obrázky 2.10, 2.11 a 4.1, a vhled do podoby intenzity pole nabízí obrázek 4.2 výše. Na tomto obrázku lze vidět, že pro měřený motor, při protékajícím proudu 1.2A, je intenzita měřeného pole zhruba stonásobná, než je intenzita magnetického pole Země při jejím povrchu.

Na obrázku 4.2 lze dále vidět, že intenzita pole není podél pláště motoru rovnoměrně rozložena, a to jak podél horizontální (obvod motoru) tak i svislé osy (výška motoru). Naopak lze vidět, že oblast přibližně ohraničená úhly 75° - 140° a výškou 15mm - 45mm se vyznačuje nejvyšší intenzitou pole. Tato oblast se ovšem nachází mimo mezeru mezi statorovými magnety, která se v tomto případě nachází přibližně v úhlu 180°.

Magnetické pole lze také získat výpočtem. Jednou z možností je například již zmíněná metoda komerčního senzoru (rovnice 2.2) v kapitole 2.3. Na obrázku 4.3 můžeme stejný výřez magnetického pole jako v případě obrázku 2.11, avšak nyní je rozdílové pole získáno odečtením polí pro oba směry rotace (tento typ výpočtu rozdílového pole je důležitý v kontextu kapitoly 5.2, kde lze najít více informací). Na obrázku lze vidět, že i v tomto rozdílovém poli existují místa s prudkou změnou jeho orientace.



Obrázek 4.3: Výřez vypočteného pole z rozdílu polí mezi oběma směry rotace v okolí DC motoru.

Základní výhodou výpočtu rozdílových vektorů nebo polí je ten, že z principu neutralizují vliv pozadí, a ve své podstatě odhalují pouze změny mezi měřenými stavy, což je často předmětem zájmu mnohých diagnostických metod.

Z výše uvedených poznatků vyplývají následující požadavky na měření unikajícího pole *malých* elektrických strojů:

- Vysoké rozlišení v prostoru.

  Měřicí prvek musí být dostatečně malý, aby bylo možné zaznamenat prudké změny v měřeném poli dané zejména konstrukčními rozměry měřených strojů.

- Vysoká citlivost.

  V závislosti na typu měřeného stroje, jeho velikosti a protékajícím proudu se může intenzita magnetického pole pohybovat v násobcích intenzity magnetického pole Země.

- Přesné polohování.

  Z představených charakteristik pole vyplývá, že přesné polohování senzoru může hrát velmi významnou roli.

- Stabilita.

  Vzhledem k celkově nízké intenzitě pole je během měření důležité, aby magnetické pozadí bylo stabilní, jelikož by mohlo významně ovlivnit výsledky.

4.2 Výběr vhodného senzoru

Některé v praxi používané senzory byly zmíněny v kapitole 2.2. Ve spojení s informacemi, které přinesla předchozí podkapitola lze upřesnit následující kritéria, která vhodný senzor musí splňovat:

- Aktivní snímací část senzoru musí být dostatečně malá.

  Definice pro *dostatečně malou* snímací část je závislá na konkrétní aplikaci. Pro potřeby této disertační práce ji lze stanovit jako menší než $2mm$.

- Vysoká citlivost.

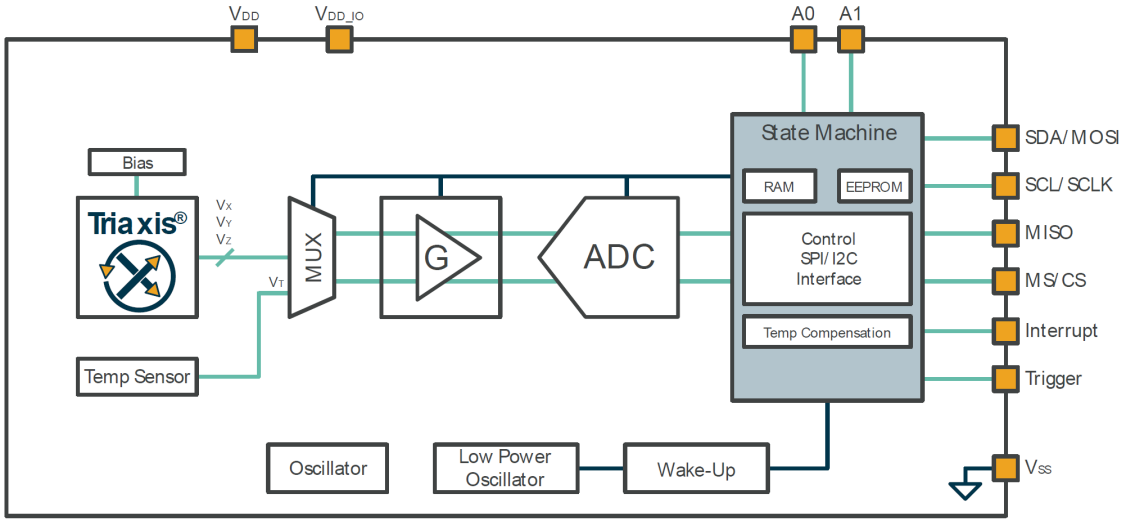
  Aby bylo možné spolehlivě měřit pole intenzit blízké intenzity magnetického pole Země při povrchu, měla by se citlivost senzoru pohybovat maximálně v řádu jednotek μT.

- Nastavitelnost citlivosti a rozšířené možnosti filtrace signálu.

  Tato vlastnost není kritická, ale usnadňuje realizaci této disertační práce.

Z výše uvedených požadavků vyplývá, že v kapitole 2.2 nejčastěji zmiňovaná *snímací cívka*, nebude následující kritéria splňovat. Navíc, jak bylo zmíněno v úvodu této kapitoly, pro potřeby metod prezentovaných v této disertační práci není třeba vysoké frekvenční propustnosti.

Díky pokroku v technologiích se na trhu v posledním desetiletí objevují senzory, které zmíněné parametry splňují. Senzorem, který byl vybrán pro realizaci této práce je *MLX90393* of firmy *Melexis* [18], jehož blokové schéma je na obrázku 4.4. Jedná se o velmi malý ($3x3mm$) integrovaný tříosý magnetometr fungující na základě *Hallova jevu* s vysokou citlivostí.



Obrázek 4.4: Blokové schéma integrovaného senzoru MLX90393 od firmy Melexis (převzato z [19]).

Protože se jedná o integrovaný obvod, nabízí tento senzor řadu výhodných funkcí a nastavení. Těmi důležitými pro potřeby této práce jsou:

- I^2C komunikační rozhraní pro jednoduchou komunikaci s mikrokontrolérem.
- Dva adresní piny a čtyři pevné verze adresy z výroby. Tyto dvě vlastnosti v kombinaci umožňují připojení až 16 senzorů na jednu sběrnici.
- Maximální citlivost $0.161\mu T/LSB$ umožní měřit spolehlivě velice slabá pole.
- Nastavitelná frekvence snímkování - od $259\mu s$ do $66.6ms$ potřebného času převodu pro jednu měřenou osu.
- Nastavitelný over-sampling pro filtraci šumu (snižuje maximální frekvenci výstupu).
- Automatická kompenzace teplotního ovlivnění výstupních dat.
- Možnost sejmutí dat na požádání. Lze tak přesně říci senzoru, v jaký okamžik zaznamenat měřené hodnoty.
- Snímání ve všech třech osách umožňuje přímo měřit vektor magnetické indukce.

4.3 Interpolace měřených dat

Jak je zmíněno v kapitole 4.1, při interpretaci unikajícího magnetického pole je důležité zvážit místy prudkou změnu orientace jeho vektorů. Chceme-li tedy pole vhodně a správně interpretovat, bude hrát významnou roli hustota bodů měření. Jelikož to může být často limitující faktor, přichází při interpretaci dat do úvahy jejich interpolace.

Vhodnou interpolací měřených dat lze dosáhnout zejména dvou významných cílů. Prvním je zmenšení vlivu limitace způsobené omezeními v možnosti hustoty snímání měřeného pole, čímž lze zlepšit kvalitu výsledků v místech zájmu. Druhým cílem je vylepšení čitelnosti vizualizovaných výsledků pro lidské oko.

Nástrojů pro interpolaci dat existuje celá řada. Program *MATLAB* a programovací jazyk *Python* patří, mimo jiné, mezi nejpoužívanější inženýrské nástroje pro práci s velkými datovými celky. Knihovny pro interpolaci lze nalézt i pro další skriptovací a programovací jazyky jako *R*, *Java* nebo *C++*, a volba použitého jazyka či programu se vždy odvíjí od cíleného použití.

Pro jednoduchost a pochopitelnost problému bude dále uveden obecný příklad lineární interpolace bodů změřených v rovině. Problém bude následně demonstrován na reálných datech změřené magnetické indukce unikajícího pole vně opláštění motoru. Obecný příklad lineární interpolace v rovině bude vypadat následovně.

Hodnota bodu (x_i, y_i) v rovině x, y může být zobrazena jako výška h_i nad touto rovinou. To vytváří trojúhelníkovou plochu nad rovinou x, y s vrcholy (x_i, y_i, h_i). Vezmeme-li body P_1, P_2 a P_3 v místech $x_1 = (x_1, y_1)$, $x_2 = (x_2, y_2)$ a $x_2 = (x_3, y_3)$ umístěné právě v těchto vrcholech nad plochou x, y, s hodnotami h_1, h_2 a h_3, pak lze nalézt hodnotu jakéhokoliv bodu P_i.

$$h = ax + by + c \tag{4.1}$$

je rovnice roviny definované body (x_1, y_1, h_1), (x_2, y_2, h_2) a (x_3, y_3, h_3). Vložením hodnot x, y, h pro každý z těchto tří bodů získáme systém lineárních rovnic

$$\begin{aligned} h_1 &= ax_1 + by_1 + c, \\ h_2 &= ax_2 + by_2 + c, \\ h_3 &= ax_3 + by_3 + c. \end{aligned}$$

Řešením tohoto systému rovnic jsme schopni nalézt koeficienty a, b, c pro rovinu z rovnice (4.1). Jakmile jsou tyto koeficienty známy, je možné pomocí rovnice (4.1) vypočíst interpolované hodnoty h pro jakýkoliv bod P umístěným v $\mathbf{x} = (x, y)$ uvnitř tohoto trojúhelníku.

Další a častější možností je užití tzv. *barycentrické* (z Řeckého slova *barys* = těžký) neboli *vážené interpolace*. Podobně jako v předchozím případě tak lze inter-

polovaný bod P v rovině x, y vyjádřit jako vážený průměr z lokací oněch tří vrcholů jako

$$\mathbf{x} = a_1\mathbf{x}_1 + a_2\mathbf{x}_2 + a_3\mathbf{x}_3, \tag{4.2}$$

kde $a_1 + a_2 + a_3 = 1$. Váhy a_1, a_2 a a_3 se nazývají *váhové* (*barycentrické*) *souřadnice* bodu P. Toto jméno je odvozeno z fyzikální interpretace bodu P jakožto středu hmotnosti trojúhelníku $P_1P_2P_3$ s váhami a_i patřící k vrcholům P_i.

Odtud můžeme vidět, že interpolační funkci $h = f(x, y)$ lze přeformulovat tak, že hodnota h v bodě P je jednoduše vážený průměr hodnot h_i ve vrcholech P_i, $\mathbf{x}_i = (x_i, y_i)$ jako

$$h = a_1h_1 + a_2h_2 + a_3h_3 \tag{4.3}$$

se stejnými váhami a_1, a_2, a_3 jako v rovnici (4.2). Vzhledem k tomu, že souřadnice bodů P, P_1, P_2 a P_3 jsou známé, mohou být hodnoty vah a_1, a_2 a a_3 nalezeny pomocí řešení systému lineárních rovnic. Platí, že:

$$\begin{aligned} a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 &= x \\ a_1y_1 + a_2y_2 + a_3y_3 &= y \\ a_1 + a_2 + a_3 &= 1. \end{aligned}$$

Řešením těchto rovnic je

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \tag{4.4}$$

nebo vyjádřeno jiným zápisem jako

$$a_1 = M_1/M, \qquad a_2 = M_2/M, \qquad a_3 = M_3/M, \tag{4.5}$$

kde

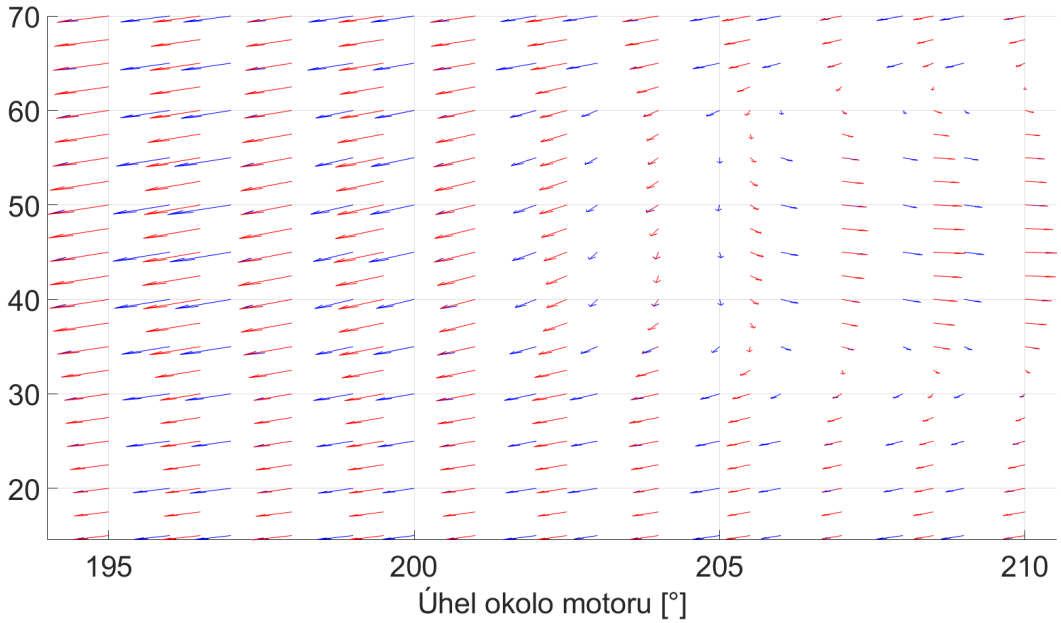
$$M = \begin{vmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}, \qquad M_1 = \begin{vmatrix} x & x_2 & x_3 \\ y & y_2 & y_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix},$$

$$M_2 = \begin{vmatrix} x_1 & x & x_3 \\ y_1 & y & y_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}, \qquad M_3 = \begin{vmatrix} x_1 & x_2 & x \\ y_1 & y_2 & y \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}.$$

Obdobným způsobem lze odvodit rovnice pro trojrozměrnou úlohu.

Takto založené interpolační metody jsou poměrně jednoduché na implementaci a jejich výpočet může rovněž být relativně rychlý, avšak trpí určitými nedostatky. Přestože lineární interpolace po částech zaručuje spojitý výsledek, derivace mezi jednotlivými sousedícími trojúhelníky spojitá není. Jinými slovy, výsledná interpolace je kontinuity C^0 avšak není kontinuity C^1, neboli hladká [20]. Dalším nedostatkem je, že triangulace rozptýlených bodů není unikátní, a tedy různé triangulace mohou vést k rozdílným výsledkům v interpolovaných bodech.

Pro potřeby této disertační práce byly využity funkce v programu *MATLAB*, které nabízí potřebnou funkcionalitu pro interpolaci dat, ať už organizovaných do mřížky nebo rozptýlených. V nabídce se nachází množství funkcí, avšak potřebnými pro tuto práci byly zejména *interp2*, *interp3*, *griddata* a *scatteredInterpolant*. Více informací k funkcím a používaným metodám lze nalézt např. v [21]. Zmíněné funkce většinou využívají metody interpolace založené na *Delaunay* triangulaci [22].



Obrázek 4.5: Příklad lineární interpolace (červené vektory) pole, ve srovnání s přímo měřeným polem (modré vektory) v místě prudkých změn.

Na obrázku 4.5 lze vidět příklad interpolace reálných dat měřeného pole v úseku prudkých změn. Modré vektory zobrazují měřené pole s větším úhlovým rozlišením, červené vektory pole *lineárně* interpolované, měřené s třetinovým úhlovým rozlišením (proto je každý třetí sloupec modrých vektorů překryt červenými). Z porovnání lze vidět (lépe ovšem při pohledu ve 3D), že interpolované pole dostatečně vystihuje orientaci reálného. Řadou experimentů bylo zjištěno, že lineární interpolace je pro potřeby věrohodné reprezentace pole v místech prudkých změn dostačující.

4.4 Robotické měřicí stanoviště

Jednou ze zmíněných obtíží při měření unikajícího magnetického pole, je potřeba přesného polohování místa měření, kvůli prudkým změnám orientace pole. Tu lze řešit například použitím robotického manipulátoru. Při počátcích realizace této disertační práce byl právě jeden takový robotický manipulátor k dispozici. Jednalo se o manipulátor se 6 stupni volnosti *UR10e* od firmy *Universal Robots* z Dánska [23].

Pomocí řešení měřicího stanoviště s průmyslovým robotickým manipulátorem byly vykonány prvotní měření pro potřeby této práce a dosažené výsledky byly publikovány v časopise a na konferenci [1] [2]. Během práce se stanoviště bylo zjištěno, že skýtá následující výhody a nevýhody.

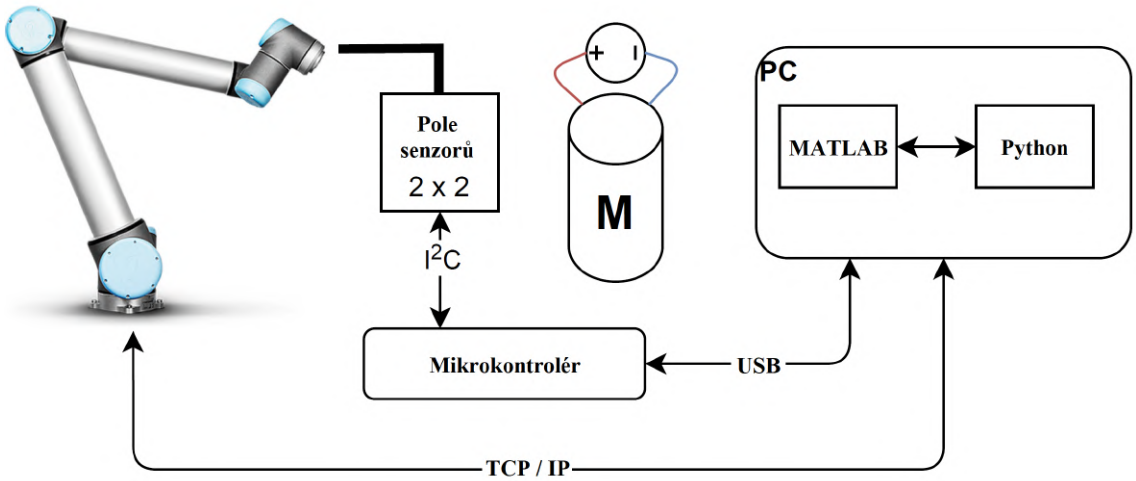
Výhody:

- Rychlost sestavení měřicího stanoviště - hotové řešení.
- Jednoduchost zprovoznění - manipulátor dodáván s programovacím rozhraním.
- Absence nutnosti vytvářet mechanický návrh - snadno dostupné komponenty.

Nevýhody:

- Vysoké pořizovací náklady manipulátoru.
- Rozměry stanoviště jsou díky robotickému rameni větší.
- Části robota mohou ovlivnit měření samotné.
- Umístění kabeláže k měřenému motoru - robotické rameno rotuje kolem měřeného motoru.
- Vedení kabeláže senzorů.

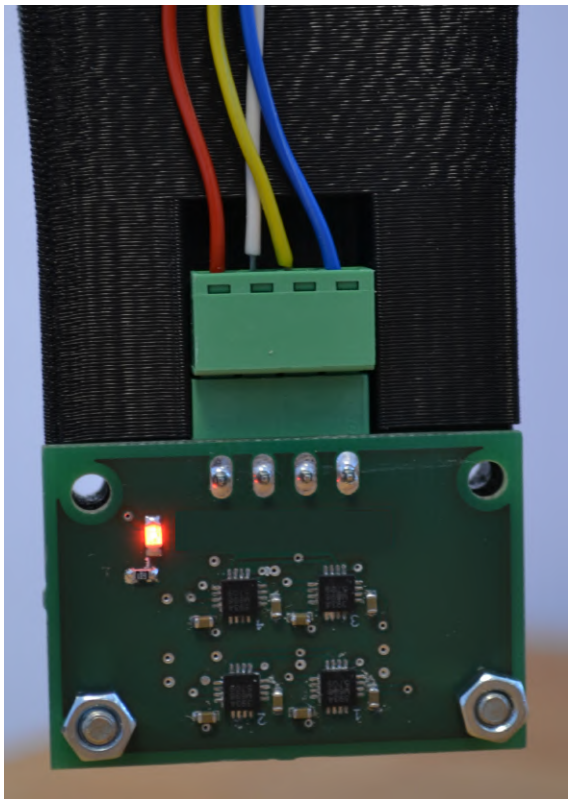
Na obrázku 4.6 lze vidět schéma měřicího stanoviště s robotickým manipulátorem UR10e, tak jak bylo sestaveno. Ze schéma lze vidět, že kromě robotického ramene se stanoviště sestávalo z pole senzorů připojeným pomocí tištěného nástavce ke koncovému efektoru (k vidění na obrázku 4.10), dále mikrokontroléru, který sloužil ke komunikaci s obslužnou aplikací v počítači a čtení dat ze senzorů, které následně do aplikace v počítači odesílal.



Obrázek 4.6: Blokové schéma měřicího stanoviště s manipulátorem UR10e.

Pro potřeby experimentu bylo potřeba navrhnout desku plošných spojů, na které by byly umístěny senzory magnetické indukce. Na desku byly umístěny 4 senzory s roztečí $5mm$ a je k vidění na obrázku 4.7. Z obrázku je rovněž patrné konstrukční uchycení senzorů k tištěnému nástavci a přivedená kabeláž.

Nástavec pro úchyt senzorů k bylo potřeba navrhnout z důvodu odsazení vlastní senzorické části stanoviště od těla robotického manipulátoru, aby nedocházelo k možnému ovlivnění měřených dat proudy tekoucími motory manipulátoru, a případnou magnetizací některých jeho součástí. Současně se tím i usnadnilo umístění senzorické části ke koncovému efektoru.



Obrázek 4.7: Deska plošných spojů se senzory pro robotické stanoviště.

Přestože je součástí manipulátoru ovládací panel s uživatelským rozhraním, které umožňuje programovat pohyby ramene tak, že lze uložit jednotlivé body pohybu a trajektorie je následně dopočítána automaticky, pro účely měření nebylo toto programovací rozhraní vhodné ani dostatečně flexibilní. Měření tak bylo řízeno z vlastního vyvinutého skriptu v programu *MATLAB*, s využitím *MATLAB Toolbox for UR Manipulators* vyvinutém na *United States Naval Academy* [24], který následně využívá knihovnu *URX Python library* [25].

Porozumění vztahu mezi polohou koncového efektoru a kloubovými úhly vyjadřují rovnice kinematiky, které pro úplnost následují. Pozice koncového efektoru lze vyjádřit jako funkci jednotlivých kloubových úhlů jako

$$\begin{aligned} {}_0P_6(\phi_1,\phi_2,\phi_3,\phi_4,\phi_5,\phi_6) &= {}_0P_1(\phi_1){}_1P_2(\phi_2){}_2P_3(\phi_3){}_3P_4(\phi_4){}_4P_5(\phi_5){}_5P_6(\phi_6) \\ &= \begin{bmatrix} m_x & n_x & o_x & p_x \\ m_y & n_y & o_y & p_y \\ m_z & n_z & o_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{4.6}$$

kde jednotlivé členy výsledné matice vyjádříme jako:

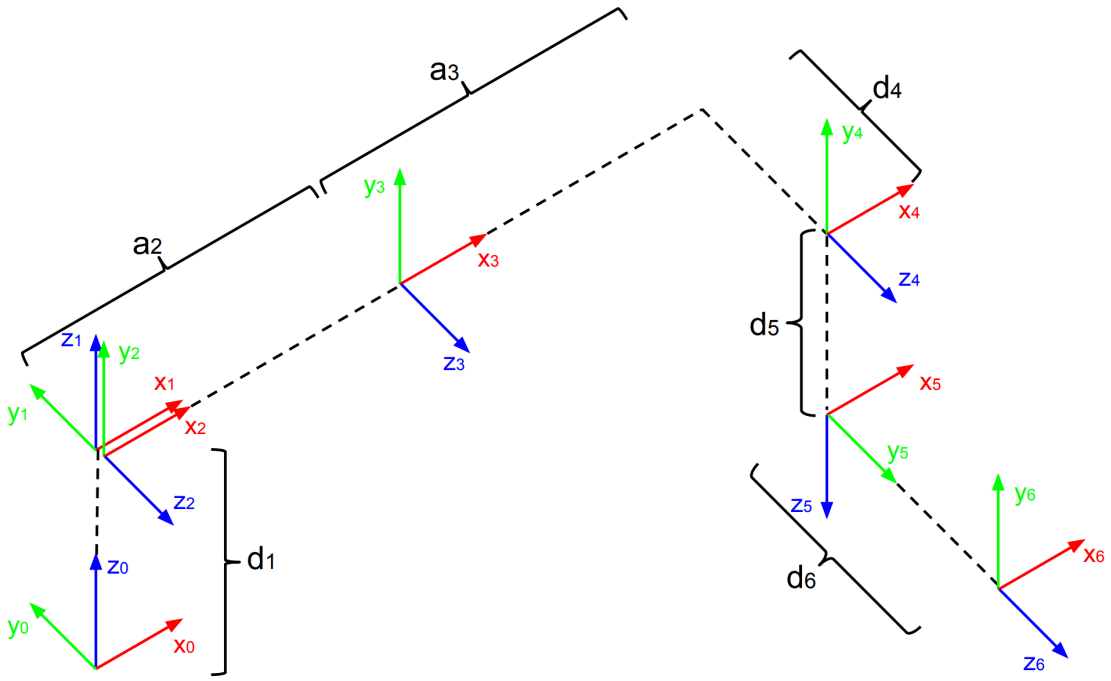
$$
\begin{aligned}
m_x = \;& \cos(\phi_1)\cos(\phi_2+\phi_3+\phi_4)\cos(\phi_5)\cos(\phi_6) + \sin(\phi_1)\sin(\phi_5)\cos(\phi_6) \\
& - \cos(\phi_1)\sin(\phi_2+\phi_3+\phi_4)\sin(\phi_6) \\
m_y = \;& \sin(\phi_1)\cos(\phi_2+\phi_3+\phi_4)\cos(\phi_5)\cos(\phi_6) - \cos(\phi_1)\sin(\phi_5)\cos(\phi_6) \\
& - \sin(\phi_1)\sin(\phi_2+\phi_3+\phi_4)\sin(\phi_6) \\
m_z = \;& \cos(\phi_2+\phi_3+\phi_4)\sin(\phi_6) + \sin(\phi_2+\phi_3+\phi_4)\cos(\phi_5)\cos(\phi_6)
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
n_x = \;& -\cos(\phi_1)\sin(\phi_2+\phi_3+\phi_4)\cos(\phi_6) - \sin(\phi_1)\sin(\phi_5)\sin(\phi_6) \\
& - \cos(\phi_1)\cos(\phi_2+\phi_3+\phi_4)\cos(\phi_5)\sin(\phi_6) \\
n_y = \;& -\sin(\phi_1)\sin(\phi_2+\phi_3+\phi_4)\cos(\phi_6) + \cos(\phi_1)\sin(\phi_5)\sin(\phi_6) \\
& - \sin(\phi_1)\cos(\phi_2+\phi_3+\phi_4)\cos(\phi_5)\sin(\phi_6) \\
n_z = \;& \cos(\phi_2+\phi_3+\phi_4)\cos(\phi_6) - \sin(\phi_2+\phi_3+\phi_4)\cos(\phi_5)\sin(\phi_6)
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
o_x = \;& \sin(\phi_1)\cos(\phi_5) + \sin(\phi_1)\sin(\phi_2+\phi_3+\phi_4)\sin(\phi_5) \\
o_y = \;& -\cos(\phi_1)\cos(\phi_5) - \cos(\phi_1)\sin(\phi_2+\phi_3+\phi_4)\sin(\phi_5) \\
o_z = \;& -\sin(\phi_2+\phi_3+\phi_4)\sin(\phi_5)
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
p_x = \;& a_2\cos(\phi_1)\cos(\phi_2) + a_3\cos(\phi_1)\cos(\phi_2)\cos(\phi_3) - a_3\cos(\phi_1)\sin(\phi_2)\sin(\phi_3) \\
& + d_4\sin(\phi_1) + d_5\cos(\phi_1)\sin(\phi_2+\phi_3+\phi_4) \\
& - d_6\cos(\phi_1)\cos(\phi_2+\phi_3+\phi_4)\sin(\phi_5) + d_6\sin(\phi_1)\cos(\phi_5) \\
p_y = \;& a_2\sin(\phi_1)\cos(\phi_2) + a_3\sin(\phi_1)\cos(\phi_2)\cos(\phi_3) - a_3\sin(\phi_1)\sin(\phi_2)\sin(\phi_3) \\
& - d_4\cos(\phi_1) + d_5\sin(\phi_1)\sin(\phi_2+\phi_3+\phi_4) \\
& - d_6\sin(\phi_1)\cos(\phi_2+\phi_3+\phi_4)\sin(\phi_5) - d_6\cos(\phi_1)\cos(\phi_5) \\
p_z = \;& d_1 + a_2\sin(\phi_2) + a_3\sin(\phi_2)\cos(\phi_3) + a_3\cos(\phi_2)\sin(\phi_3) \\
& - d_5\cos(\phi_2+\phi_3+\phi_4) - d_6\sin(\phi_2+\phi_3+\phi_4)\sin(\phi_5)
\end{aligned}
$$

Pro snadnější pochopení výše uvedených rovnic se na obrázku 4.8 nachází schéma s umístěním lokálních souřadných systémů tak, jak byly použity pro jejich odvození. Tabulka 4.1 dále uvádí Denavit-Hartenberg parametry. Z obrázku 4.8 si lze všimnout, že všechny lokální osy x mají shodnou orientaci, a tedy v tabulce 4.1 chybí jeden ze čtyř základních parametrů (úhel mezi osami x), jelikož není potřeba. Hmotnost a pozice těžiště nejsou pro rovnice kinematiky potřebné, ale zůstávají pro úplnost uvedeny.



Obrázek 4.8: Lokální souřadné systémy kinematiky robotického manipulátoru UR10e. Převzato z [26].

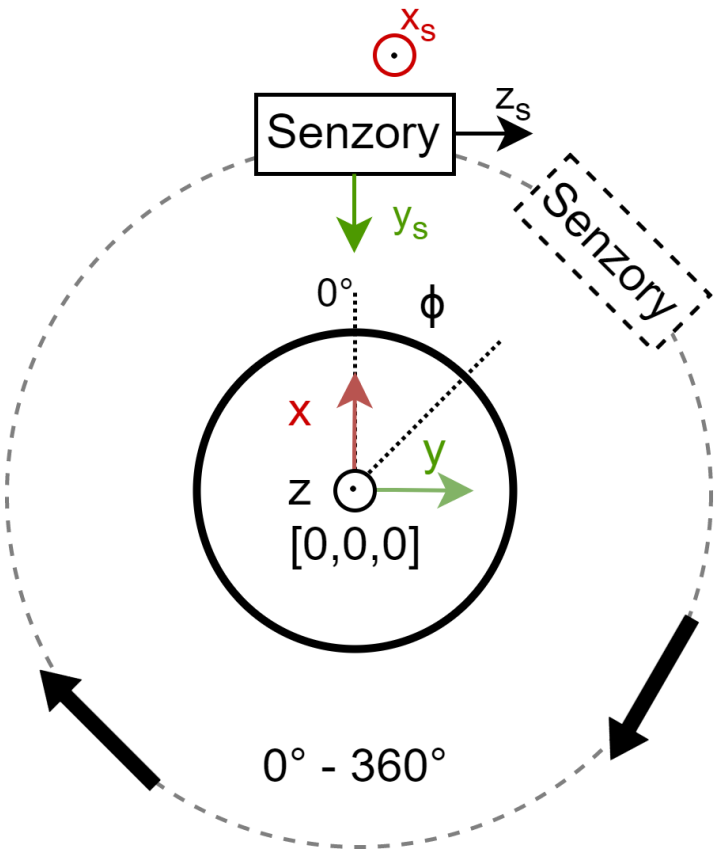
	a[m]	d[m]	α[rad]	Hmotnost[kg]	Pozice těžiště[m]
Kloub 1	0	0.1807	$\pi/2$	7.369	[0.021, 0.000, 0.027]
Kloub 2	-0.6127	0	0	13.051	[0.38, 0.000, 0.158]
Kloub 3	-0.57155	0	0	3.989	[0.24, 0.000, 0.068]
Kloub 4	0	0.17415	$\pi/2$	2.1	[0.000, 0.007, 0.018]
Kloub 5	0	0.11985	$-\pi/2$	1.98	[0.000, 0.007, 0.018]
Kloub 6	0	0.11655	0	0.615	[0, 0, -0.026]

Tabulka 4.1: DH parametry robotického manipulátoru UR10e. Volně převzato ze stránek výrobce [27].

Rovnice inverzní kinematiky robotického manipulátoru nejsou uvedeny, jelikož nejsou podstatnou součástí práce. Jejich analytické řešení lze nalézt v [26]. Nedílnou součástí robotického manipulátoru UR10e je počítač, který inverzní kinematiku počítá a je schopen vypočíst výsledné požadované úhly jednotlivých kloubů pro žádanou polohu koncového efektoru. Proces umí také zvolit úspěšné řešení v případě singularit.

Problémem nicméně zůstává orientace senzorů, během měření, vzhledem k měřenému motoru umístěném na pevné podložce, jelikož ta se mění s orientací koncového efektoru. Je tedy potřeba provést rotaci souřadného systému senzoru, který

je s tělem senzoru pevně spojen a předem definován v technické dokumentaci, do pevného souřadného systému, ve kterém je umístěn měřený motor.



Obrázek 4.9: Orientace souřadného systému senzorů vzhledem k souřadnému systému měřeného motoru (uprostřed, plnou čarou).

Jak byly během měření vzájemně orientovány souřadné systémy senzorů a motoru odhaluje obrázek 4.9. Překlad měřených dat do souřadného systému motoru byl dle schéma v obrázku proveden jako

$$\mathbf{b}_x = -\cos(\phi)\mathbf{b}_{sy} + \sin(\phi)\mathbf{b}_{sz}, \tag{4.7}$$

$$\mathbf{b}_y = -\cos(\phi)\mathbf{b}_{sz} - \sin(\phi)\mathbf{b}_{sy}, \tag{4.8}$$

$$\mathbf{b}_z = \mathbf{b}_{sx}, \tag{4.9}$$

kde $\mathbf{b}_x$ je složka vektoru magnetické indukce v ose x souřadného systému měřeného motoru, $\mathbf{b}_{sy}$ je složka vektoru magnetické indukce v ose y souřadného systému senzoru, $\mathbf{b}_{sz}$ je složka vektoru magnetické indukce v ose z souřadného systému senzoru

a úhel ϕ je úhel rotace senzorů ke středu souřadného systému motoru. Význam symbolů $\mathbf{b}_y$, $\mathbf{b}_{sz}$, $\mathbf{b}_{sy}$, $\mathbf{b}_z$ a $\mathbf{b}_{sx}$ lze z výše uvedeného vyvodit.

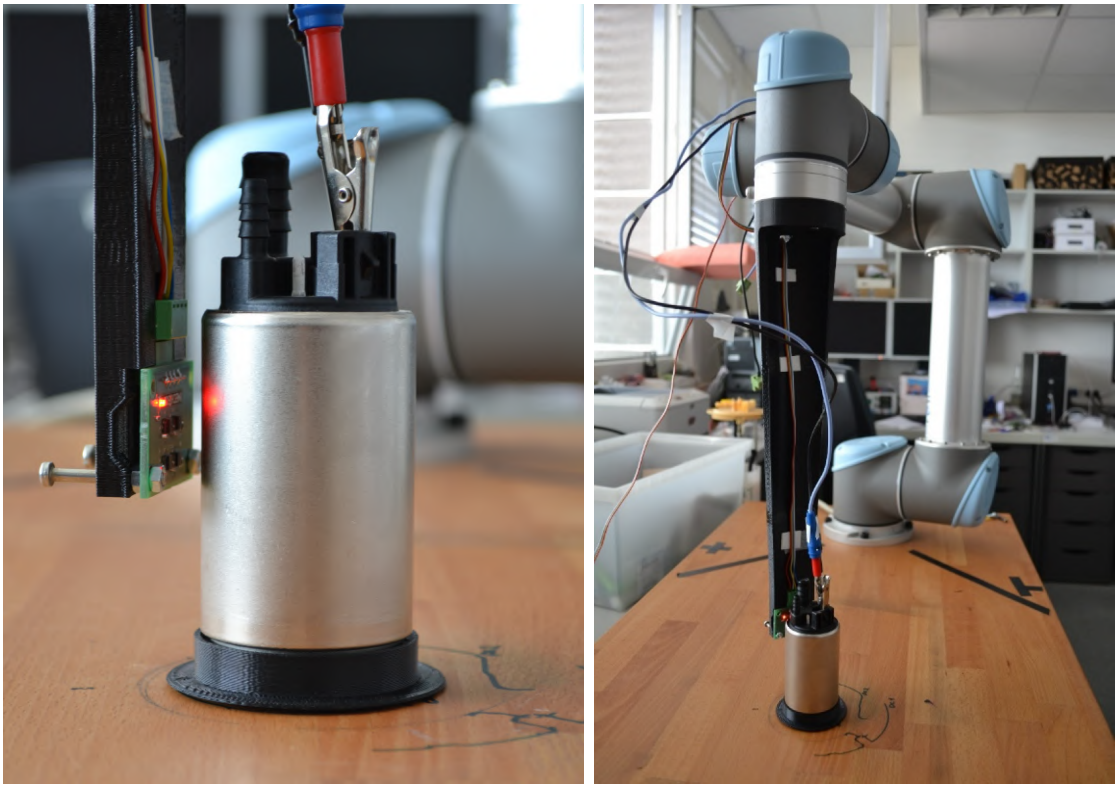
Polohování senzorů, a vlastně celý pohyb robotického manipulátoru v souřadném systému měřeného motoru, bylo zajištěno kontrolním skriptem v programu MATLAB, který generoval polohy koncového pro každý bod měření. Tím se vytvořila trajektorie pro několikavrstvou obálku, ve které byl následně motor změřen.

Postup měření řízeného kontrolním skriptem byl následující:

- Otevřel se port pro komunikaci mezi mikrokontrolérem a počítačem.
- Robot byl odeslán do výchozí polohy před začátkem měření.
- Podle předem daných parametrů byla vygenerována trajektorie bodů ve kterých bylo následně měřeno.
- Ve smyčce se následně vykonávalo pro všechny měřicí body:
  - Posun efektoru do polohy pro další bod měření.
  - Odeslání příkazu pro sejmutí jednoho vzorku měření do senzorů.
  - Vyčtení naměřených dat a jejich uložení.
- Návrat robota do výchozí polohy.
- Uzavření komunikačního portu.
- Uložení dat do struktury k pozdějšímu zpracování.

Robotické měřicí stanoviště v akci lze vidět na obrázku 4.10. Měření s tímto stanovištěm jsou relativně jednoduchá, avšak pořizovací cena robotického manipulátoru je vysoká, jelikož se jedná o stroj pro průmyslové aplikace. Další nesnází zůstává i vedení kabeláže k měřenému motoru a senzorům, jejíž řešení znesnadňuje fakt, že se rameno manipulátoru pohybuje kolem měřeného motoru, jak lze vidět na zmíněném obrázku.

K překonání nevýhod tohoto stanoviště bylo potřeba navrhnout stanoviště takové, které by bylo levné a poskytlo možnost s dostatečnou přesností dosáhnout požadovaných výsledků. Návrh právě takového stanoviště je popsán v následující kapitole 4.5.



Obrázek 4.10: Robotické stanoviště během měření DC motoru.

4.5 Návrh vhodného měřicího stanoviště

V této kapitole je podrobně představen návrh vhodného měřicího stanoviště, které umožňuje provádět požadovaná měření a zároveň je cenově dostupné. Současně stanoviště řeší nedostatky stanoviště robotického, o kterém pojednávala předchozí kapitola.

4.5.1 Požadavky na stanoviště

Hlavními kritérii, které by měl návrh vhodného stanoviště splňovat, tak aby se docílilo maximální jednoduchosti a cenové dostupnosti, jsou následující:

- Celková nízká cena komponent.
- Jednoduchá výroba a kompletace.
- Snadno dostupné nebo tisknutelné mechanické komponenty.
- Schopnost měřit v plném rozsahu okolí měřeného motoru, po celé jeho výšce.
- Snadné uchycení měřeného motoru.

- Absence velkých pohyblivých částí v okolí měřeného motoru.
- Minimalizace vlivu stanice na měření.
- Celková velikost vhodná pro pracovní stůl.

Výše uvedená kritéria se zaměřují na mechanickou část návrhu. Ze zaměření této disertační práce ovšem vyplývají i konkrétní požadavky na elektroniku stanoviště. Těmi jsou:

- Schopnost spínat DC i BLDC motory.
- Napájet motory až 12V a 2A kontinuálně.
- Řídit všechny pohyblivé části stanoviště.
- Číst data až ze 16 senzorů současně.
- Komunikovat s obslužným počítačem.

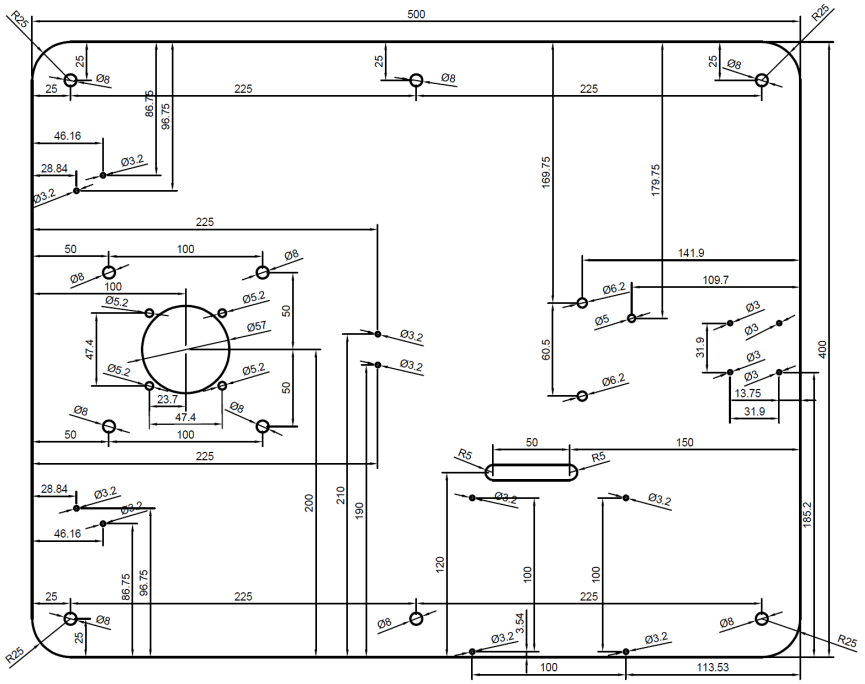
Na základě výše uvedených požadavků byl následně představen následující návrh řešení stanoviště, který zahrnuje řezané díly z plexiskla, tištěné plastické komponenty, rotační podložku pro měřený motor a lineární posuv pro senzory poháněné dvěma krokovými motory, vertikální senzorickou desku, vlastní řídicí elektroniku a mnoho dalšího.

4.5.2 Mechanika stanoviště

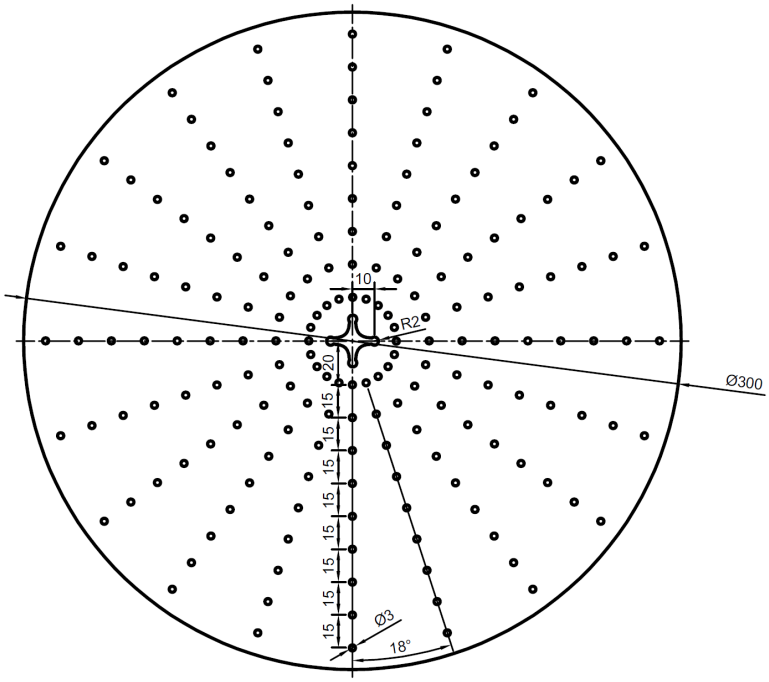
Aby mohly být splněny první 3 body z požadavků na mechaniku stanoviště, byl jako materiál základny zvolen plexisklo. Tento materiál poskytuje dostatečnou mechanickou stabilitu, je levný a lze jej snadno mechanicky opracovat pomocí laserové řezačky.

Na obrázku 4.11 lze vidět konstrukční výkres základny z plexiskla se všemi úchytnými otvory pro umístění dalších částí měřicího stanoviště. Základní deska je podepřena pomocí šesti tištěných noh, které usnadňují manipulaci se stanovištěm a vytváří rovněž nutný prostor pro umístění krokového motoru pohánějícího rotační platformu (fotografii celého stanoviště včetně tištěných noh lze vidět na konci této podkapitoly na obrázku 4.18).

Pro umístění a uchycení měřeného motoru byla navržena kruhová platforma s úchytnými děrami, rovněž vyrobená z plexiskla, jejíž výkres lze vidět na obrázku 4.12. Montážní díry slouží k zprostředkování různých možností úchytu pro mnoho rozdílných velikostí měřených motorů. Prvotní zamýšlenou aplikací však je jednoduché vložení tištěného úchytu, ve kterém bude měřený motor vsazen.

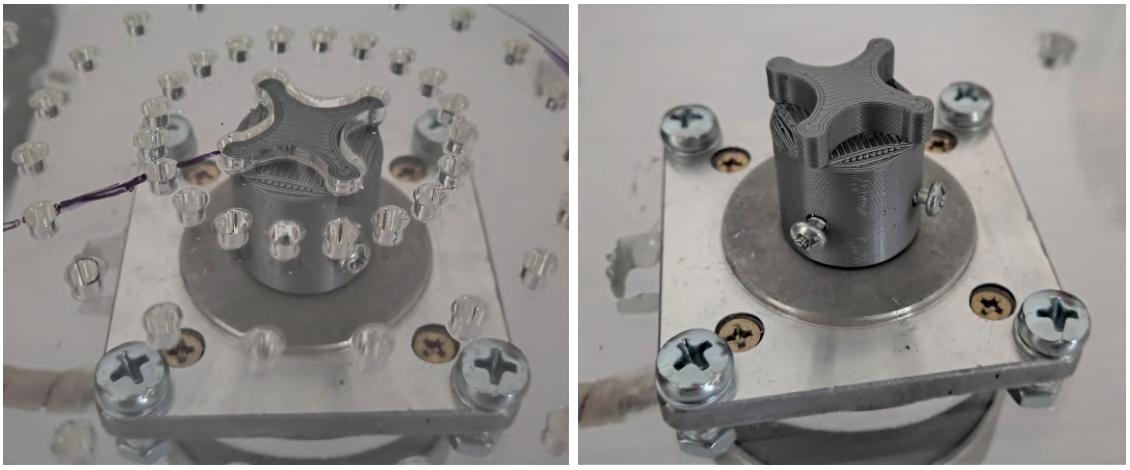


Obrázek 4.11: Výkres základní desky stanoviště.



Obrázek 4.12: Výkres rotační platformy s montážními děrami pro uchycení měřených motorů.

Žádaný pohyb kruhové platformy je umožněn díky speciálnímu návrhu tištěné distanční spojky mezi krokovým motorem ovládajícím pohyb platformy, který je umístěn zespodu základní desky, a platformou samotnou (obrázek 4.13), a také díky uložení na třech ložiscích s rozestupem 120°. Jedno takové ložisko je viditelné na obrázku 4.14 i s tištěným držákem).

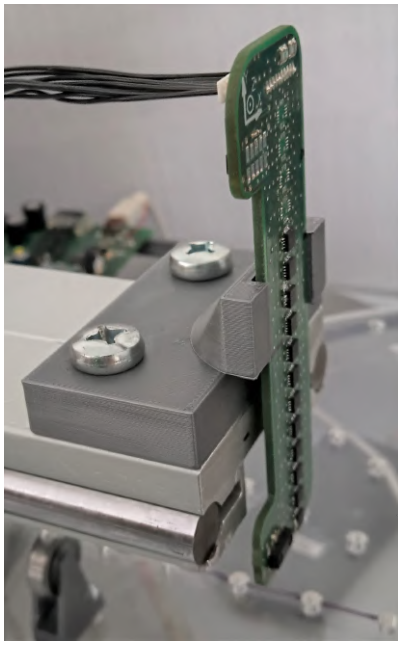


Obrázek 4.13: Tištěná spojka krokového motoru s rotačním podstavcem pro úchyt měřených motorů. *Vlevo*: s uloženou platformou, *vpravo* - bez platformy.

Z výše uvedeného je zřejmé, jak je zajištěn rotační pohyb motoru a tedy potřeba měřit v rozsahu 360°. Měření v různých vzdálenostech od motoru umožňuje lineární posuv, na jehož čele je umístěna DPS se senzory, které jsou umístěny ve vertikální řadě (více k DSP se senzory lze nalézt v kapitole 4.5.3) a je k vidění na obrázku 4.15. Pro realizaci lineárního posuvu bylo zvoleno použití průmyslové řešení skládající se z nerezového lineárního vedení a vozíku s ložisky. Toto řešení se obvykle používá tak, že po staticky ukotveném vedení pojíždí vozík. Avšak v tomto případě bylo výhodné situaci obrátit, staticky ukotvit vozík a lineární vedení využít jako pohyblivou část.

Pohyb lineárního vedení je umožněn krokovým motorem, umístěným ze spodní části pomocí tištěného ozubeného spojení mezi hřídelí motoru a tištěným ozubením, nalepeném v drážce lineárního vedení, tak jak jej lze vidět na obrázku 4.16. Pro správnou funkci celé této sestavy bylo dále potřeba umístit uchycení obráceného vozíku posuvu do správné výšky. Toho bylo docíleno pomocí (opět) tištěného dílu úchytu, který lze vidět na obrázku 4.17. Pomocí 3D tisku bylo také řešeno uchycení krokového motoru pro lineární posuv, viditelný na stejném obrázku.

Obrázek 4.14: Valivé ložisko s tištěným úchytem pro uložení rotační platformy.



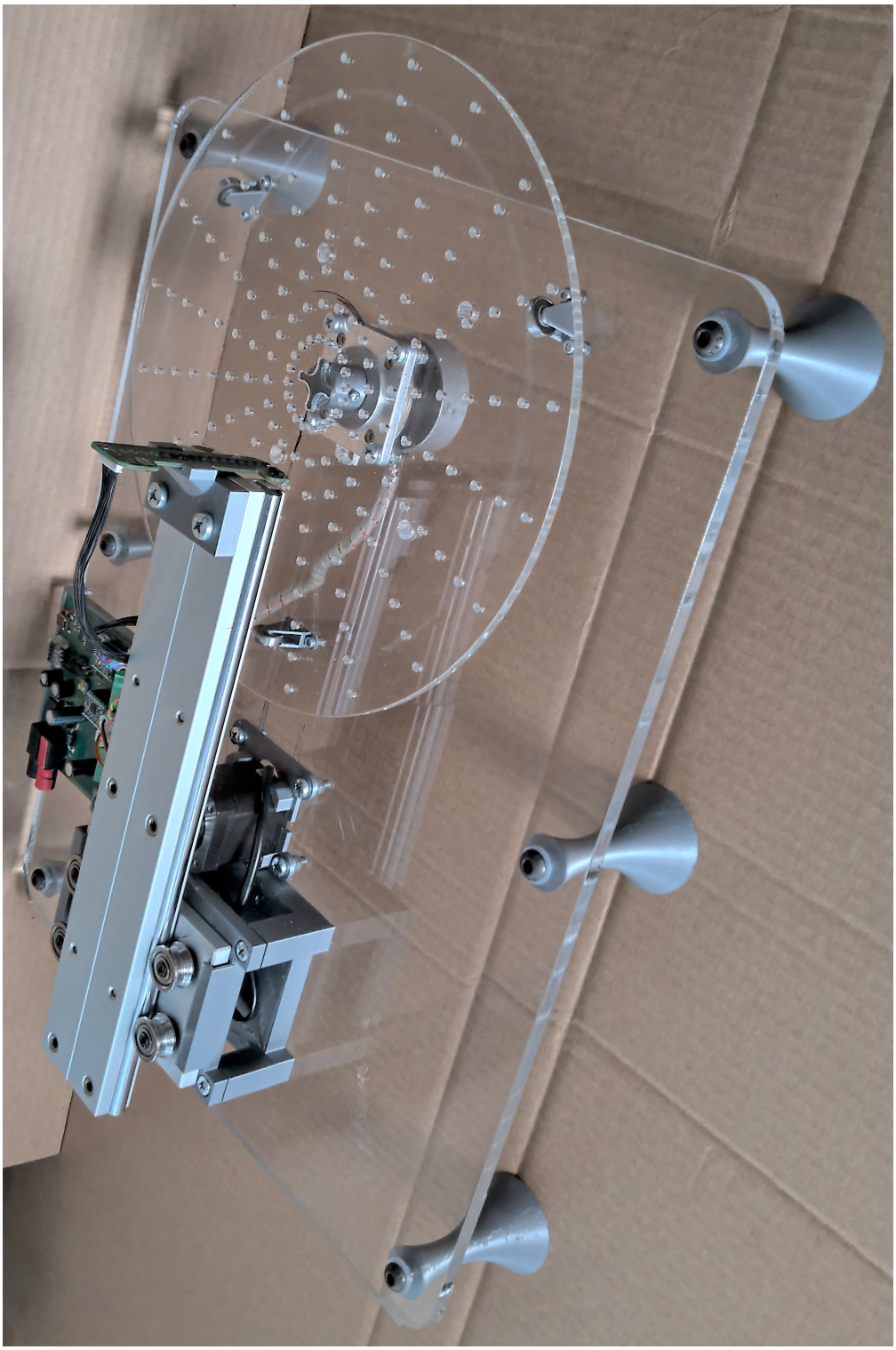
Obrázek 4.15: Tištěný držák pro DPS se senzory umístěný na čele lineárního posuvu.

Obrázek 4.16: Detail tištěného ozubeného spojení krokového motoru s lineárním posuvem, přes ozubení umístěné do drážky posuvu.

Obrázek 4.17: Držák vozíku lineárního posuvu a poháněj́ící krokový motor.

Měřené motory byly umísťovány do tištěných úchytů, které byly připraveny tak, že zapadaly do úchytných děr na rotační podložce. Díky tomuto přístupu mohlo být vždy zajištěno optimální uchycení všech měřených motorů, jelikož každý motor měl vyroben úchyt přesně na míru. Motory během měření v tištěných úchytech usazených do rotační platformy lze vidět dále na obrázcích 5.10, 5.14, 6.14 a 6.19.

Pomocí tištěných úchytů, nebo řezů do základnové desky stanoviště je dále řešeno uchycení řídicí desky, uchycení domku pro vozík lineárního posuvu, vedení kabeláže k motoru rotační platformy a jeho uchycení, atd. Fotografii celého stanoviště lze vidět na obrázku 4.18.



Obrázek 4.18: Foto celé měřicí stanice.

4.5.3 Elektronika stanoviště

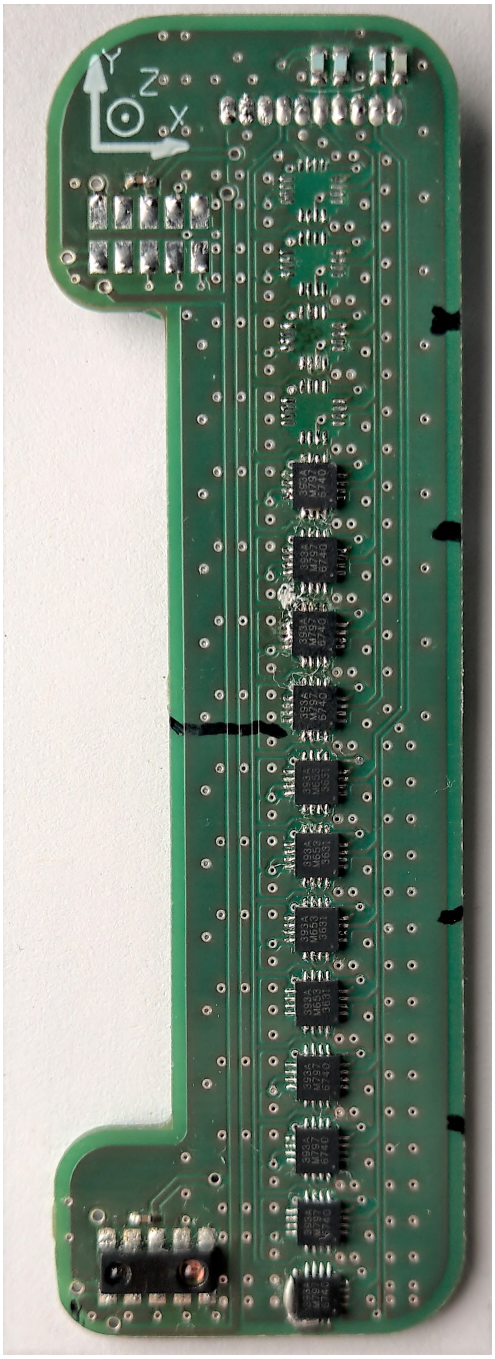
Senzorická deska

Návrh podoby desky plošných spojů na které jsou senzory umístěny je ovlivněn celkovou navrhovanou podobou stanoviště. Vybrané senzory (kapitola 4.2) umožňují umístění až 16 na jednu sběrnici. Toho bylo využito a na desku bylo umístěno 16 senzorů ve vertikální linii s rozestupem 5mm, což umožňuje měřit motory do výšky zhruba 80mm.

Tento výškový rozsah je dostatečný pro většinu elektrických strojů ve výkonovém spektru, jenž je předmětem zájmu této práce, a odpadá tak potřeba posuvu senzorů ve vertikálním směru.

Jedním z důležitých prvků návrhu je napojení senzorů na celkem 2 I^2C sběrnice, což má za následek dvě důležité výhody. První je redukce celkové času potřebného pro spuštění měření a následné vyčtení měřených dat, což má za následek hladší a rychlejší průběh měření. Druhou výhodou je fakt, že v případě potřeba lze navrhnout senzorickou desku takovou, která bude moci obsahovat až 32 senzorů (po 16-ti na každé sběrnici) a výrazně tak zvětšit měřený vertikální rozsah.

Na desce jsou dále umístěny 2 senzory vzdálenosti, jeden v horní a jeden v dolní části. Tyto umožňují funkcionalitu udržování konstantní vzdálenosti od měřeného tělesa v případech, kdy by obvod nebyl kruhový nebo byl jinak asymetrický.



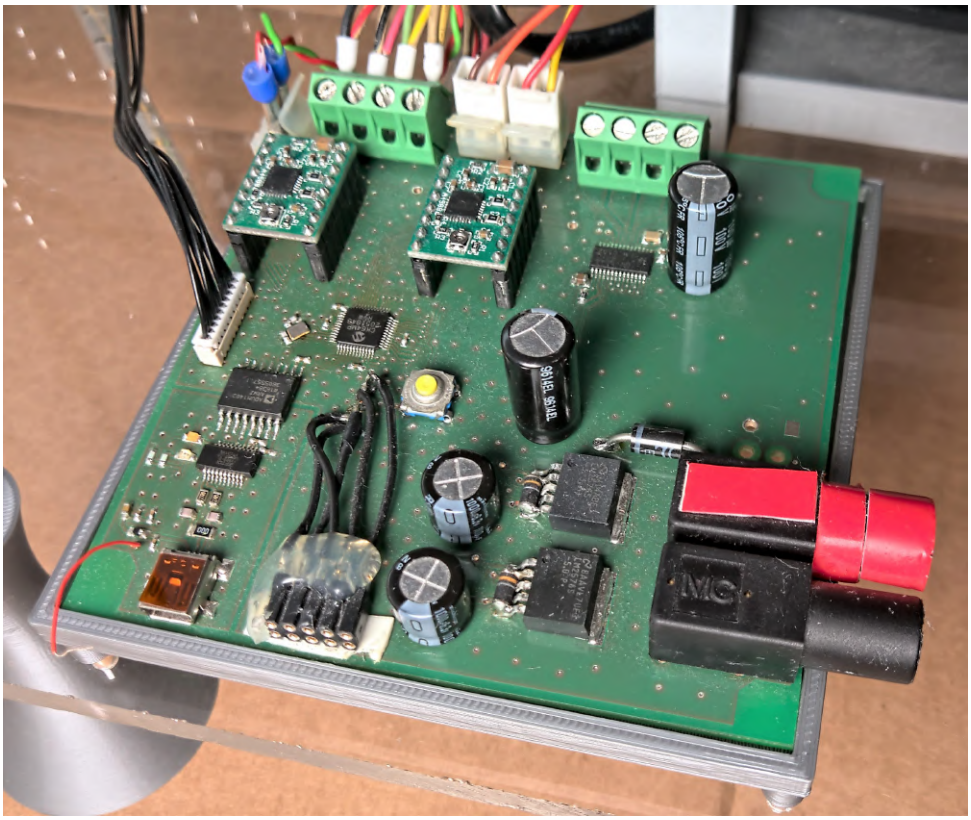
Obrázek 4.19: Foto senzorické desky osazené 12-ti senzory magnetické indukce a jedním senzorem vzdálenosti.

Řídicí deska

O obsluhu celé měřicí stanice se stará mikrokontrolér *dSPIC33CK64MP205* od firmy *Microchip* [28]. Tento 16-ti bitový mikrokontrolér byl vybrán, jelikož obsahuje všechny potřebné periferie v dostatečném množství, zejména co se komunikační sběrnice I^2C týče.

Na této kontrolní DPS se dále nachází dva zdroje napětí - 3.3V a 5V [29], dále integrovaný obvod pro řízení měřených DC a BLDC motorů [30], konektory pro 2 integrované obvody pro řízení krokových motorů [31], které jsou již umístěny na malé vývojové desce, dále galvanicky izolovaný [32] UART-USB konvertor pro komunikaci s PC [33], konektory pro programování, napájení, připojení krokových a měřeného motoru, konektor pro koncový spínač lineárního posuvu a konektor připojující senzorickou desku. V neposlední řadě různé R,L,C součástky náležící k některým z integrovaných obvodů.

Přívod napájení pro desku a měřené motory je zajištěn skrze banánkové konektory pro snadné připojení laboratorního, nebo jiného zdroje. Na desku je potřeba přivést 12V stejnosměrného napětí a zdroj by měl být schopen dodat proud 5A kontinuálně, aby bylo možné pokrýt spotřebu měřeného motoru a zbývající elektroniky.



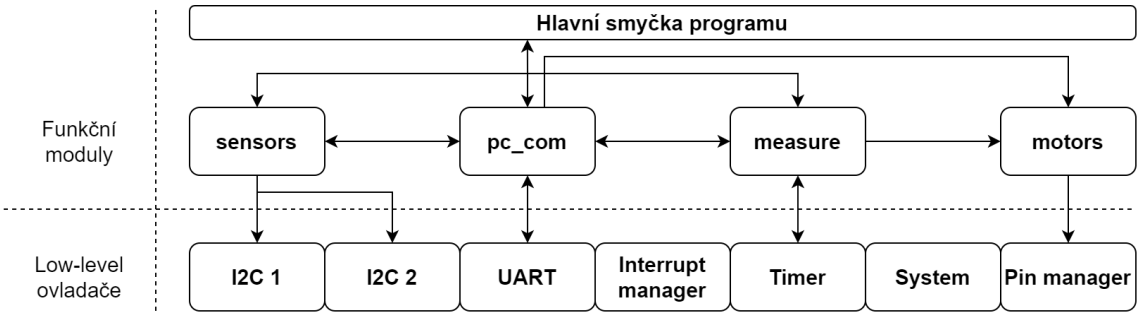
Obrázek 4.20: Foto řídicí desky.

4.5.4 Software

Firmware mikrokontroléru

Vzhledem k vybranému mikrokontroléru *dsPIC33* od firmy *Microchip* bylo jako vývojové prostředí zvoleno *MPLAB X IDE* od stejné firmy [34]. Jelikož se jedná o vývojové prostředí od stejného výrobce, je samozřejmostí množství dodatečné integrované funkcionality podporující jejich produktové řady. Jednou z nich, která byla využita pro urychlení vývoje kódu je *MPLAB Code Configurator* [35], který umí automaticky vygenerovat kód se základním nastavením vybraného mikrokontroléru. Pomocí tohoto nástroje lze snadno nastavit takt procesoru, nakonfigurovat funkcionality jednotlivých pinů, inicializovat jednotlivé hardwarové periferie a mnoho dalšího.

Na obrázku 4.21 je zobrazeno schéma jednotlivých vyvinutých funkčních modulů a vygenerovaných ovladačů jednotlivých periferií pro firmware mikrokontroléru měřicí stanice. Firmware je psaný v jazyce C a tedy se *modulem* rozumí pár zdrojového a hlavičkového souboru dohromady. Šipky mezi jednotlivými moduly pak naznačují vzájemnou výměnu dat nebo volání funkcí.



Obrázek 4.21: Schéma součástí firmwaru v mikrokontroléru.

Pro jednoduchost implementace běží celý program v nekonečné smyčce, kdy mikrokontrolér v podstatě jen čeká na příkaz přicházející z obslužné aplikace v počítači, který následně spouští vykonávání různých částí programu.

Jednotlivé moduly z vrstvy low-level ovladačů se ve zkratce zabývají:

- I2C 1,2: Datové struktury a funkce pro inicializaci a práci s I2C 1 a 2 periferiemi. Využity pro připojení senzorů.
- UART: Datová struktura a funkce pro inicializaci a práci s UART periferií. Využita pro komunikaci s PC.
- Timer: Datová struktura a funkce pro inicializaci a práci s periferií časovače. Použita pro řízení běhu měření.

- Pin manager: Inicializace a konfigurace pinů mikrokontroléru. Funkce pro ovládání výstupu digitálních pinů. Obsluha přerušení pro připojený koncový spínač. Využit pro zastavení motoru lineárního posuvu při dojezdu do koncové polohy.
- Interrupt manager: Konfigurace přerušení při inicializaci programu. Při běhu nevyužit.
- Sytem: Konfigurace systému při inicializaci programu. Při běhu nevyužit.

Komplexita celého běhu programu je implementačně rozdělena mezi všechny 4 funkční moduly. Jednotlivé moduly obsluhují následující funkcionalitu stanoviště.

- Modul **pc_com**: Vysílání a příjem komunikace mezi mikrokontrolérem a obslužným počítačem. Obsahuje funkce na kompozici zpráv oběma směry, a ve směru příjmu také jejich interpretaci. Při interpretaci přijímaných příkazů přímo volá funkce z jiných modulů, kterými může:
  - Nastavit lineární posuv nebo rotační platformu do žádané polohy.
  - Spustit nebo zastavit volný běh posuvu nebo platformy.
  - Číst data z jednotlivých nebo všech senzorů.
  - Spustit konfigurovatelné měření.
- Modul **sensors**: Funkce pro práci se senzory, kterými jsou např.
  - Nastavení parametrů jednotlivých senzorů.
  - Spuštění jednoho nebo kontinuálního měření.
  - Čtení měřených dat ze senzorů a jejich uložení do datové struktury.
- Modul **motors**: Funkce pro ovládání integrovaných obvodů, které přímo řídí spínání krokových motorů a také motoru měřeného. Dodatečně k tomu se také stará o sledování poloh lineárního posuvu a rotační platformy.
- Modul **measure**: Funkce pro obsluhu měření a přípravu měřených dat a údajů o polohách lineárního posuvu a rotační platformy.

Obslužný PC software

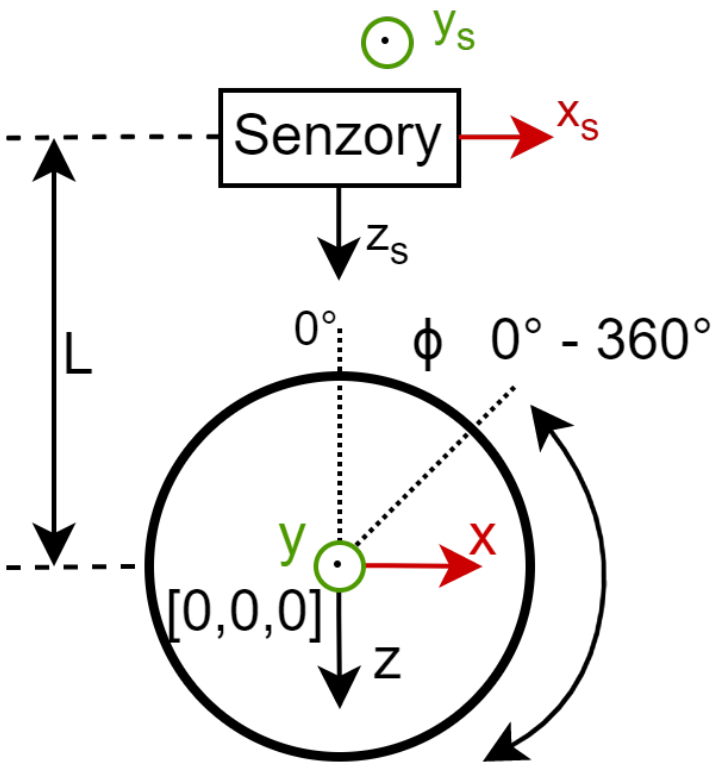
Již bylo zmíněno, že komunikaci mezi měřicím stanovištěm a obslužným PC zajišťuje UART-USB spojení pomocí konvertoru, ke kterému se lze z PC snadno připojit jako ke komunikačnímu COM portu. Jelikož vývoj komplexní uživatelské aplikace nebyl předmětem této práce, byl pro komunikaci se sériovým portem využit jednoduchý program *Termite* [36]. Ten umožňuje otevřít komunikační port, posílat a přijímat data také je ukládat to textového souboru pro pozdější zpracování.

Veškeré zpracování naměřených dat a generování obrázků z měření prezentovaných v této disertační práci bylo provedeno pomocí skriptů v programu *MATLAB*.

Ve skriptech proběhlo načtení dat uložených v textovém souboru do vnitřní struktury ve správném formátu, jejich očištění od komunikačního protokolu a přiřazení hodnot správným veličinám. Dále proběhlo uložení měřených dat do struktur vhodnějších pro snazší zpracování během vykreslování, a v neposlední řadě také získání několika základních parametrů měření jako jsou jeho úhlový rozsah, úhlový krok, počet senzorů, počet vrstev měřené obálky a souřadnice jednotlivých bodů měření.

Po zpracování dat do vhodné struktury byly prováděny požadované operace (detailněji o tom, co a jak bylo počítáno se lze dovědět v kapitolách 5 a 6) a různým způsobem vykreslovány získané veličiny. Před tím ovšem bylo potřeba provést správnou transformaci měřených veličin, jelikož byla odesílána přímo data měřená jednotlivými senzory.

Pro správnou interpretaci měřených dat ze senzorů, je tyto potřeba transformovat ze souřadného systému senzorů pohybujících se v jedné ose kolmo k měřenému motoru, do souřadného systému pevně spojeného se středem motoru rotujícího na rotační platformě. Schéma na obrázku 4.22 ukazuje sestavu těchto dvou souřadných systémů.



Obrázek 4.22: Schéma souřadného systému senzorů a souřadného systému motoru umístěném na rotační podložce.

Ve schéma na obrázku 4.22 vidíme v horní části souřadný systém senzorů ve kterém byly data měřeny , jenž se vzhledem k motoru může pohybovat podél osy z (senzory umístěny na lineárním posuvu). Vzdálenost, ve které se senzory od středu motoru nachází, je označena jako L. Ve středu motoru je umístěn globální souřadný systéme, který je s motorem pevně spojen a během měření magnetického pole na obálce okolo motoru ve vzdálenosti L společně s ním rotuje kolem osy y.

Pro správnou interpretaci dat tak, jako by byl souřadný systém motoru statický, přepočteme měřená data jako:

$$b_x = \cos(\phi)b_{sx} + \sin(\phi)b_{sz} \tag{4.10}$$

$$b_z = \cos(\phi)b_{sz} - \sin(\phi)b_{sx} \tag{4.11}$$

$$b_y = b_{sy} \tag{4.12}$$

kde b_x je x-ová složka magnetické indukce přepočtená do souřadného systému motoru, b_{sx} je x-ová složka magnetické indukce změřená senzorem, b_{sz} je z-ová složka magnetické indukce změřená senzorem a ϕ je úhel natočení rotační platformy na které je měřený motor umístěn. Obdobně lze získat významy dalších proměnných v uvedených rovnicích.

Výsledný vektor magnetické indukce získáme jako:

$$\mathbf{b} = [b_x, b_y, b_z] \tag{4.13}$$

Každý měřený vektor $\mathbf{b}$ byl změřen v bodě $P = (p_x, p_y, p_z)$, jehož složky lze vypočíst jako:

$$p_x = -L\sin(\phi) \tag{4.14}$$

$$p_z = -L\cos(\phi) \tag{4.15}$$

Poloha p_y je pro každý senzor dána jeho umístěním na senzorické desce (viz obrázky 4.15 a 4.19). Lze ji tedy snadno dopočítat ze znalosti jejich umístění. Díky souhlasné orientaci os y_s a y není potřeba žádný přepočet.

4.6 Metodika měření

Na začátku této kapitoly byly uvedeny 4 základní otázky, na které je potřeba nalézt odpověď, aby bylo možné sestavit správnou metodiku měření a interpretace unikajícího magnetického pole tak, jak to stanovuje *Cíl teoretický 1* této práce.

- Otázku "*Jak na magnetické pole nahlížet?*"se pokouší adresovat kapitoly 4.1 a 4.3.
- Otázku "*Jak pole měřit?*"se pokouší zodpovědět kapitoly 4.2, 4.4 a 4.5.

- Odpověď na otázku "*Jak spínat měřený motor?*"je závislá na typu měřeného motoru. Pro DC motory lze odpověď nalézt v kapitole 5.2.1 a pro BLDC v kapitole 6.2.1.
- Pro odpověď na otázku "*Kde pole měřit?*"lze najít úvod do problému v kapitole 4.1 a v závislosti na typu zkoumaného motoru přináší odpovědi kapitola 5.2.2 pro DC motory a kapitola 6.2.2 pro BLDC motory.

Odpovědi na otázky "*Kde měřit?*"a "*Jak spínat?*"jsou závislé od typu motoru. S vědomím tohoto faktu a přijmutí určitých zobecnění lze *metodiku diagnostiky malých elektrických strojů pomocí analýzy jejich vnějšího magnetického pole* zjednodušeně shrnout následovně:

- *Unikající magnetické pole z opláštění malých elektrických motorů je nutné měřit senzory s dostatečnou citlivostí na věrohodné měření polí magnetické indukce blízké intenzitě magnetického pole Země při povrchu.*
- *Vzhledem k prudce se měnící orientaci pole v určitých místech, je nutné, aby snímací část senzoru byla malá natolik tyto změny zachytit. Přesné polohování senzorů je proto velmi důležité.*
- *Při vizualizaci podoby pole je potřeba používat takové interpolační metody, jejichž metody nebudou v místech těchto prudkých změn vytvářet nepřesné lokální průběhy. Pro tento účel se lineární interpolace jeví jako dostatečná.*
- *Přímé měření intenzity pole přináší jen omezené množství informací. Více informací odhalí sledování změn pole při různých stavech měřeného motoru.*
- *Měřené DC nebo BLDC motory je potřeba spínat podle předem stanoveného postupu a výpočtem získat výsledné pole, která při porovnání s referencí odhalí směr rotace či správnost zapojení.*

5 Detekce směru rotace DC motorů

Tato kapitola se zabývá detekcí směru rotace kartáčového DC motoru, respektive vylepšením metody představené v kapitole 2.3. Veškerá tvrzení v této kapitole jsou představena a demonstrována pomocí sady měření provedených na stejném motoru jako v kapitole 4.1, tedy DC palivové pumpě pro nádrže benzínových automobilů, měřené při napětí 5V, protékajícím proudu 1.2A a přibližně 1420 ot./min, která je k vidění na obrázku 5.18 na konci kapitoly. V kapitole 5.3 jsou následně tvrzení ověřena pomocí dat z měření dalších typů DC motorů.

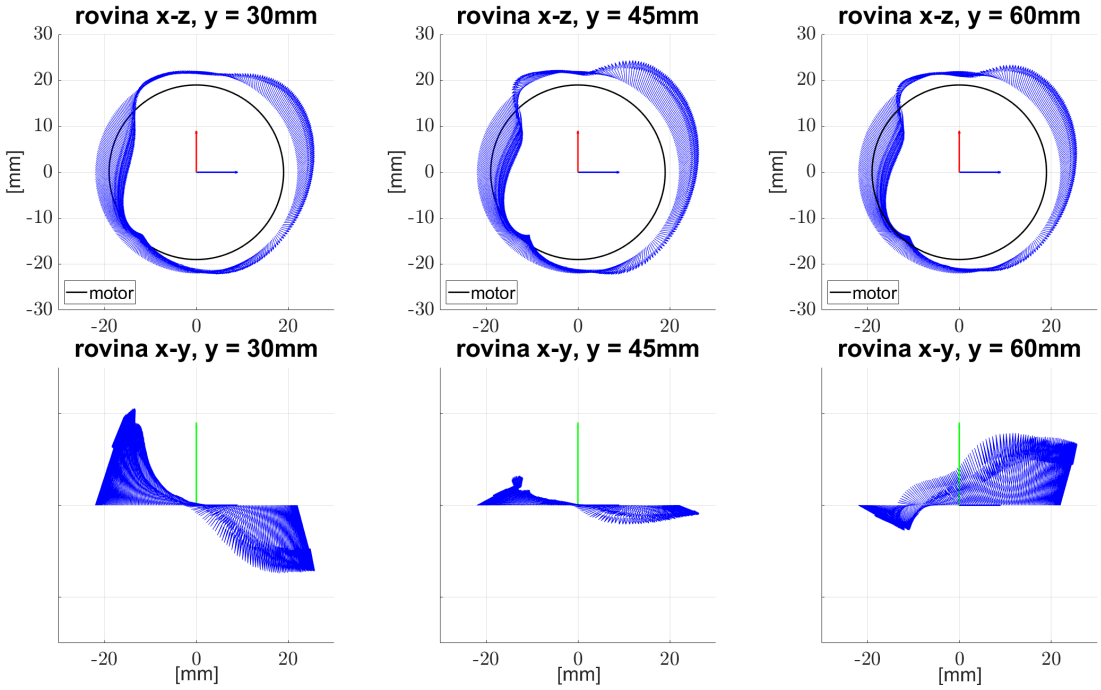
5.1 Unikající magnetické pole

V této podkapitole je na sadě měření představena a diskutována podoba unikajícího magnetického pole z opláštění malých kartáčových motorů. Jak je již diskutováno v kapitole 4.1, lze na unikající magnetické pole nahlížet několika možnými způsoby. Jeho komplikovaná podoba a prudké změny na malém prostoru představují vizualizační problém, zejména pokud jde o věrohodné zachycení dějů v trojrozměrném prostoru na pouze dvourozměrném obrázku.

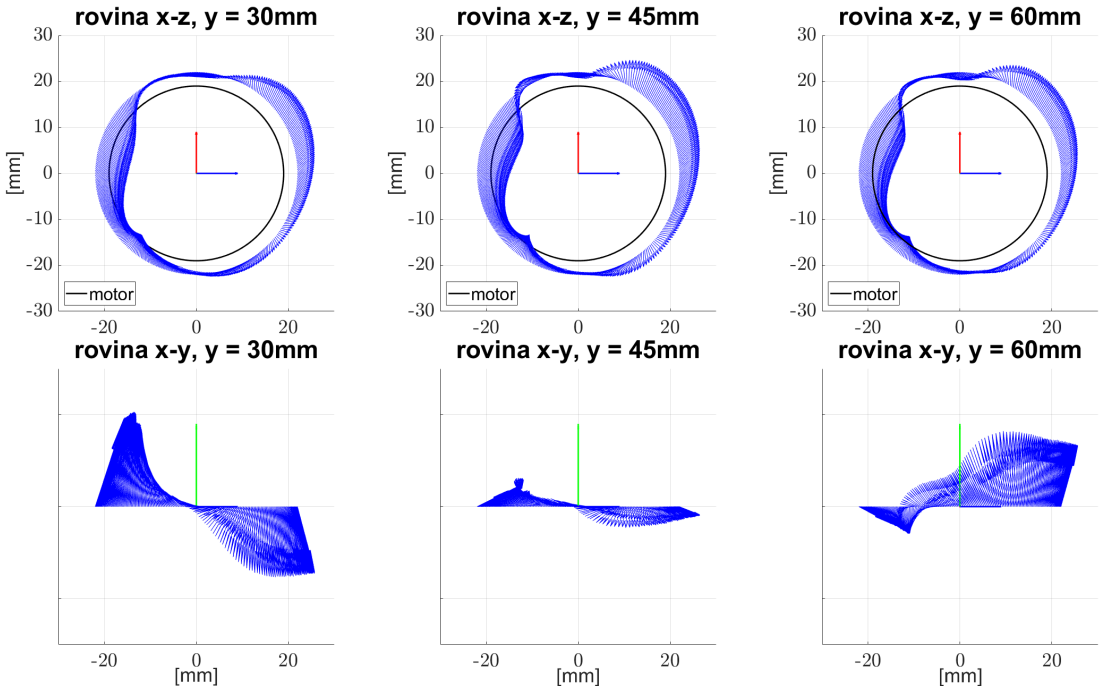
Na následujících obrázcích je magnetické pole vyobrazeno pomocí šipek znázorňujících jednotlivé vektory magnetické indukce. Vzájemná velikost vektorů na obrázcích je úměrná vzájemné velikosti měřené intenzity indukce, avšak měřítko není napříč obrázky shodné. Jinými slovy, mezi jednotlivými obrázky není zachována škála, ale je manipulována, aby bylo docíleno co nejlepší čitelnosti orientace pole. Na obrázcích kde reálná intenzita pole hraje roli, je škála intenzity zřetelně uvedena.

Podoba magnetického pole na následujících obrázcích je zobrazena pro dva směry rotace motoru označované jako *směr 1* a *směr 2* a nebo jako vypočtené rozdílové pole. *Směr 1* znamená, že svorky motoru označené jako $(+)$ a $(-)$ byly sepnuty tak, že na svorku $(+)$ byl přiveden kladný potenciál napájení (5V) a na svorku $(-)$ potenciál záporný. Pro směr 2 bylo zapojení právě opačné. Tato konvence je dodržována v celé kapitole. Úhlový krok všech měření je 1°.

Na obrázcích 5.1 a 5.2 lze vidět řezy polem v konstantní měřené vzdálenosti od motoru (obálce) o poloměru 22mm. Horní řada vyobrazuje podobu pole v řezu rovinou x-z a ve třech různých hodnotách výšky y od základny motoru. Spodní řada obrázků zobrazuje stejné pole v dané výšce y jako obrázek nad ve stejném sloupci, avšak z pohledu do roviny x-y. Více informací o tom, jaká je orientace os k motoru lze najít ve schéma na obrázku 4.22 a o tom jak byl motor měřen v příslušné kapitole.



Obrázek 5.1: Vektory magnetické indukce v okolí měřeného DC motoru. Řezy rovinou, poloměr 22mm, směr 1.



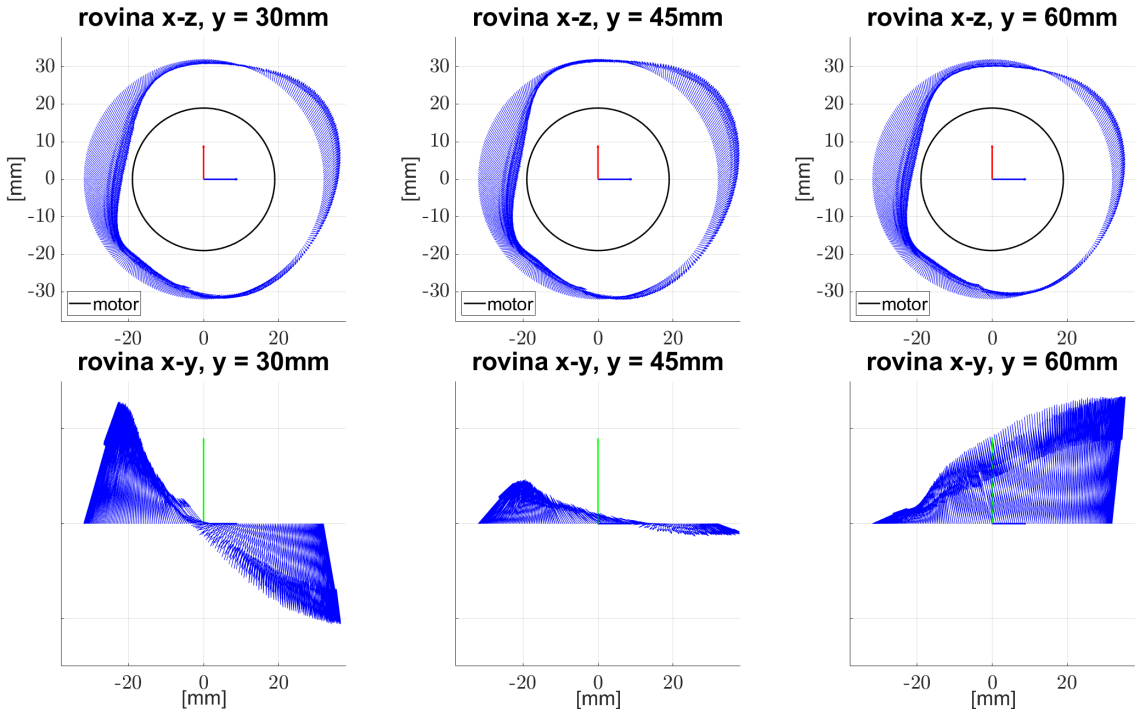
Obrázek 5.2: Vektory magnetické indukce v okolí měřeného DC motoru. Řezy rovinou, poloměr 22mm, směr 2.

Z obrázků 5.1 a 5.2 lze vyčíst, že při pohledu na pole seshora, tedy do roviny x-z, se orientace vektorů magnetické indukce může zdát přibližně konstantní. Ovšem při pohledu ze strany, tedy do roviny x-y, je odhaleno, že se pole podél délky motoru, tedy se změnou polohy v ose y, výrazně mění.

Lze vidět, že ve výšce $y = 30mm$ je pole v oblasti $-x$ orientováno do směru $+y$ a v oblasti $+x$ je orientováno ve směru $-y$. Avšak jak ukazují obrázky ve spodní řadě uprostřed a napravo, s posuvem v ose y se orientace mění tak, že ve výšce $y = 60mm$ je pole v oblasti $-x$ orientováno ve směru $-y$ a v oblasti $+x$ je orientováno ve směru $+y$. Jinými slovy se orientace pole podél délky motoru v ose y převrátí.

Dalším důležitým poznatkem je, že mezi magnetickými poli na obrázcích 5.1 a 5.2 je jen nepatrný rozdíl. Z toho vyplývá, že při měření absolutních hodnot a pozorování orientace pole jen při rotaci některým ze směrů, lze odhalit informaci o tom, kterým směrem se motor otáčí jen obtížně.

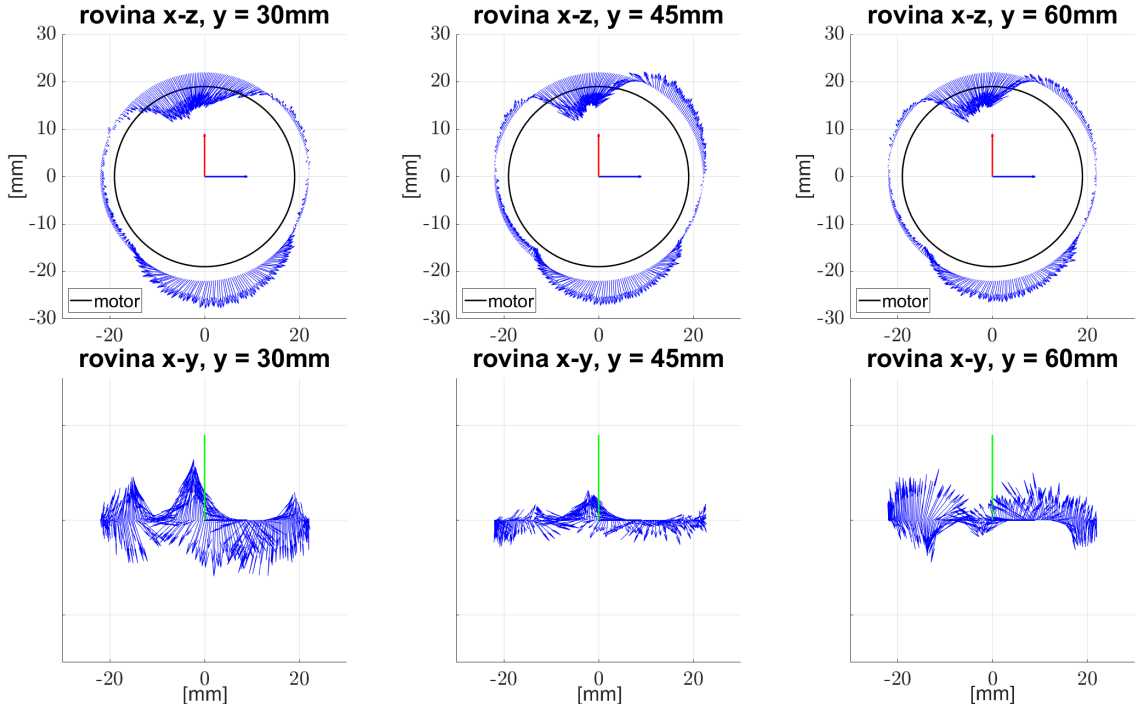
Podoba magnetického pole se ovšem nemění jen s výškou, ale také se vzdáleností od motoru, jak lze vidět na obrázku 5.3, jenž zobrazuje podobu magnetického pole pro *směr 1* rotace, ve vzdálenosti 32mm. V porovnání s obrázkem 5.1 lze vidět, že v této vzdálenosti je pole orientované v pohledu do roviny x-y, na totožných úrovních výšky y, zcela opačně. Tato změna nastala v rozdílu vzdáleností pouhých 10mm.



Obrázek 5.3: Vektory magnetické indukce v okolí měřeného DC motoru. Řezy rovinou, poloměr 32mm, směr 1.

Poněkud zajímavější vhled do magnetického pole přináší výpočet pole rozdílového, jenž lze vidět na obrázku 5.4. Jak bylo zmíněno v kapitole 2.3, metoda detekce směru rotace DC motorů z unikajícího magnetického pole využívá právě tohoto rozdílového pole.

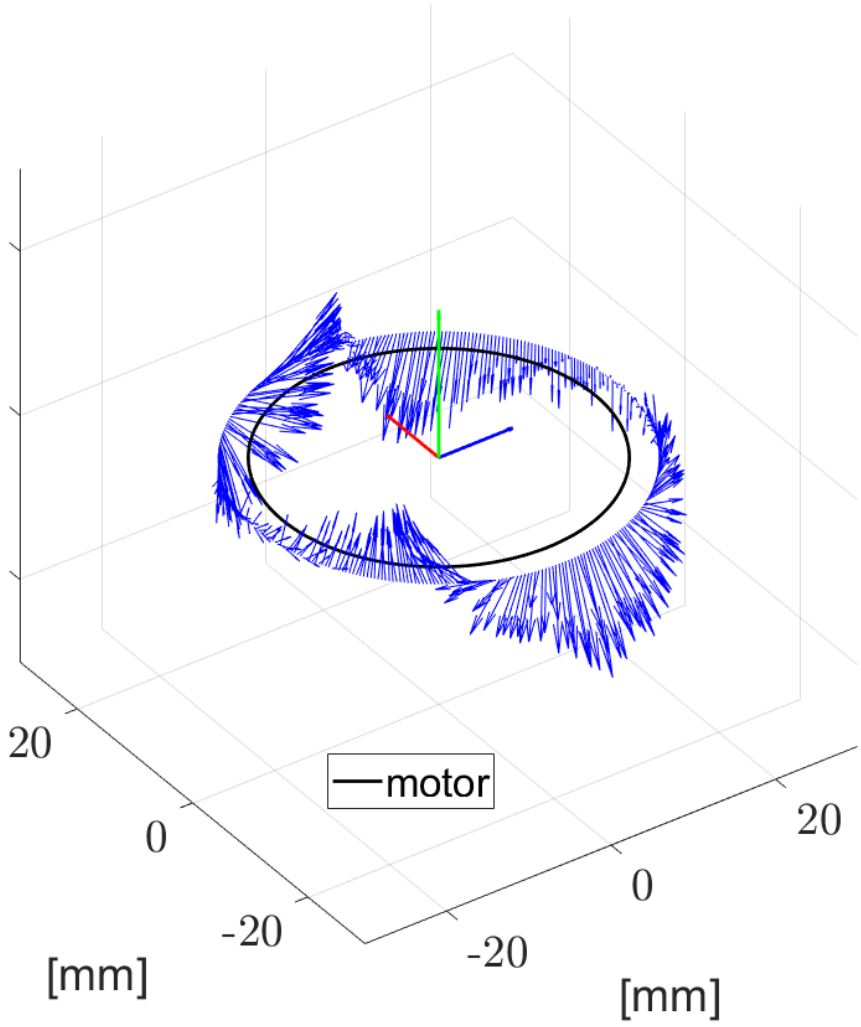
Rozdílovým polem je myšleno pole vypočtené jako rozdíl mezi polem změřeným pro *směr 1* a polem změřeným pro *směr 2*. Jak se vektor sestaví je popsáno v kapitole 5.2.1 pomocí rovnice 5.1. Tato konvence je nadále dodržována a veškeré zmínky o rozdílovém poli u DC motorů odkazují na pole vypočtené právě dle této rovnice.



Obrázek 5.4: Vektory magnetické indukce v okolí měřeného DC motoru. Řezy rovinou, poloměr 22mm, rozdílové pole.

Jak lze z obrázku 5.4 vidět, je výsledná podoba magnetického pole výrazně odlišná. V oblasti $+z$ je pole orientováno směrem ke středu motoru a oblasti $-z$ směrem z motoru ven. Právě v těchto místech se během měření nacházely mezery mezi statorovými magnety, což hraje důležitou roli v metodě detekce směru rotace, jak bude představeno dále.

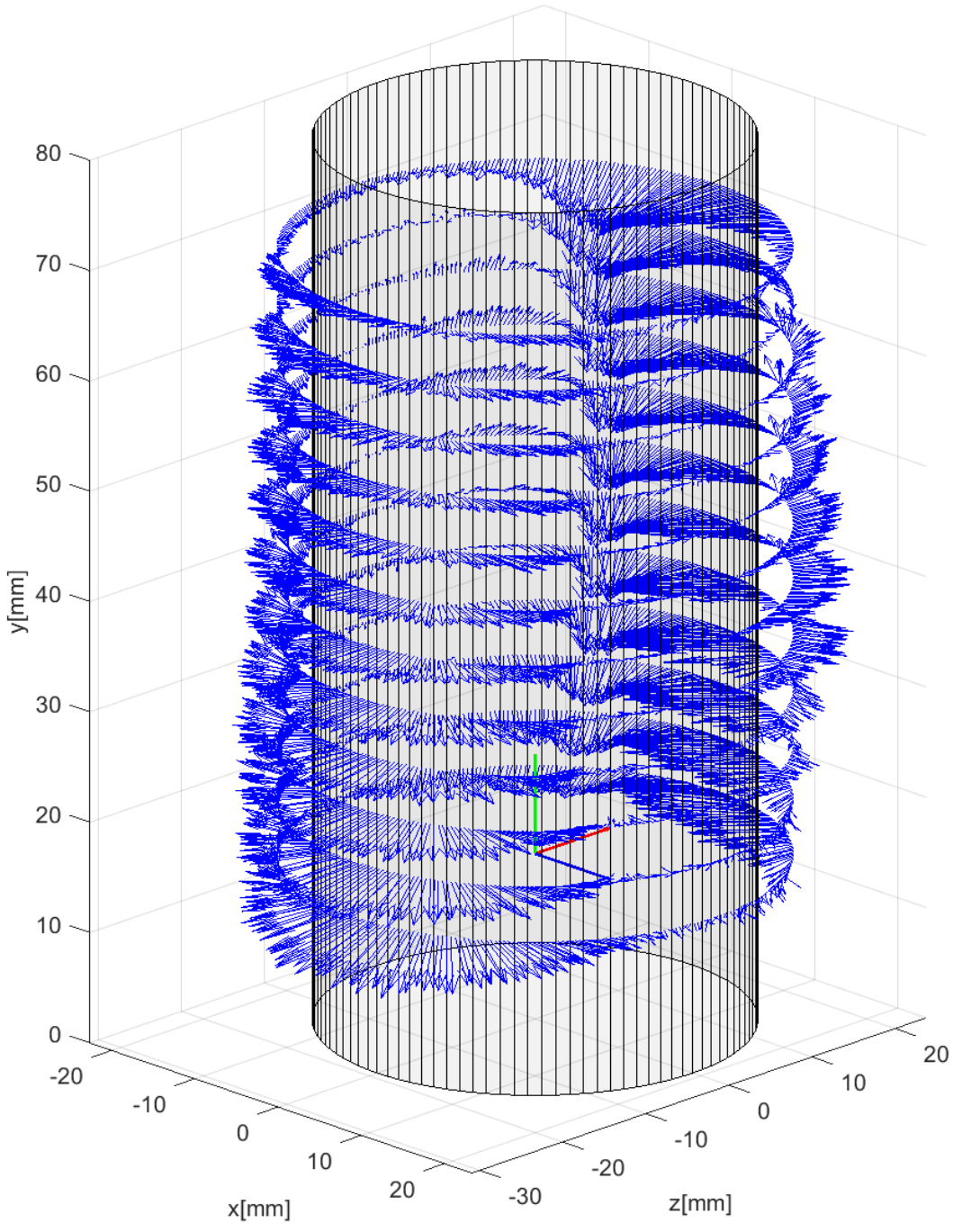
Pro lepší pohled do podoby rozdílového pole je na obrázku 5.5 vynesen řez ve výšce $y = 30mm$ v izometrickém pohledu. Z obrázku je lépe patrná prudkost změn orientace pole v určitých místech.



Obrázek 5.5: Vektory magnetické indukce v okolí měřeného DC motoru. Řez ve výšce y = 30mm, poloměr 22mm, rozdílové pole, izometrický pohled.

Zobrazíme-li rozdílové pole v celé obálce o konstantní vzdálenosti 22mm od motoru z izometrického pohledu, získáme obrázek 5.6. Lze vidět, že oblasti kde orientace pole směřuje do motoru a nebo ven z něj na opačné straně, jsou jasně zřetelné po celé délce motoru. Avšak jak již bylo představeno v předchozích obrázcích, orientace těchto míst v ose y se s výškou v ose y mění, což nemusí být z pohledu v tomto obrázku zcela jednoznačné.

Kombinací poznatků ze všech uvedených obrázků tak lze získat komplexnější představu o komplikovanosti orientace unikajícího pole, z čehož vyplývají důsledky pro metodu detekce směru rotace - jejího vylepšení, jež je představena v následující podkapitole.



Obrázek 5.6: Rozdílové pole v okolí měřeného DC motoru. Poloměr 22mm, izometrický pohled.

5.2 Vylepšení metody detekce směru rotace

5.2.1 Návrh vylepšení metody

Existuje komerční řešení pro detekci směru rotace DC motorů z unikajícího magnetického pole, jehož metoda fungování je popsána v kapitole 2.3. Hlavní nevýhoda metody je nedostatečná robustnost řešení související s podobností polí pro oba směry rotace, a z toho plynoucí nutností přesně polohovat senzor při měření do vhodné oblasti, jejíž omezená velikost je představena na obrázku 2.12.

Tyto nedostatky lze překonat, nebude-li pozorována změna mezi rotací a klidovým stavem, nýbrž změna mezi oběma směry rotace. Toto vylepšení bylo publikováno v časopise [1]. Oproti původní metodě vyžaduje toto vylepšení schopnost řídicího mechanismu spínat motor v obou možných směrech rotace. Dalším rozdílem je nutnost znát, který ze směrů je požadovaný / správný.

Postup měření a výpočtu vylepšené metody je následující:

1. Na svorky motoru je přivedeno napětí. Kladný potenciál na svorku + a záporný potenciál na svorku −. Motorem protéká proud a rotor se otáčí.
2. Je změřen vektor magnetické indukce $\mathbf{p}$.
3. Polarita napětí přivedeného na svorky motoru je obrácena. Kladný potenciál je připojen na svorku − a záporný potenciál na svorku +. Motorem protéká proud a rotor se otáčí opačným směrem.
4. Je změřen vektor magnetické indukce $\mathbf{n}$.

Tento postup platí jak pro měření vektoru magnetické indukce v jednom bodě, tak i pro měření celého okolí motoru.

Ze změřených polí se vypočte rozdílové pole magnetické indukce jako:

$$\mathbf{v} = \mathbf{p} - \mathbf{n} \tag{5.1}$$

Už ze samotné rovnice je patrná jedna z hlavních výhod tohoto vylepšení. Bude-li směr rotace opačný než-li je očekáváno, změní se orientace výsledného vektoru $\mathbf{v}$ přesně o 180°. Další výhodou je odolnost vůči vlivům magnetickému pozadí, jelikož je jednoduše odečteno. Určitými překážkami ovšem zůstávají potřeba nalezení vhodného místa pro aplikaci metody a potřeba výsledný vektor vyhodnotit - je potřeba reference. S oběma těmito body se vypořádávají dvě následující podkapitoly.

Je důležité podotknout, že výrazy *směr rotace* nebo *směr otáčení* a *správnost zapojení* jsou v případě kartáčových motorů zaměnitelné, jelikož zapojení přímo určuje směr rotace.

5.2.2 Kritéria optimálního místa pro měření

Z obrázků 5.1 až 5.6 je patrné, že orientace rozdílového pole se mění s polohou kolem motoru, a v některých místech velmi prudce. Stejně tak jako orientace pole se mění i jeho velikost, jenž, jak vyplývá z rovnice 5.1, je závislá na velikosti jednotlivých vektorů a jejich vzájemné orientaci v daných bodech měření. Je tedy zřejmé, že v místech kde si budou vektory $\mathbf{p}$ a $\mathbf{n}$ podobné, bude velikost rozdílového vektoru malá.

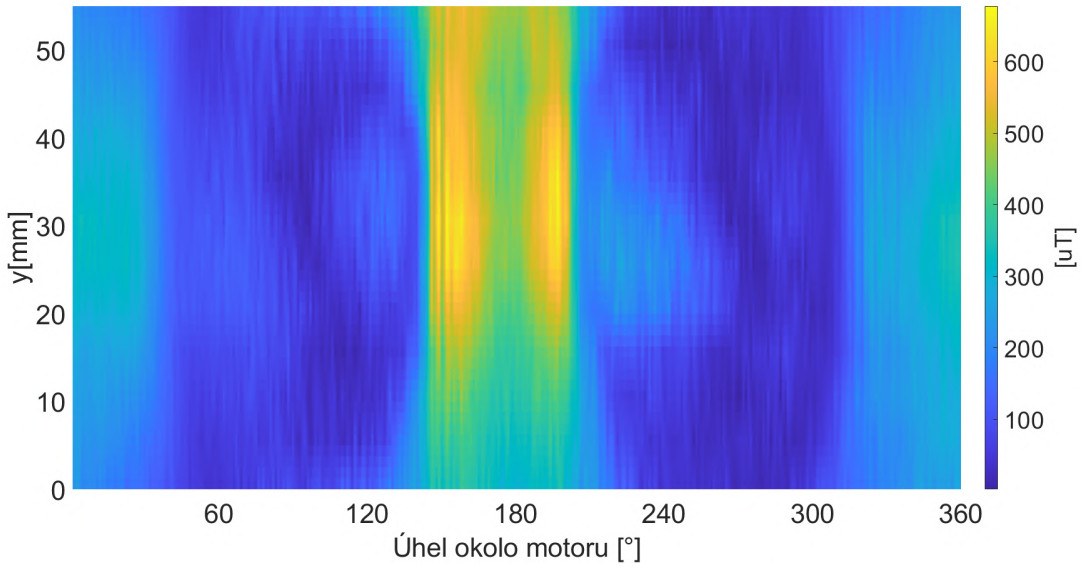
Z toho vyplývá, že vhodná místa pro aplikaci této vylepšené metody detekce musí splňovat následující:

- Velikosti vektorů $\mathbf{p}$ a $\mathbf{n}$ v daném bodě měření jsou co největší.
- Úhel mezi vektory $\mathbf{p}$ a $\mathbf{n}$ v daném bodě měření je co největší.

Neboli jinými slovy: *Nejvhodnější místo pro aplikaci vylepšené metody detekce směru rotace DC motorů je takové, kde velikost výsledného vektoru dle rovnice 5.1 je co největší.*

Vyneseme-li velikost tohoto výsledného vektoru do barevné mapy, dostaneme obrázek 5.7. Z obrázku je patrné, že taková oblast, kterou lze považovat ze vhodnější pro aplikaci metody, existuje. To ovšem neznamená, že mimo tuto oblast není metoda aplikovatelná, jak je dokázáno v kapitole 5.2.4.

Není náhodou, že oblast na obrázku nejvhodnější, tedy přibližně v oblasti $y \in < 20mm, 45mm > \cap\, x \in < 145°, 205° >$, se nachází v místech mezery mezi statorovými magnety. Právě zde je vliv pole generovaného protékajícím proudem nejsilnější.



Obrázek 5.7: Velikost vektorů rozdílového pole v okolí motoru na poloměru 22mm.

5.2.3 Algoritmus detekce směru rotace

Vylepšený algoritmus detekce směru rotace kartáčových motorů z unikajícího magnetického pole je následující:

1. **Změření referenčního vektoru / pole**.
   (a) Pomocí měření magnetického pole v celém okolí motoru dle postupu v kapitole 5.2.1, je určeno vhodné místo pro měření dle kritérií popsaných v kapitole 5.2.2. Pro měření musí být zaručeno aby byl motor zapojen a spínán správně.
   (b) Ve stanoveném vhodném místě je provedena řada měření a vypočítán referenční vektor $\mathbf{v}_{ref}$. Lze také změřit plnou obálku okolí motoru, nebo celou vhodnou oblast a vypočíst celé referenční pole.
   (c) Referenční vektor je uložen pro použití při měření daného typu motoru při pozdějším testu zapojení. Je rovněž nutné, aby při testu zapojení byly stejné podmínky měření jako při stanovení referenčního vektoru.
2. **Měření motoru pro zjištění směru rotace.**
   (a) Do určeného místa vhodného pro měření (stejně jako v případě měření referenčního vektoru / pole) je umístěn senzor a dle postupu popsaném v kapitole 5.2.1 je změřen vektor $\mathbf{v}_{mer}$.
   (b) Je vypočítán cosinus úhlu mezi $\mathbf{v}_{ref}$ a $\mathbf{v}_{mer}$ jako:

$$\cos(\varphi) = \frac{\mathbf{v}_{ref} \cdot \mathbf{v}_{mer}}{\|\mathbf{v}_{ref}\|\|\mathbf{v}_{mer}\|} \tag{5.2}$$

   (c) O směru rotace je rozhodnuto na základě splnění podmínky. Může nastat jedna ze tří možných situací.
      i. Jestliže $\cos(\varphi) > K$ pak řekneme, že se motor otáčel správně.
      ii. Jestliže $\cos(\varphi) < -K$ pak řekneme, že se motor otáčel nesprávně.
      iii. Jestliže $-K < \cos(\varphi) < K$ pak řekneme, že o správnosti směru rotace / zapojení nelze rozhodnout. V takovém případě je potřeba opakovat měření, zkontrolovat pozici senzoru a provedení experimentu.

   Konstanta K je zvolené kritérium vyhodnocení, kdy

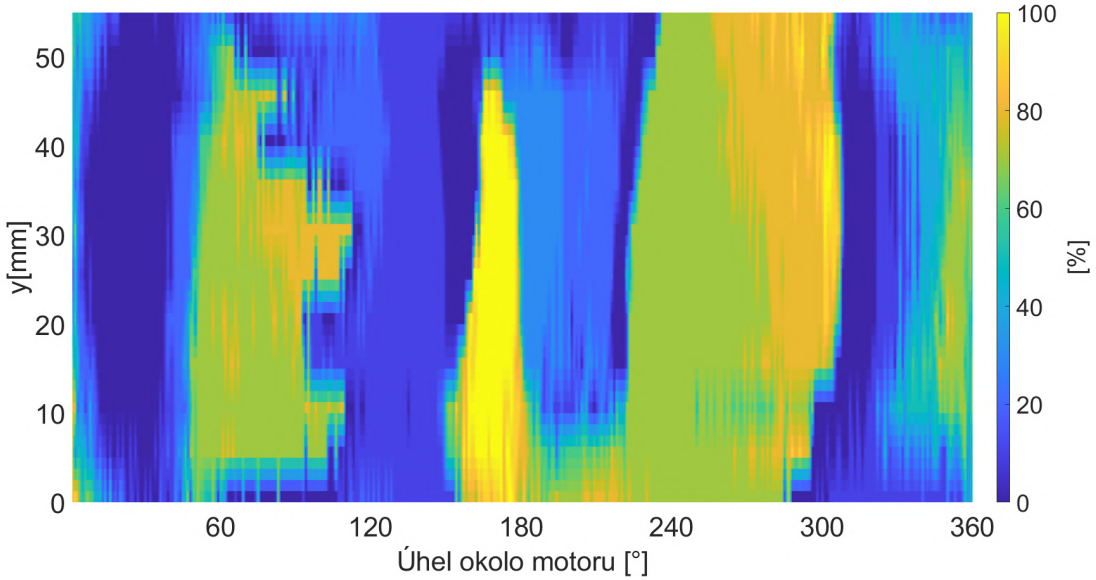
$$K = \frac{\sqrt{2}}{2} \tag{5.3}$$

Při vyhodnocování výsledku je potřeba dbát na to, aby pozice porovnávaných $\mathbf{v}_{mer}$ a $\mathbf{v}_{ref}$, ve kterých byly vektory měřeny, byly shodné. To hraje významnou roli zejména v případě, kdy bylo měření prováděno v oblasti a nikoliv jen v jednom bodě.

5.2.4 Experimentální ověření

Výše uvedený vylepšený algoritmus detekce směru rotace je porovnán s původním algoritmem (kapitola 2.3). Z technické dokumentace k senzoru aplikujícího původní metodu [37] a z výše uvedené vhodné optimální polohy pro aplikaci vylepšené metody lze zjistit, že uváděná vhodná poloha pro měření je shodná pro obě metody, tedy do mezery mezi statorovými magnety.

Pro lepší kvalitativní porovnání mezi úspěšností obou metod detekce, byly obě metody aplikovány v celém okolí měřeného motoru na statisticky významném souboru experimentálních měření. Měření byla provedena pro obě metody dle algoritmu uvedeném v kapitole 5.2.3 s tím rozdílem, že pro *původní metodu* bylo rozdílové pole počítáno z pole klidového a pole při správné rotaci motoru.



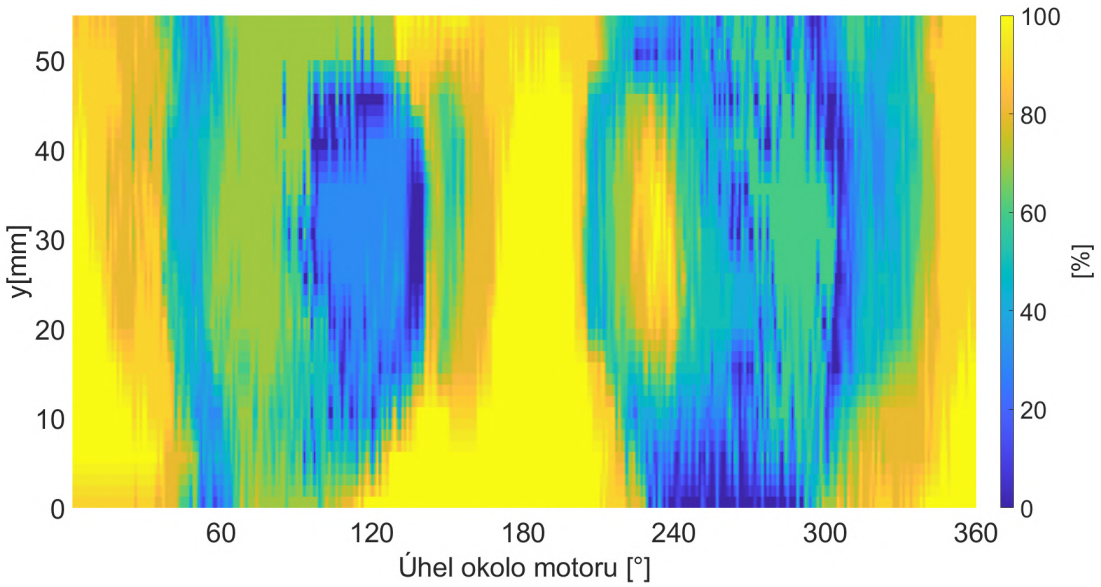
Obrázek 5.8: Úspěšnost aplikace *původního* algoritmu detekce směru rotace v celém okolí měřeného DC motoru.

Na obrázku 5.8 lze vidět procentuální úspěšnost aplikace *původní* metody detekce směru rotace v celém okolí (obálce) měřeného motoru. Lze vidět, že *původní* metoda je úspěšně aplikovatelná v mezeře mezi statorovými magnety (v blízkosti úhlu 180°), avšak tato oblast je rozměrově relativně malá. Lze si rovněž povšimnout, že hranice oblasti mezi úspěšnou aplikací metody a neúspěšnou aplikací je velice prudká.

Velice důležité zjištění ovšem přichází, porovnáme-li tento obrázek s obrázkem 2.12 v kapitole 2.3. Můžeme vidět, že oblast, která je podle obrázku 5.8 spolehlivá pro úspěšnost aplikace *původní* metody, neodpovídá oblastem s nejvyšší intenzitou z obrázku 2.12. Právě naopak, intenzita pole je v těchto místech relativně nízká.

Tento fakt hraje důležitou roli ve spolehlivosti metody, jelikož ji tak činí citlivější na velikost protékajícího proudu motorem a tedy intenzitu unikajícího magnetického pole.

Na obrázku 5.9 je vynesena procentuální úspěšnost aplikace *vylepšené* metody detekce směru rotace. Z porovnání obou obrázků lze zcela jednoznačně vidět, že oblast úspěšné aplikace je pro vylepšenou metodu výrazně rozsáhlejší, než pro metodu původní. Oblasti spolehlivosti rovněž korespondují s oblastmi nejvyšší intenzity pole, jak je ukázáno na obrázku 5.7, a navíc se zde objevuje druhá významná oblast v okolí úhlů 0° a 360°, jenž je na obrázku s intenzitou také viditelná.

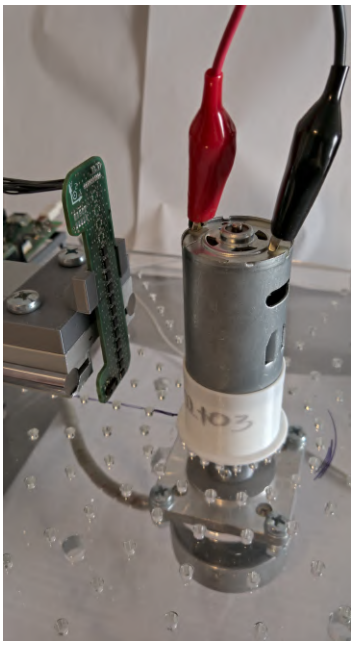


Obrázek 5.9: Úspěšnost aplikace *vylepšeného* algoritmu detekce směru rotace v celém okolí měřeného DC motoru.

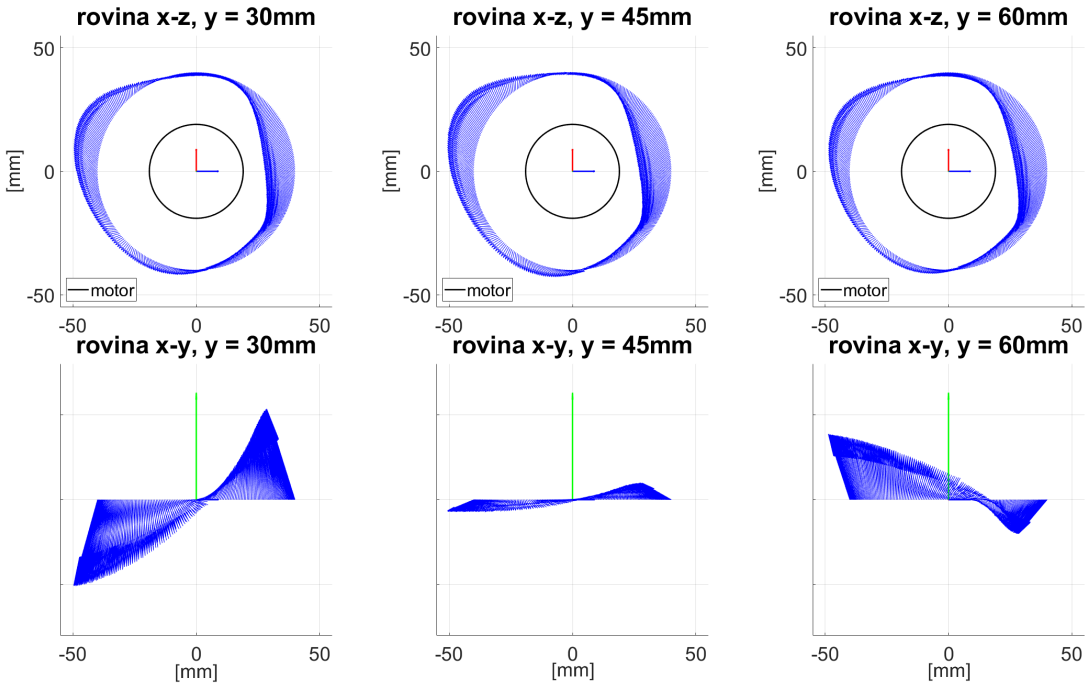
5.3 Výsledky měření na DC motorech

Pro porovnání byla provedena další měření na příkladech běžně dostupných DC motorů. Prvním měřeným motorem byl kartáčový *Alamor 489560* s nominálním napětím 12V s dosažením až 30000 ot./min.. Jedná se o generický, běžně dostupný motor bez dalšího značení výrobcem. Motor byl měřen při protékajícím proudu 1.2A.

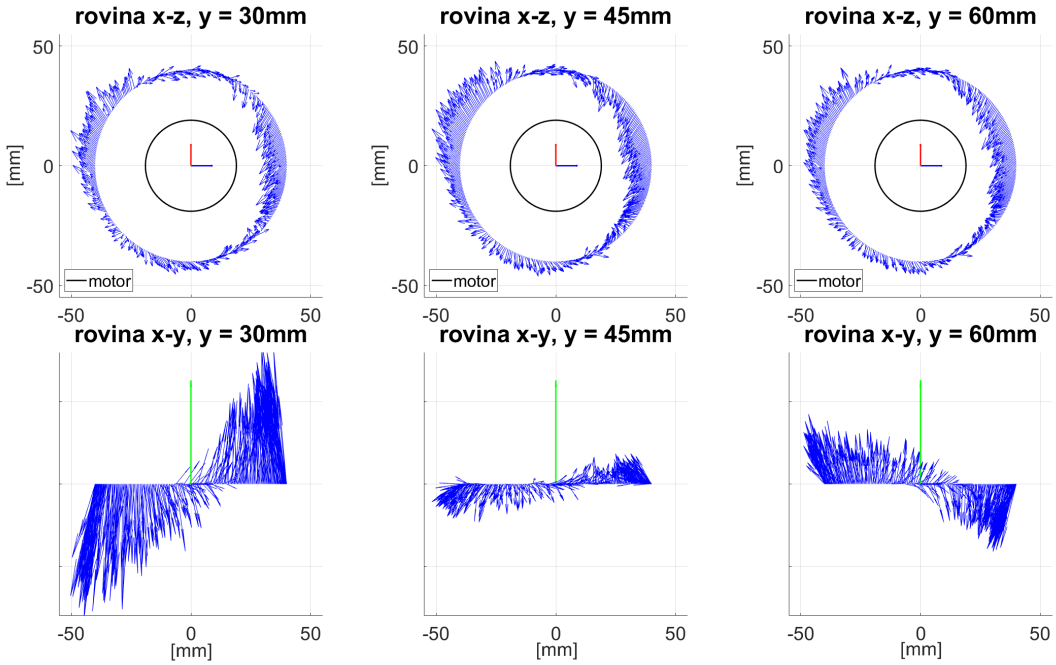
Na následujících obrázcích jsou uvedeny, podobně jako výše v této kapitole, řez polem rovinami při rotaci (obrázek 5.11), řezy rovinami pro výsledné rozdílové pole (obrázek 5.12) a výsledná mapa velikosti součtového pole (obrázek 5.13).



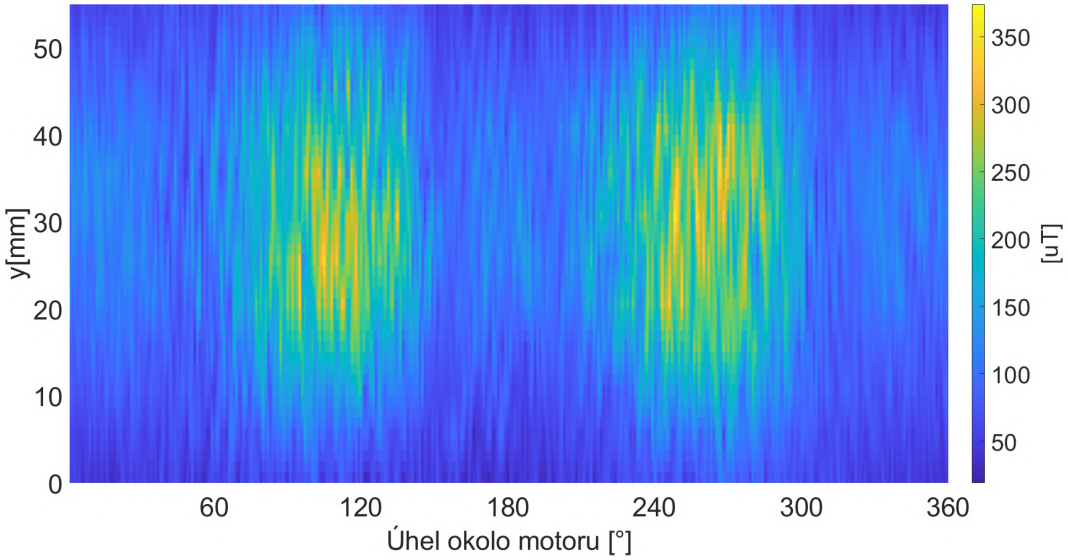
Obrázek 5.10: Foto motoru během měření.



Obrázek 5.11: Vektory magnetické indukce v okolí měřeného motoru. Řezy rovinou, poloměr 40mm, směr 1.



Obrázek 5.12: Vektory magnetické indukce v okolí měřeného DC motoru. Řezy rovinou, poloměr 40mm, rozdílové pole.



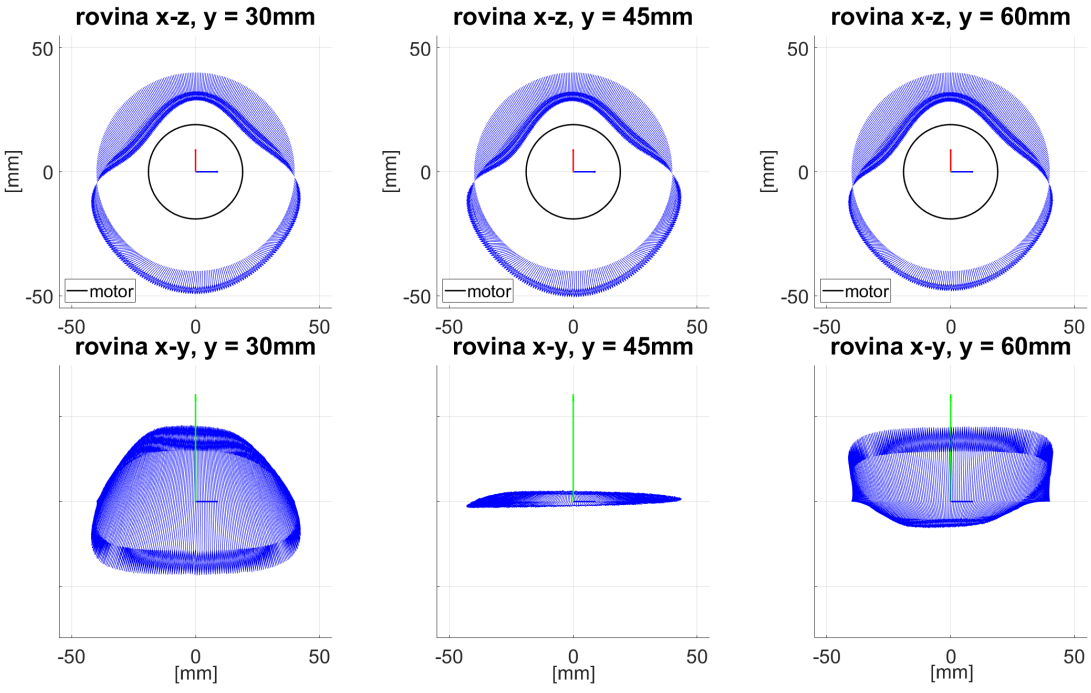
Obrázek 5.13: Velikost vektorů rozdílového pole v okolí motoru na poloměru 40mm.

Při měření tohoto motoru docházelo k saturaci senzorů, vzhledem k vysoké intenzitě unikajícího pole. Bylo tak potřeba přizpůsobit nastavení a vzdálenost pro měření. Z představených výsledků vyplývá, že aplikace metody detekce směru rotace je možná.

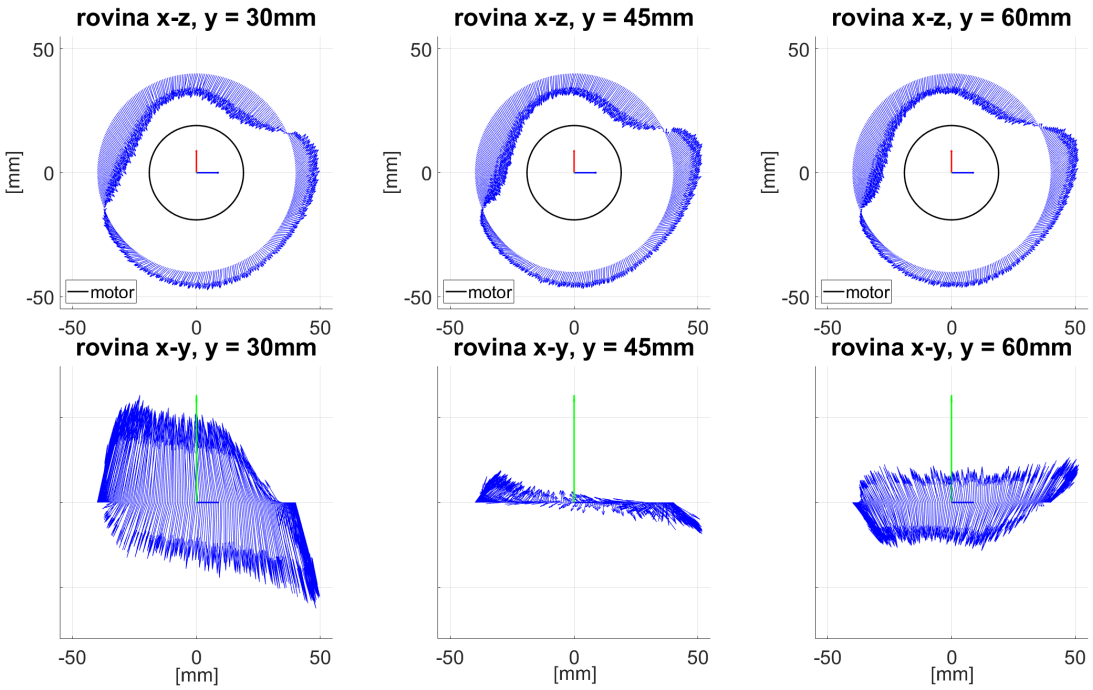
Dalším měřeným motorem byl *EsportsMJJ 775* (rovněž generický, bez značení výrobcem) s nominální hodnotou 36V a 9000 ot./min. Motor byl měřen při protékajícím proudu 1.2A.

Stejně jako v předchozím případě jsou a následujících obrázcích uvedeny řez polem rovinami při rotaci (obrázek 5.15), řezy rovinami pro výsledné rozdílové pole (obrázek 5.16) a výsledná mapa velikosti součtového pole (obrázek 5.17).

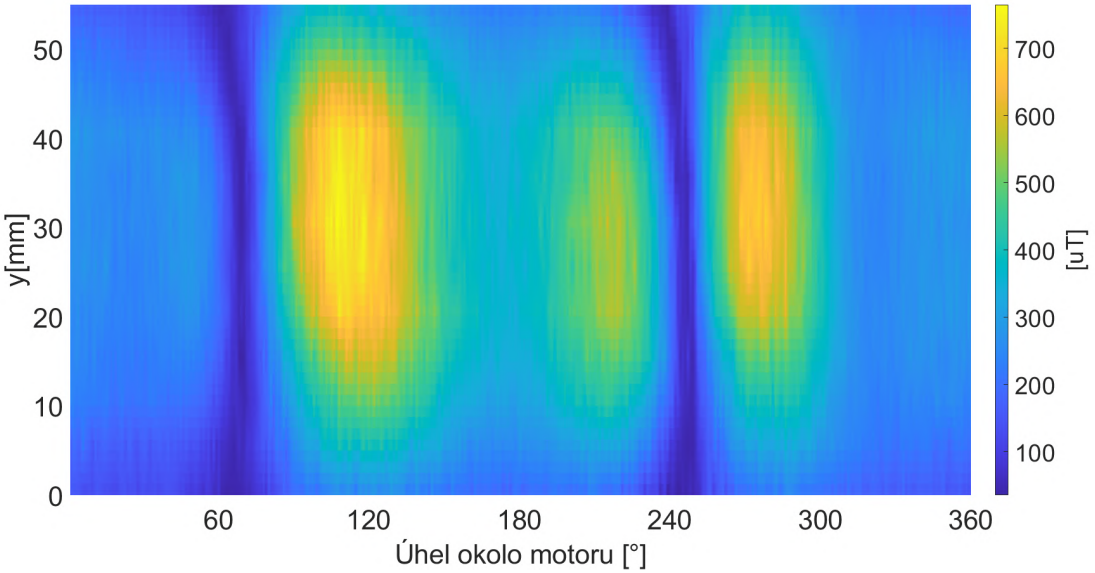
Obrázek 5.14: Foto motoru během měření.



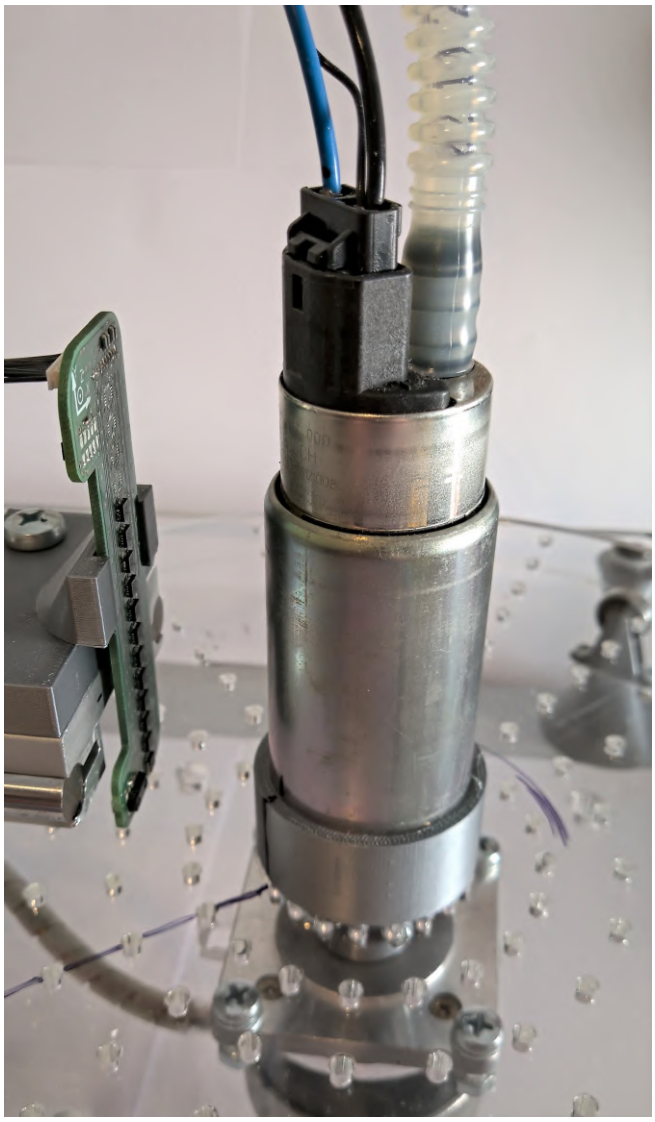
Obrázek 5.15: Vektory magnetické indukce v okolí měřeného motoru. Řezy rovinou, poloměr 40mm, směr 1.



Obrázek 5.16: Vektory magnetické indukce v okolí měřeného DC motoru. Řezy rovinou, poloměr 40mm, rozdílové pole.



Obrázek 5.17: Velikost vektorů rozdílového pole v okolí motoru na poloměru 40mm.



Obrázek 5.18: Měřená kartáčová DC pumpa pro palivové, nádržové moduly.

6 Detekce směru rotace BLDC motorů

Tato kapitola představuje zcela novou, originální, neinvazivní metodu detekce směru rotace (správnosti zapojení) bezkartáčových, elektricky komutovaných motorů, pomocí analýzy jejich unikajícího magnetického pole. Tvrzení v této kapitole jsou představena a demonstrována pomocí sady měření provedených na BLDC motoru - palivové pumpě pro nádrže benzínových automobilů, s nominálním napájecím napětím 12V. Motor byl měřen při spínacím napětí 5V a protékajícím proudu 1.2A, která je k vidění na obrázku 6.24 na konci kapitoly.

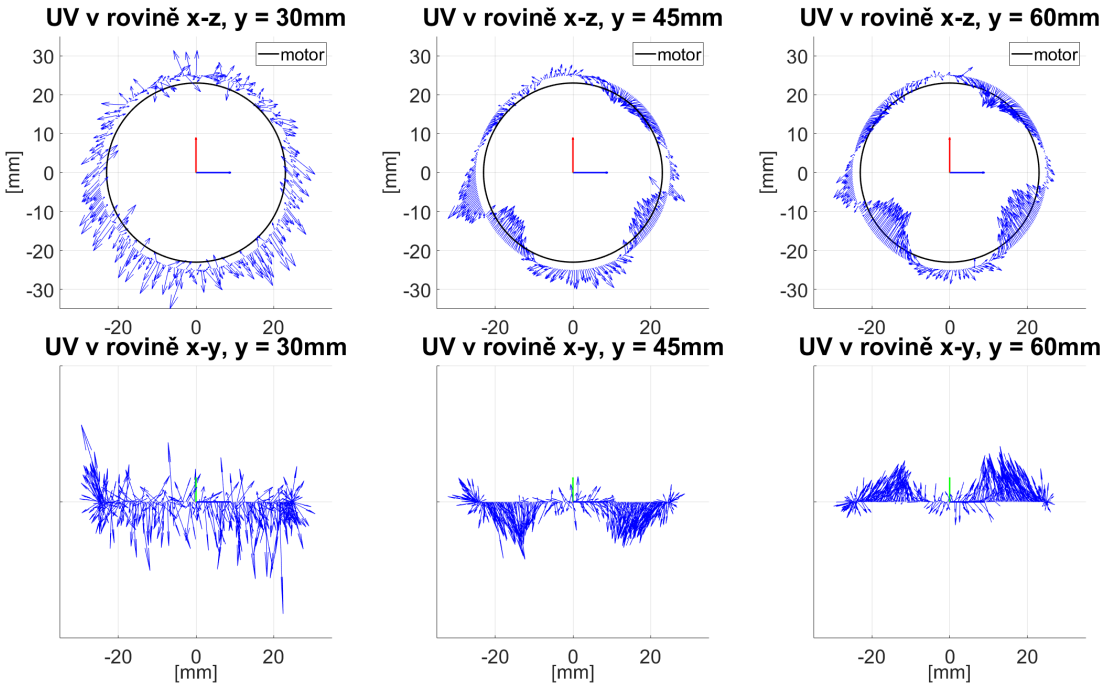
Po diskusi problematiky a specifik magnetického pole BLDC motorů, a představení nové metody detekce směru rotace, jsou následně v kapitole 6.3 tvrzení ověřena pomocí dat z měření dalších typů BLDC motorů.

6.1 Unikající magnetické pole

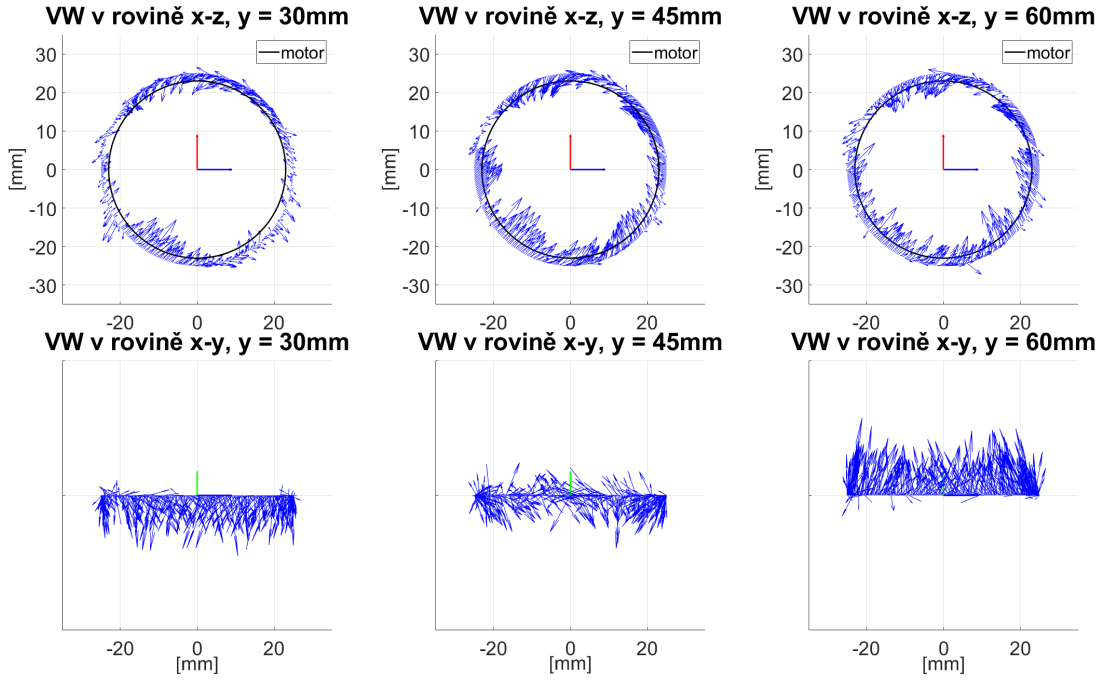
Na magnetické pole unikající z opláštění BLDC motorů se ve spojení s detekcí směru rotace lze podobně jako u DC motorů dívat z několika pohledů. Ovšem díky rozdílné mechanické konstrukci, tedy více pólů vinutí a permanentním magnetu na rotoru, je situace u BLDC motorů ještě složitější.

Stejně jako v předchozí kapitole zabývající se DC motoru je i v této kapitole vyobrazena podoba magnetického pole pomocí řezů rovinami. Rovněž zde není podstatná absolutní hodnota intenzity magnetického pole, nýbrž jeho orientace v prostoru. BLDC motory mají 3 svorky, konvencí označované jako U, V a W. Princip spínání motoru při provozu je takový, že je vždy sepnut jeden daný pár svorek, např. $U+V$ a třetí svorka zůstává bez potenciálu. Sepnutí svorek způsobí průtok proudu a generaci magnetického pole, které vtahuje rotor s permanentním magnetem do polohy s nižším magnetickým odporem, a po dosažení komutační polohy je sepnut následující pár v pořadí tak, aby rotor pokračoval v pohybu.

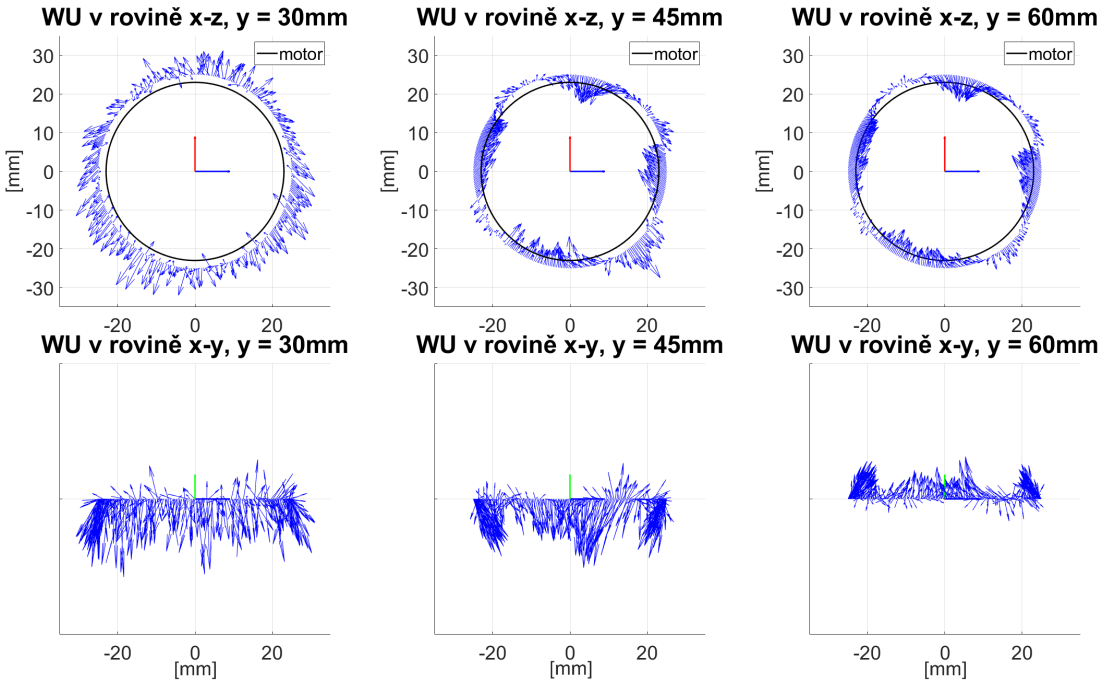
Na stejném principu spínání párů svorek jsou založeny i vizualizace na následujících obrázcích. Obrázky jsou vždy označeny popiskem, který pár svorek byl sepnut. Jestliže je u obrázku označeno, že byl sepnut pár svorek VW znamená to, že na první svorku, tedy V, byl přiveden kladný potenciál napájení (5V) a na druhou svorku, tedy W, byl přiveden potenciál záporný a poslední nezmíněná svorka je ponechána plovoucí. Tato konvence je nadále dodržována. Výsledné vektory se sestaví tak, že nejprve je změřeno pole bez protékajícího proudu, které je následně odečteno od pole změřeného při sepnutí daného páru svorek (více v kapitole 6.2.1).



Obrázek 6.1: Rozdílové magnetické pole v okolí BLDC motoru při sepnutí *UV* svorek, řezy rovinou.



Obrázek 6.2: Rozdílové magnetické pole v okolí BLDC motoru při sepnutí *VW* svorek, řezy rovinou.

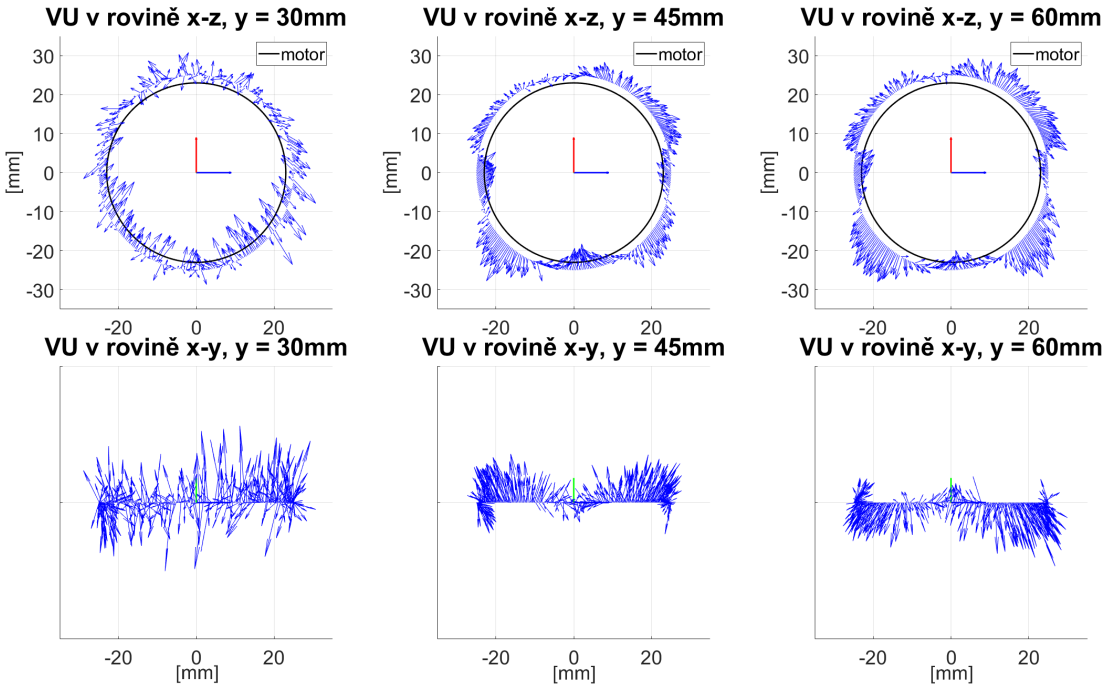


Obrázek 6.3: Rozdílové magnetické pole v okolí BLDC motoru při sepnutí WU svorek, řezy rovinou.

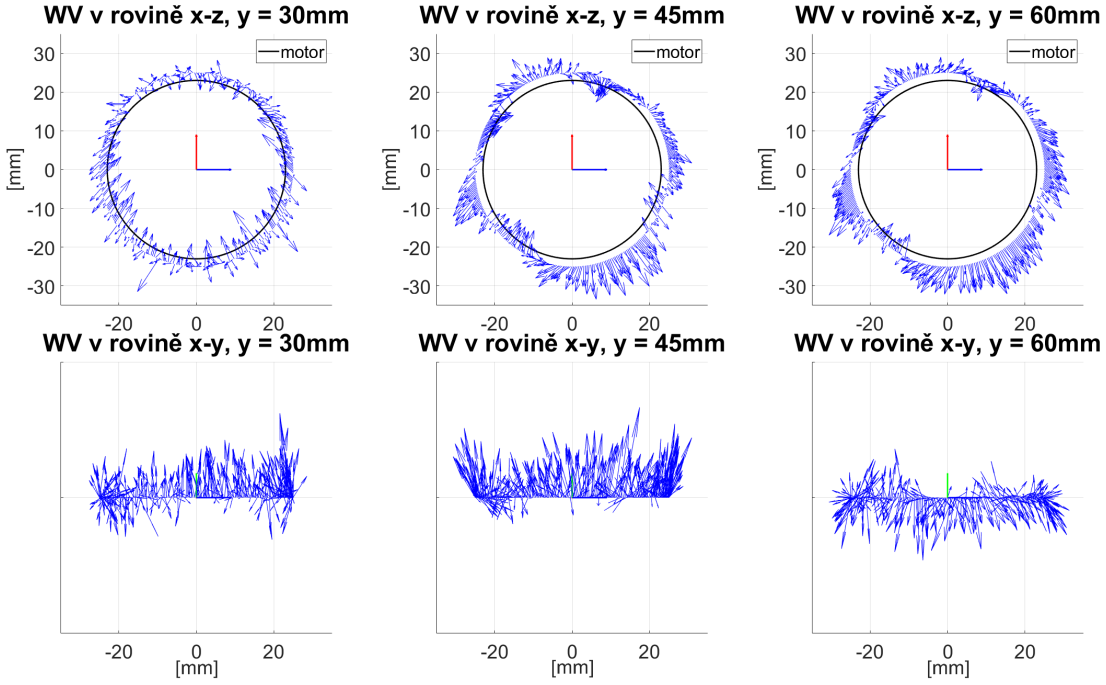
Na obrázcích 6.1, 6.2 a 6.3 je zobrazena podoba magnetického pole v okolí měřeného BLDC motoru v řezech rovinami x-z a x-y, pro tři různé páry svorek UV, VW a WU, které jsou seřazeny tak, jak by byly spínány při komutaci motoru správným směrem během provozu.

Z obrázků vyplývá, že podobně jako u DC motoru, i zde dochází ke změnám orientace rozdílových polí při posuvu podél výšky motoru, tedy v ose y. Vidíme, že se změnou výšky se orientace vektorů magnetické indukce mění zejména právě v ose y. Pro všechny tři obrázky platí, že ve výšce $y = 30mm$ je pole nejvíce zašuměné. To je dáno nízkou intenzitou rozdílového pole v této oblasti, jak je později dokazováno na obrázku 6.12. Naopak v řezech rovinou x-z ve výškách $y = 30mm$ a $y = 45mm$ lze vidět 4 oblasti, kde se vektory magnetické indukce orientují ke středu měřeného motoru.

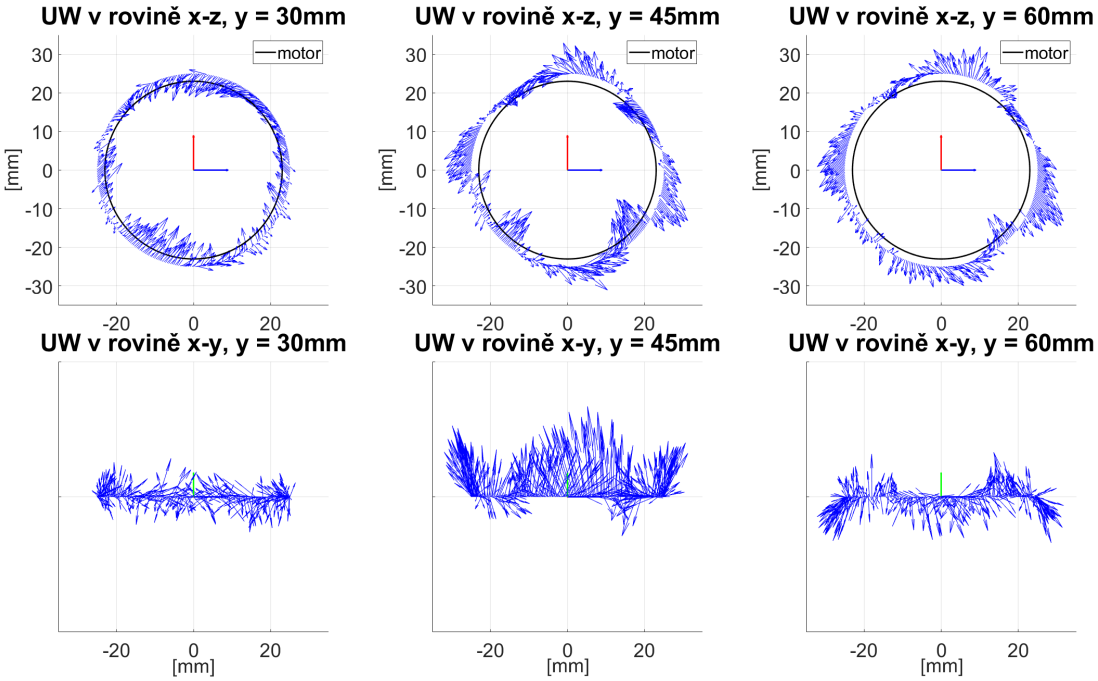
Na obrázcích 6.4, 6.5 a 6.6 je zobrazena podoba magnetického pole v okolí měřeného BLDC motoru při sepnutí stejných párů svorek, avšak opačným směrem než v předchozím případě. Při detailnějším pohledu do podoby polí si lze všimnout, že orientace vektorů magnetického pole v místech, kde v předchozím případě zřetelně směřovaly do středu motoru, je víceméně opačná. Stejně tomu tak je při pohledu do roviny x-y, který odhaluje orientaci pole v ose y. Dalším důležitým poznatkem je, že se tyto oblasti napříč poli jednotlivých párů svorek částečně překrývají.



Obrázek 6.4: Rozdílové magnetické pole v okolí BLDC motoru při sepnutí *VU* svorek, řezy rovinou.



Obrázek 6.5: Rozdílové magnetické pole v okolí BLDC motoru při sepnutí *WV* svorek, řezy rovinou.



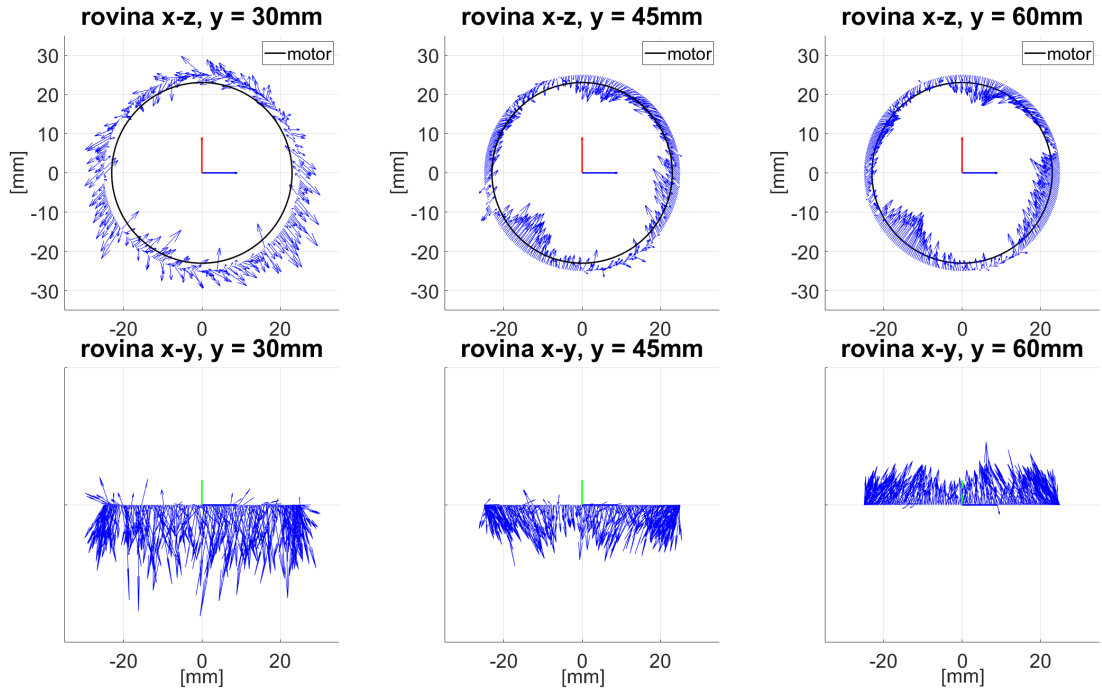
Obrázek 6.6: Rozdílové magnetické pole v okolí BLDC motoru při sepnutí *UW* svorek, řezy rovinou.

Ze spojení výše uvedených informací vyplývá, že *je možné získat informaci o správném zapojení BLDC motoru pomocí vektorového součtu měřených polí pro jednotlivé páry svorek*. Jak toto pole změřit je uvedeno dále v kapitole 6.2.1 a jeho výpočet ukazují rovnice 6.1 - 6.4.

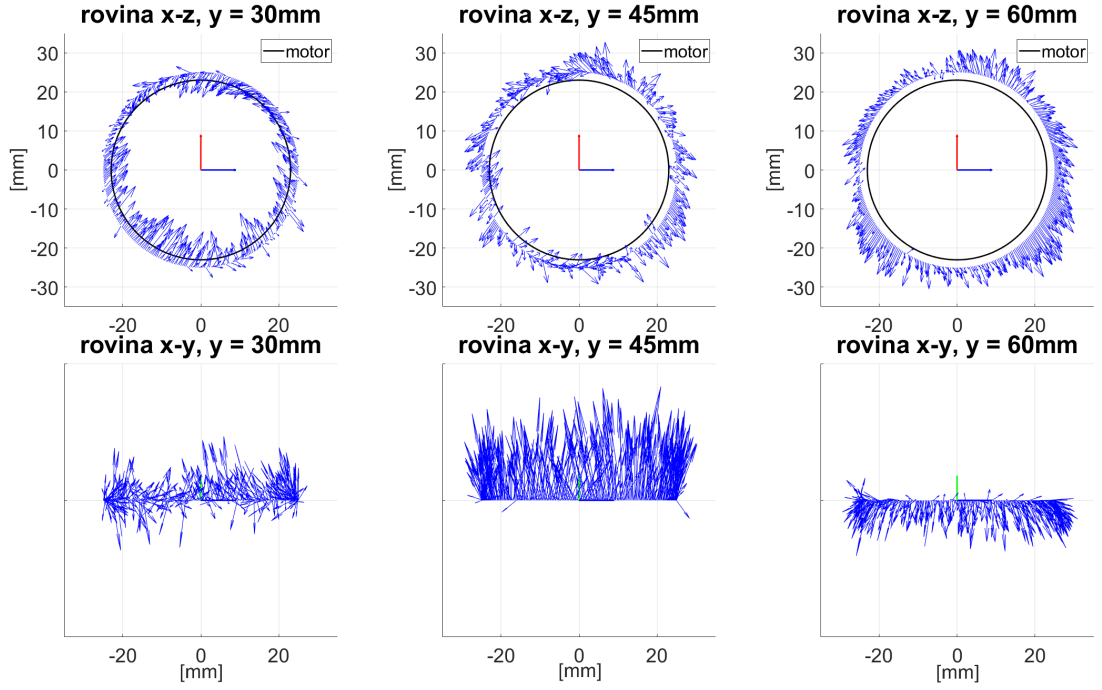
Jak takto získané součtové pole vypadá je zobrazeno na obrázku 6.7 pro správné zapojení, a na obrázku 6.8 pro zapojení obrácené. Z obrázků lze vidět, že součtové pole se skutečně chová tak je předpokládáno, a zejména na obrázku 6.7 ve výškách $y = 30mm$ a $y = 45mm$ lze zřetelně vidět zmíněné 4 oblasti, ve kterých se pole orientuje do středu motoru. Ve stejných místech, jen poněkud méně zřetelně, na obrázku 6.8 lze vidět, že pole je orientováno právě opačně.

Pro úplnost je na obrázcích 6.9 a 6.10 zobrazeno unikající magnetické pole v okolí měřeného motoru v celém rozsahu ve 3D z izometrického pohledu. V rozmezí $y = 40-70mm$ jsou vidět zřetelně oblasti, ve kterých na obrázku 6.9 směřují vektory magnetické indukce do středu motoru, a na obrázku 6.10 směrem přesně opačným, tedy od středu motoru ven.

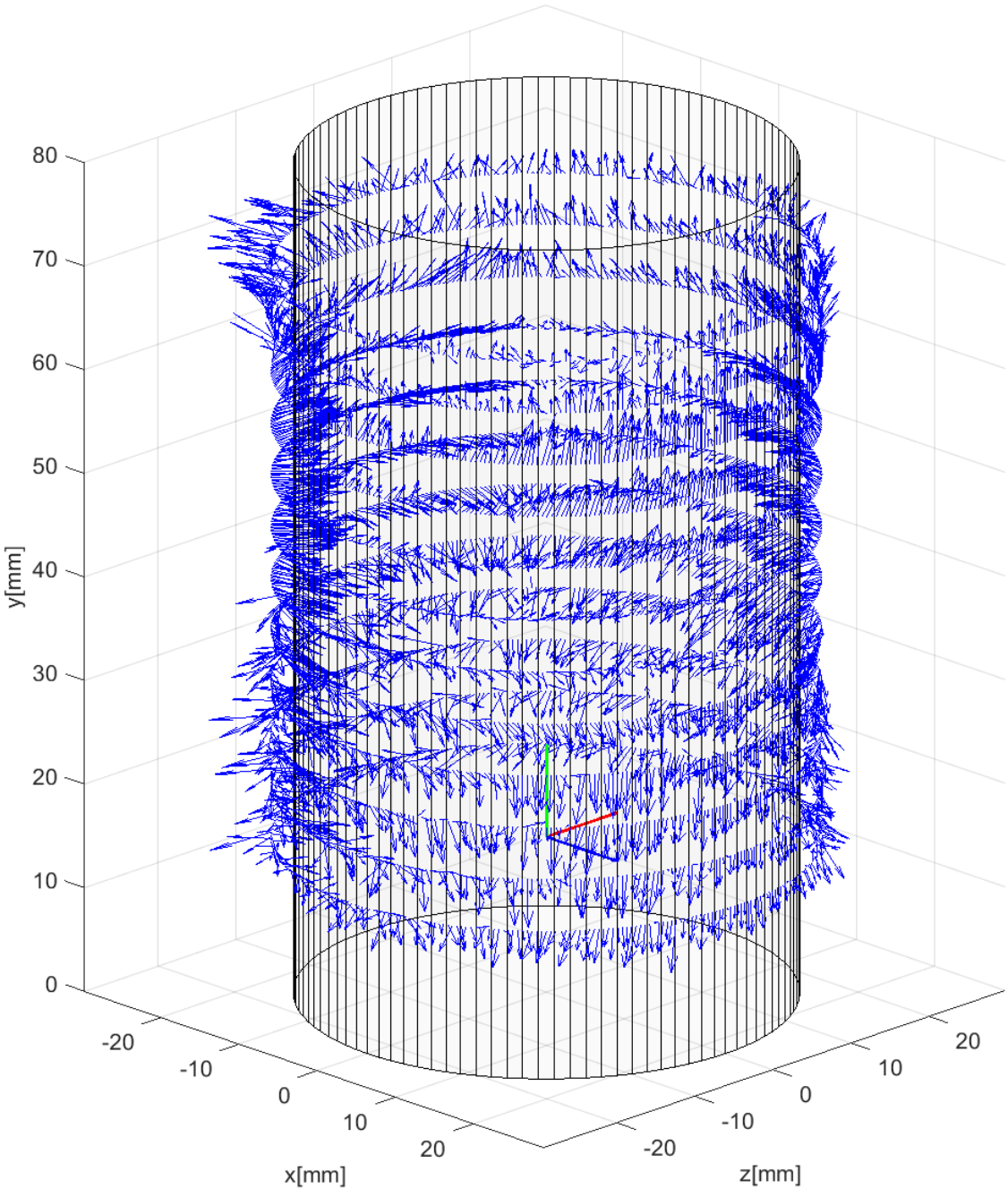
Právě v těchto místech je nejpatrnější rozdíl mezi dvěma způsoby zapojení - tedy při správném spínání i směry rotace. V následujících kapitolách je představena zcela unikátní metoda detekce směru rotace (zapojení) založená právě na tomto faktu, a je diskutováno nalezení vhodného místa pro její aplikaci.



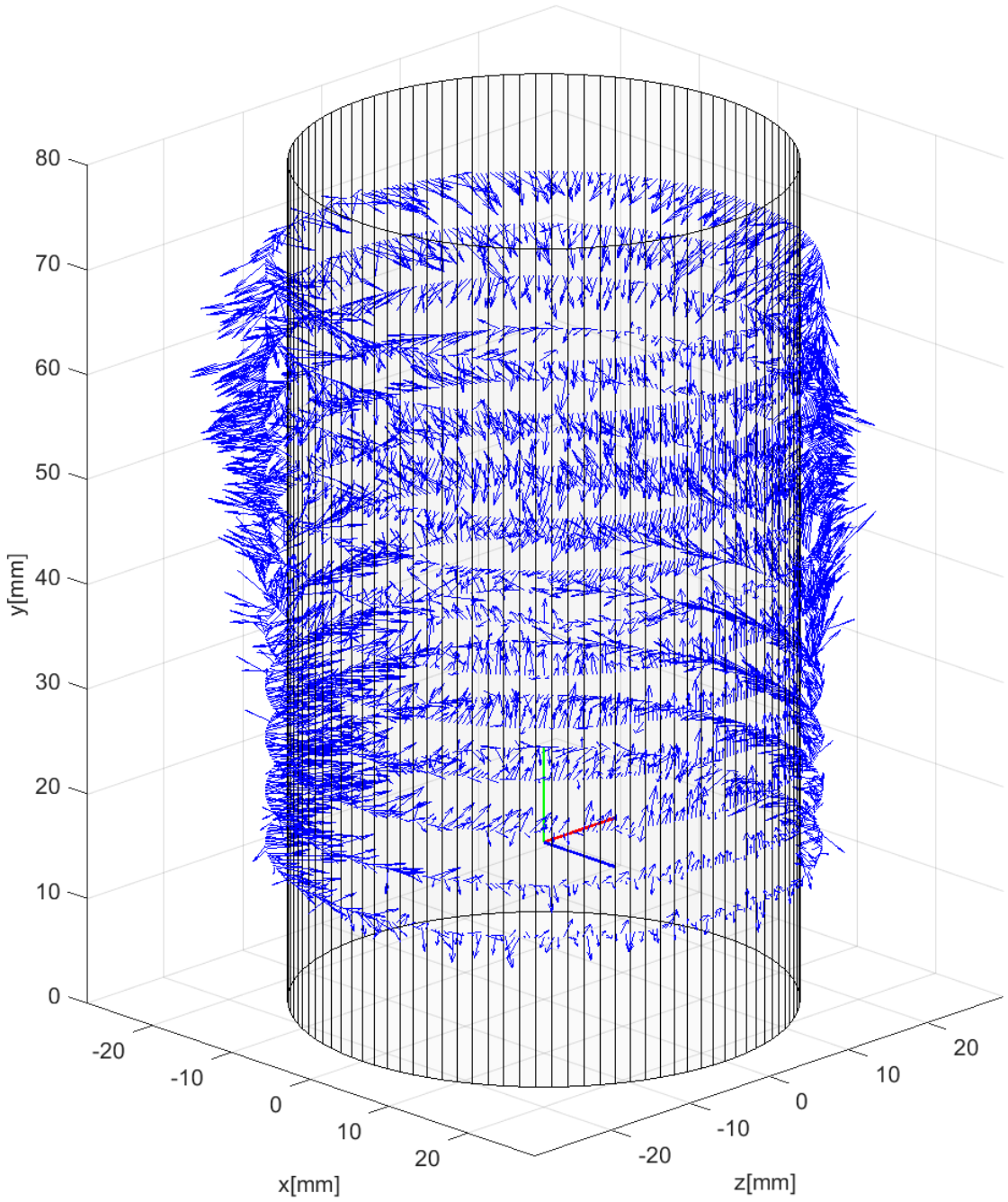
Obrázek 6.7: Součtové magnetické pole v okolí BLDC motoru získané vektorovým součtem jednotlivých rozdílových polí. Řezy rovinou, *správné zapojení*.



Obrázek 6.8: Součtové magnetické pole v okolí BLDC motoru získané vektorovým součtem jednotlivých rozdílových polí. Řezy rovinou, *nesprávné zapojení*.



Obrázek 6.9: Součtové magnetické pole v okolí BLDC motoru získané vektorovým součtem jednotlivých rozdílových polí. Plná obálka v konstantní vzdálenosti, izometrický pohled, *správné zapojení*.



Obrázek 6.10: Součtové magnetické pole v okolí BLDC motoru získané vektorovým součtem jednotlivých rozdílových polí. Plná obálka v konstantní vzdálenosti, izometrický pohled, *nesprávné zapojení*.

6.2 Nová unikátní metoda detekce směru rotace (správnosti zapojení)

6.2.1 Návrh metody

V předchozí kapitole 6.1 bylo zmíněno, že lze získat informaci o zapojení BLDC motorů z vektorových součtů rozdílových vektorů pro jednotlivé páry sepnutých svorek. *Jedná se o zcela novou, unikátní metodu detekce směru rotace (správnosti zapojení) pro BLDC motory*, která nebyla, dle našeho nejlepšího vědomí, doposud nikde publikována. Jde o principiálně jednoduchou, neinvazivní metodu založenou na analýze unikajícího magnetického pole vně opláštění motoru.

Postup měření pro tuto zcela novou metodu je následující:

1. Na svorky U a V je přivedeno napětí. Na svorku U kladný potenciál $(+)$ a na svorku V potenciál záporný $(-)$. Svorky zůstávají sepnuty (motorem teče proud) po dobu potřebnou na to, aby mohl být rotor s permanentním magnetem pootočen do pozice s nejmenším magnetickým odporem. Svorka W je ponechána plovoucí, bez potenciálu.
2. Následně, po pootočení rotoru, je změřen vektor magnetické indukce $\mathbf{uv}_+$.
3. Ze svorek U a V je odpojeno napájení, motorem neprotéká proud.
4. Je změřen vektor magnetické indukce $\mathbf{uv}_0$.
5. Na svorky V a W je přivedeno napětí. Na svorku V kladný potenciál $(+)$ a na svorku W potenciál záporný $(-)$. Svorky zůstávají sepnuty po dobu potřebnou na vtažení rotoru do pozice s nejmenším magnetickým odporem. Svorka U je ponechána plovoucí, bez potenciálu.
6. Po pootočení rotoru, je změřen vektor magnetické indukce $\mathbf{vw}_+$.
7. Ze svorek V a W je odpojeno napájení, motorem neprotéká proud.
8. Je změřen vektor magnetické indukce $\mathbf{vw}_0$.
9. Na svorky W a U je přivedeno napětí. Na svorku W kladný potenciál $(+)$ a na svorku U potenciál záporný $(-)$. Svorky zůstávají sepnuty po dobu potřebnou na vtažení rotoru do pozice s nejmenším magnetickým odporem. Svorka V je ponechána plovoucí, bez potenciálu.
10. Po pootočení rotoru, je změřen vektor magnetické indukce $\mathbf{wu}_+$.
11. Ze svorek W a U je odpojeno napájení, motorem neprotéká proud.
12. Je změřen vektor magnetické indukce $\mathbf{wu}_0$.

Pro jednotlivé páry svorek jsou vypočteny rozdílové vektory jako:

$$\mathbf{uv} = \mathbf{uv}_+ - \mathbf{uv}_0 \tag{6.1}$$
$$\mathbf{vw} = \mathbf{vw}_+ - \mathbf{vw}_0 \tag{6.2}$$
$$\mathbf{wu} = \mathbf{wu}_+ - \mathbf{wu}_0 \tag{6.3}$$

kde **uv**, **vw** a **wu** jsou trojrozměrné, rozdílové vektory magnetické indukce pro daný pár sepnutých svorek. Výsledný vektor je sestaven pomocí vektorového součtu jednotlivých rozdílových vektorů jako:

$$\mathbf{v} = \mathbf{uv} + \mathbf{vw} + \mathbf{wu} \tag{6.4}$$

Tímto způsobem lze změřit vektor magnetické indukce v jednom bodě, několik vektorů magnetické indukce v určité oblasti, nebo celé pole v okolí motoru.

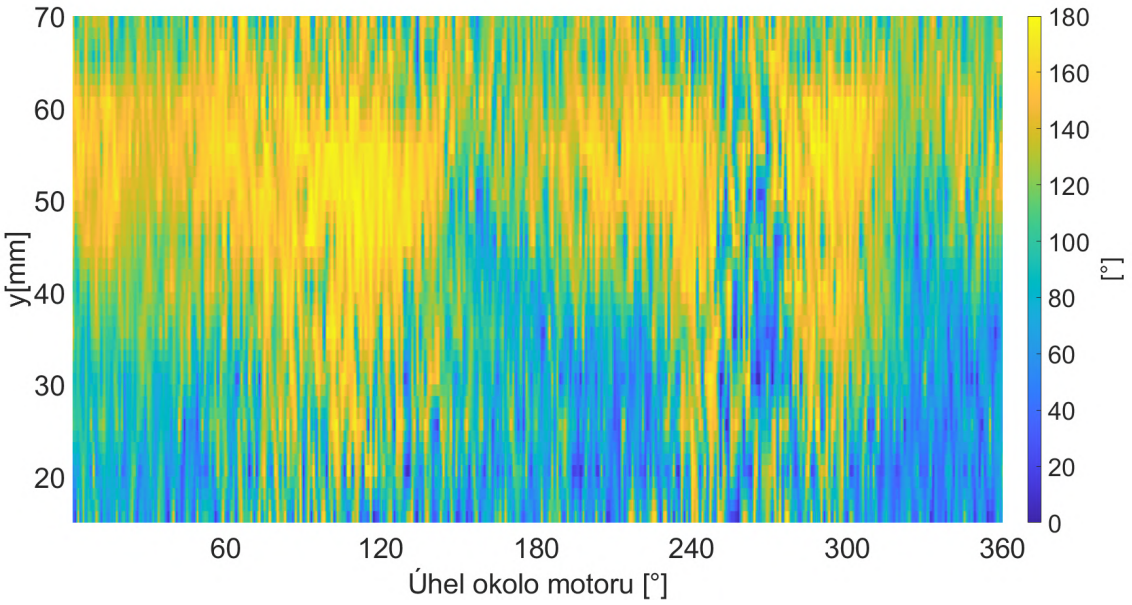
Díky výpočtu jednotlivých vektorů **uv**, **vw** a **wu** jako *rozdílové*, odstraňuje metoda vliv pozadí, což je důležité zejména kvůli vlivu silného permanentního magnetu na rotoru. Stejně jako u metody detekce směru rotace pro DC motory, i zde zůstávají určité překážky v podobě určení vhodného místa pro aplikaci metody a potřeby vyhodnotit výsledek porovnáním s referencí. Následující dvě podkapitoly přináší pro tyto překážky řešení.

6.2.2 Kritéria optimálního místa pro měření

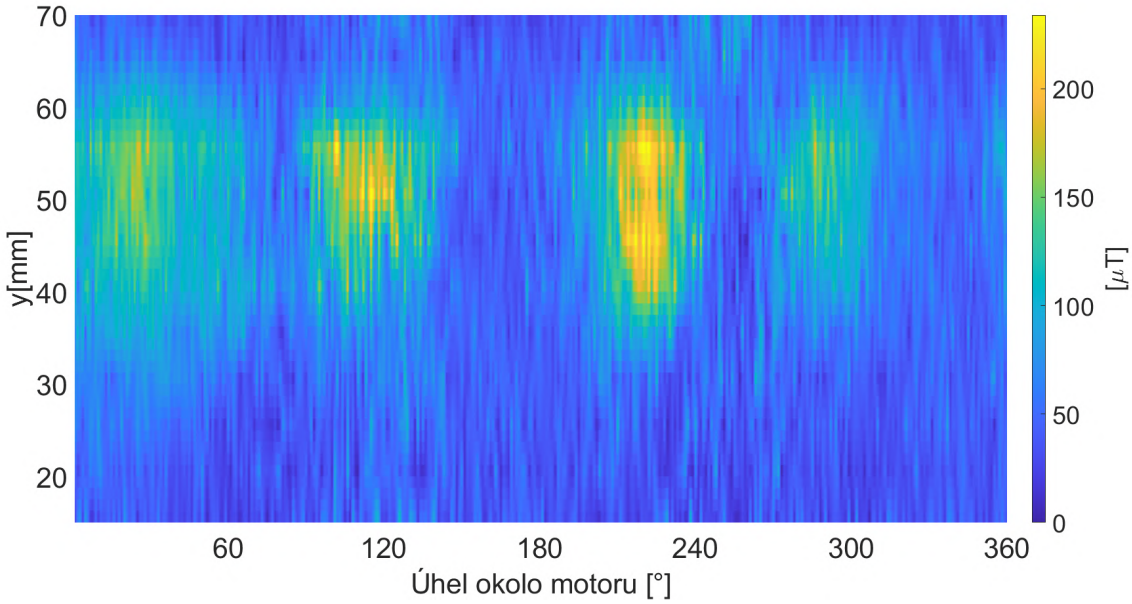
Z obrázků 6.1 - 6.10 je patrné, že s polohou v okolí motoru se mění orientace pole a jak je zejména z některých řezů rovinou x-z patrné, místy velmi prudce. Ovšem krom orientace pole se s polohou mění i jeho intenzita.

Z rovnic 6.1 - 6.4 vyplývá, že čím intenzivnější bude unikající magnetické pole, tím bude v oblastech podobné orientace rozdílových vektorů výsledný součtový vektor větší. Z výše uvedených obrázků je také zřejmé, že dílčí rozdílové vektory jsou v těchto oblastech opačně orientované při obráceném zapojení. Z toho vyplývá, že vhodné místo pro měření by mělo splňovat, že úhel mezi součtovými vektory pro *správné* a *nesprávné* zapojení je co největší. V takových místech lze určit, je-li předem znám referenční obraz pole *správně* zapojeného motoru, jak je měřený BLDC motor zapojen, neboli kterým směrem by se během provozu otáčel.

Na obrázku 6.11 je zobrazena barevná mapa úhlů mezi součtovými poli *správně* a *nesprávně* zapojeného motoru. Z obrázku je patrné, že existuje oblast kde je orientace polí víceméně opačná. Tato oblast se nachází přibližně v rozmezí $y = 40 - 65mm$. V úrovni $y < 40mm$ vidíme, že se zde také nachází vektory, mezi nimiž je úhel velký, ale data jsou více "zašuměná". To je způsobeno nízkou velikostí intenzity polí v dané oblasti a tedy vyšším vlivem šumu, jak odhaluje obrázek 6.12.



Obrázek 6.11: Velikost úhlů mezi součtovými vektory polí pro *správně* a *nesprávně* zapojený motor.



Obrázek 6.12: Velikost intenzity součtového pole *správně* zapojeného motoru.

Na obrázku 6.12 je vynesena velikost intenzity součtového pole pro správně zapojený motor. Z obrázku jasně vyvstávají ony již zmiňované 4 oblasti, ve kterých se jednotlivé rozdílové vektory ale i ty součtové jednoznačně orientují *do* a nebo *ze* středu motoru. Lze vidět, že právě tato místa oplývají největší intenzitou pole

a zároveň se nacházejí v oblasti, kde jsou pole pro rozdílná zapojení opačně orientována. *Právě tyto místa jsou pro aplikaci metody detekce směru rotace (správnosti zapojení) vhodná.*

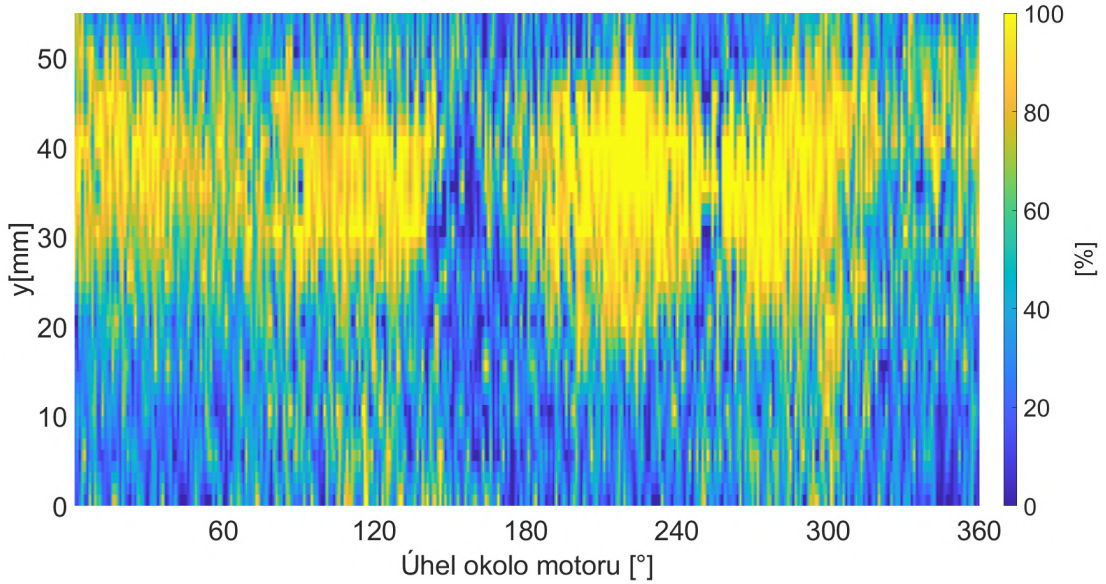
6.2.3 Algoritmus detekce správnosti zapojení / směru rotace

Algoritmus detekce směru rotace je založen na stejném principu jako algoritmus pro DC motory, který je popsán v kapitole 5.2.3. V místě vhodném pro aplikaci metody je provedeno měření dle stanoveného postupu, provedeny potřebné výpočty a výsledek je porovnán s referencí, avšak s tím rozdílem, že postup měření a kritéria vhodné polohy jsou pro BLDC motory uvedeny v kapitolách 6.2.1 a 6.2.2. Aby tak popis algoritmu nemusel být opakován, je tímto vážený čtenář odkázán k nahlédnutí do zmíněných kapitol.

6.2.4 Experimentální ověření

Navržený algoritmus detekce rotace (správnosti zapojení) BLDC motorů byl experimentálně ověřen na statisticky významné sadě měření. Měření byla provedena podle algoritmu uvedeném v kapitole 6.2.3, dle metody z kapitoly 6.2.1, v celém okolí motoru.

Na obrázku 6.13 můžeme vidět, že existují oblasti ve kterých lze metodu úspěšně aplikovat, jež jsou shodné s oblastmi určenými na obrázku 6.12 jako vhodné pro aplikaci metody.

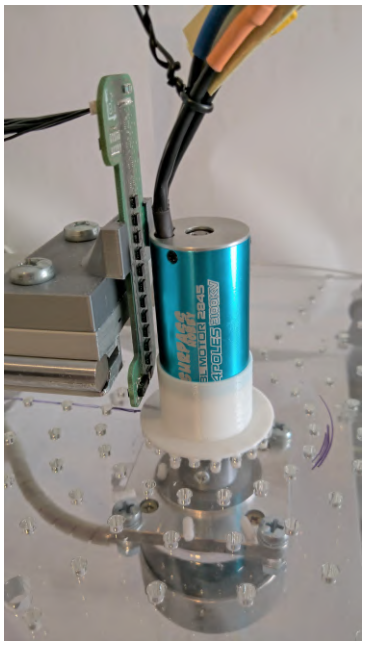


Obrázek 6.13: Úspěšnost aplikace algoritmu detekce směru rotace (správnosti zapojení) v celém okolí měřeného BLDC motoru.

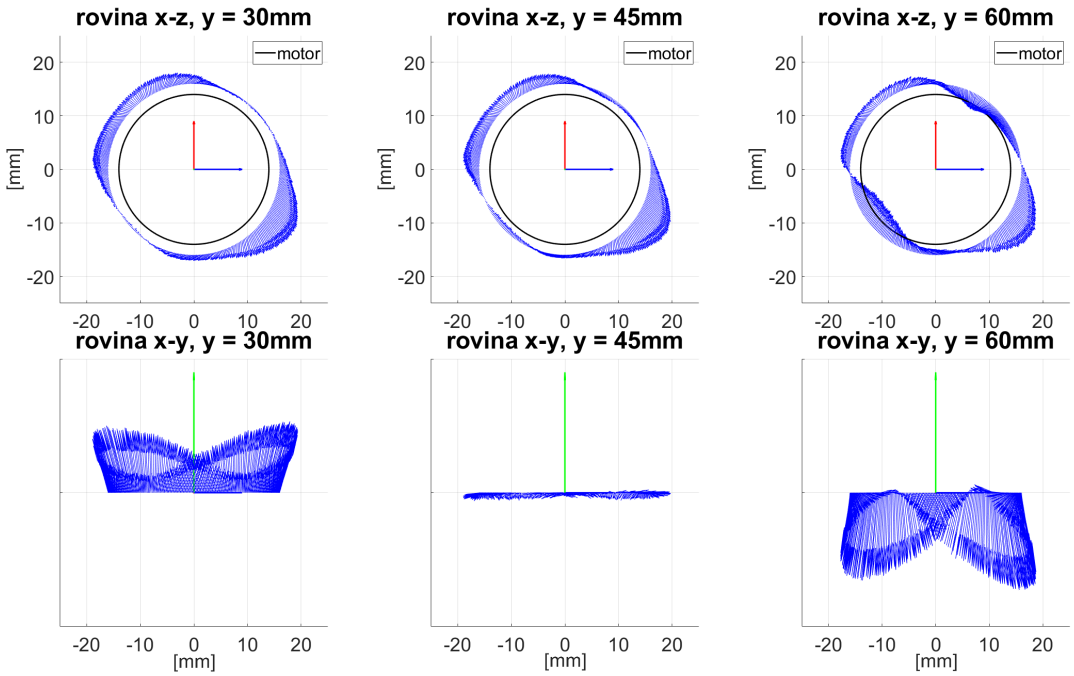
6.3 Výsledky měření na BLDC motorech

Pro porovnání byla provedena další měření na příkladech běžně dostupných BLDC motorů. Prvním měřeným motorem byl 4-pólový, bez-senzorový BLDC motor *Surpass Hobby 2845* [38], s délkou 40mm a průměrem těla 28mm. Motor byl měřen při protékajícím proudu 3A.

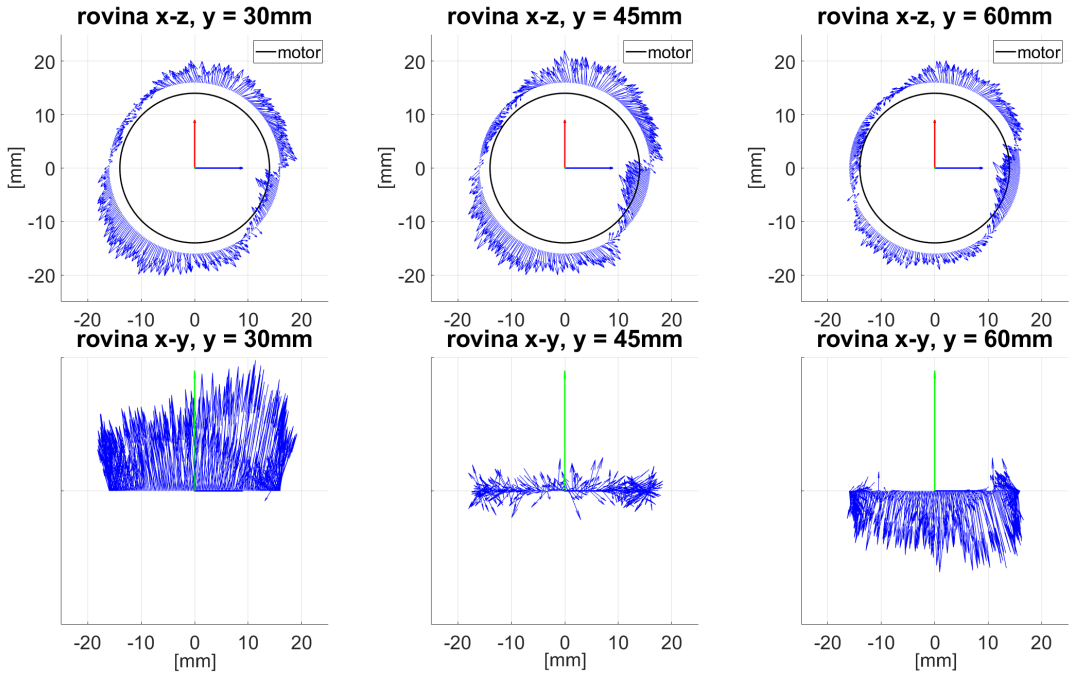
Jedná se o velice malý, modelářský motor a je k vidění na obrázku 6.14. Dále jsou uvedeny řezy součtovými poli (obrázky 6.15 a 6.16), rozdíl úhlů mezi nimi (obrázek 6.17) a výsledná velikost součtového senzoru (obrázek 6.18).



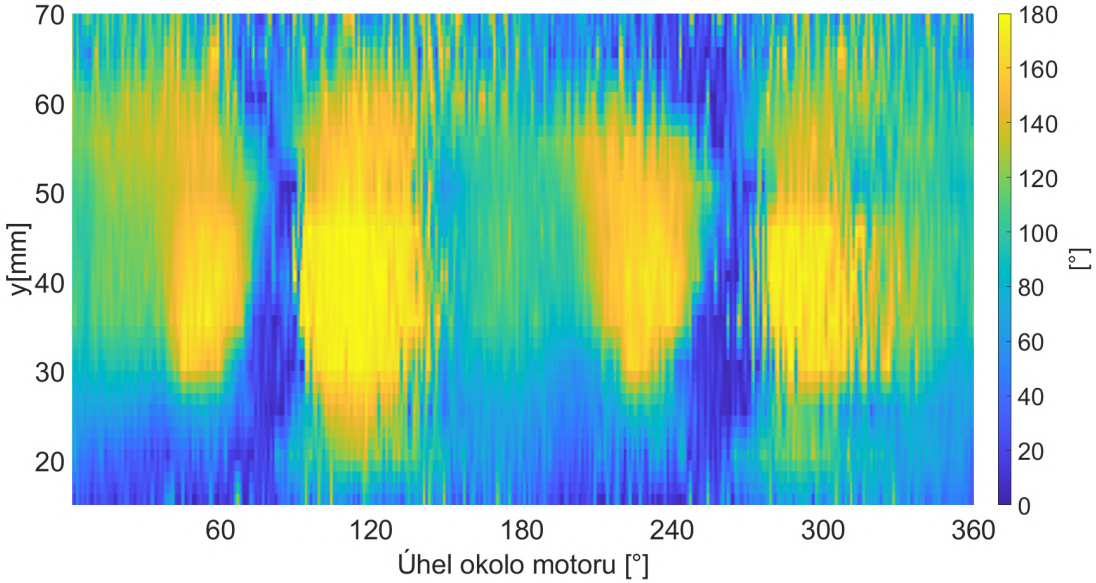
Obrázek 6.14: Foto motoru během měření.



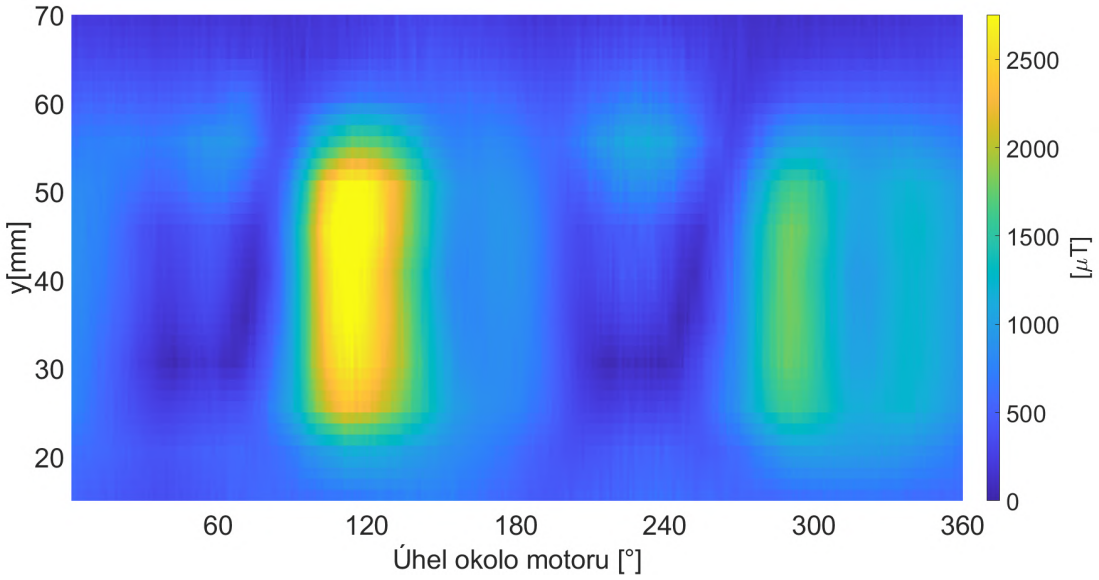
Obrázek 6.15: Součtové magnetické pole v okolí měřeného motoru získané vektorovým součtem jednotlivých rozdílových polí. Řezy rovinou, *správné zapojení*.



Obrázek 6.16: Součtové magnetické pole v okolí měřeného motoru získané vektorovým součtem jednotlivých rozdílových polí. Řezy rovinou, *nesprávné zapojení*.



Obrázek 6.17: Velikost úhlů mezi součtovými vektory polí pro *správně* a *nesprávně* zapojený motor.



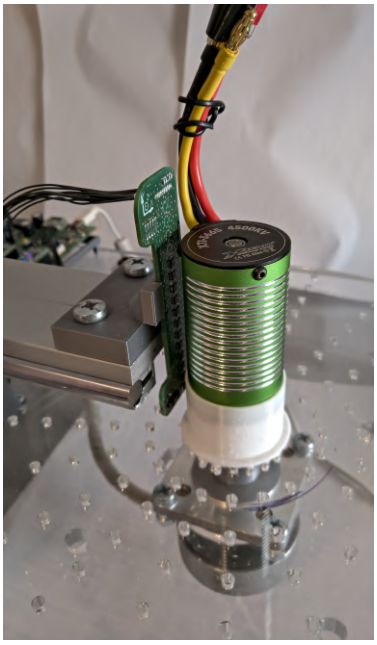
Obrázek 6.18: Velikost intenzity součtového pole *správně* zapojeného motoru.

Z obrázku 6.18 je vidět, že u tohoto motoru je výsledné, unikající součtové pole výraznější než u jiných motorů. V tomto případě jsou nalezení vhodného místa pro aplikaci metody detekce směru rotace a její vyhodnocení snadné.

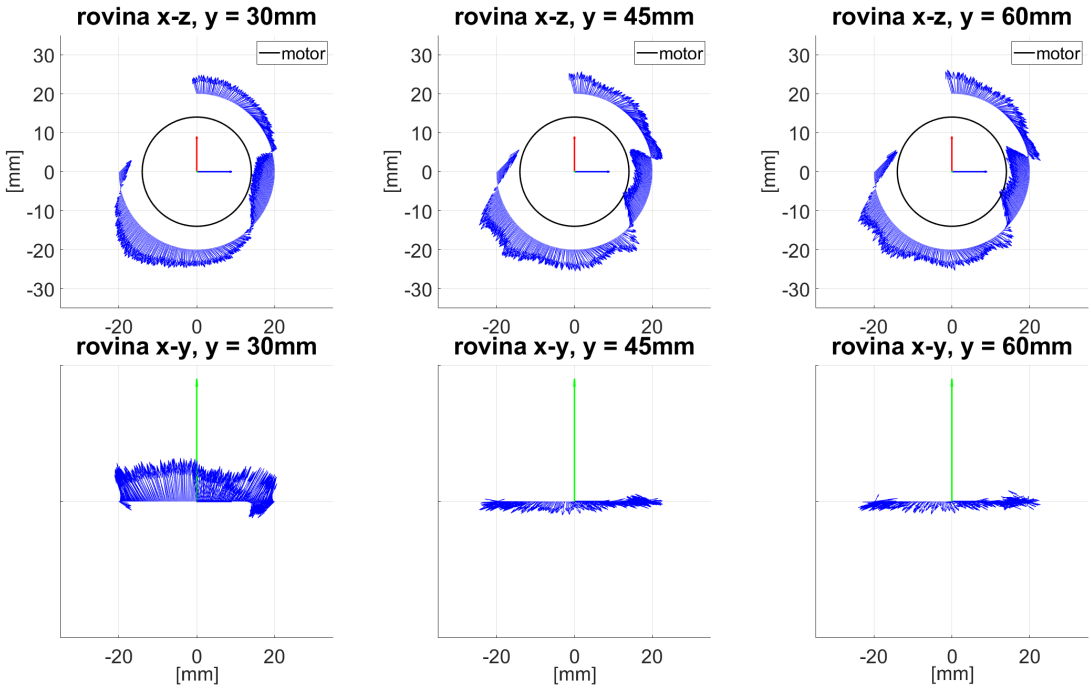
Druhým měřeným BLDC motorem byl 4-pólový, bez-senzorový motor *X-TEAM XTI-3665 4500KV* [39], s délkou těla 65mm a průměrem 36mm. Motor byl měřen při protékajícím proudu 3A.

Jedná se rovněž o motor často využívaný v modelářství. Dále jsou ukázány řezy součtovými poli (obrázky 6.20 a 6.21), rozdíl úhlů mezi nimi (obrázek 6.22) a výsledná velikost součtového senzoru (obrázek 6.23).

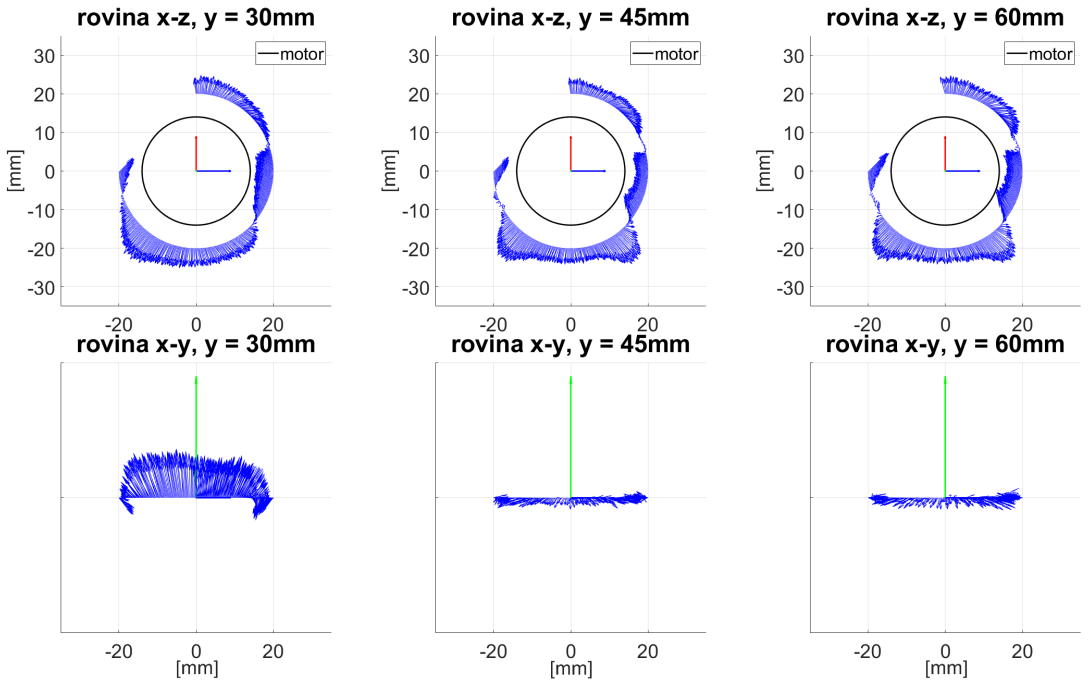
Kvůli vyčnívající kabeláži nebyl tento motor měřen v plném rozsahu 0°-360°, ale jen v rozsahu neúplném 0°-270°.



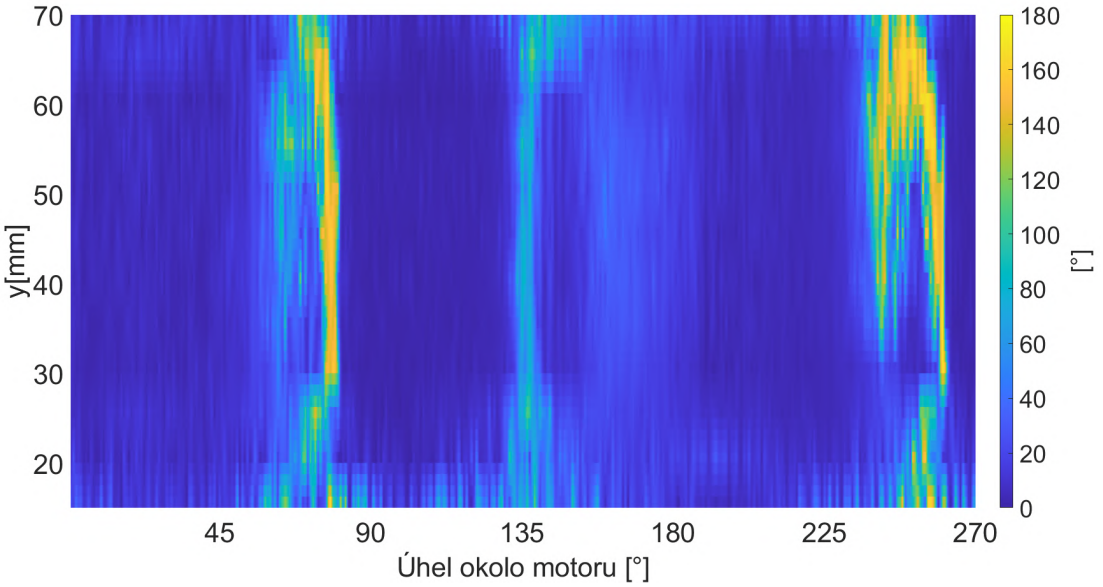
Obrázek 6.19: Foto motoru během měření.



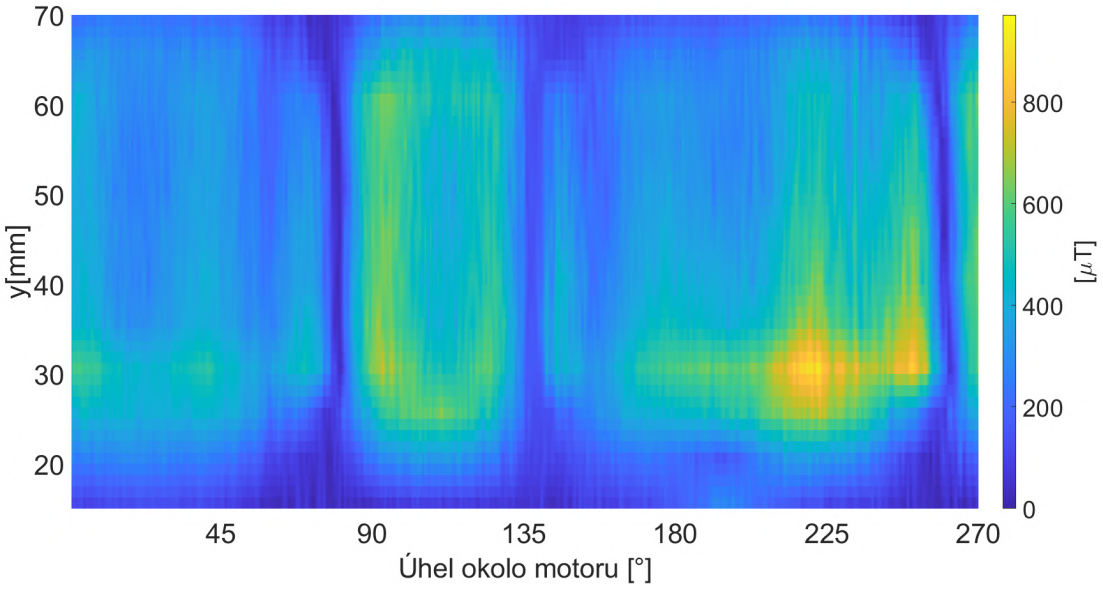
Obrázek 6.20: Součtové magnetické pole v okolí měřeného motoru získané vektorovým součtem jednotlivých rozdílových polí. Řezy rovinou, *správné zapojení*.



Obrázek 6.21: Součtové magnetické pole v okolí měřeného motoru získané vektorovým součtem jednotlivých rozdílových polí. Řezy rovinou, *nesprávné zapojení*.

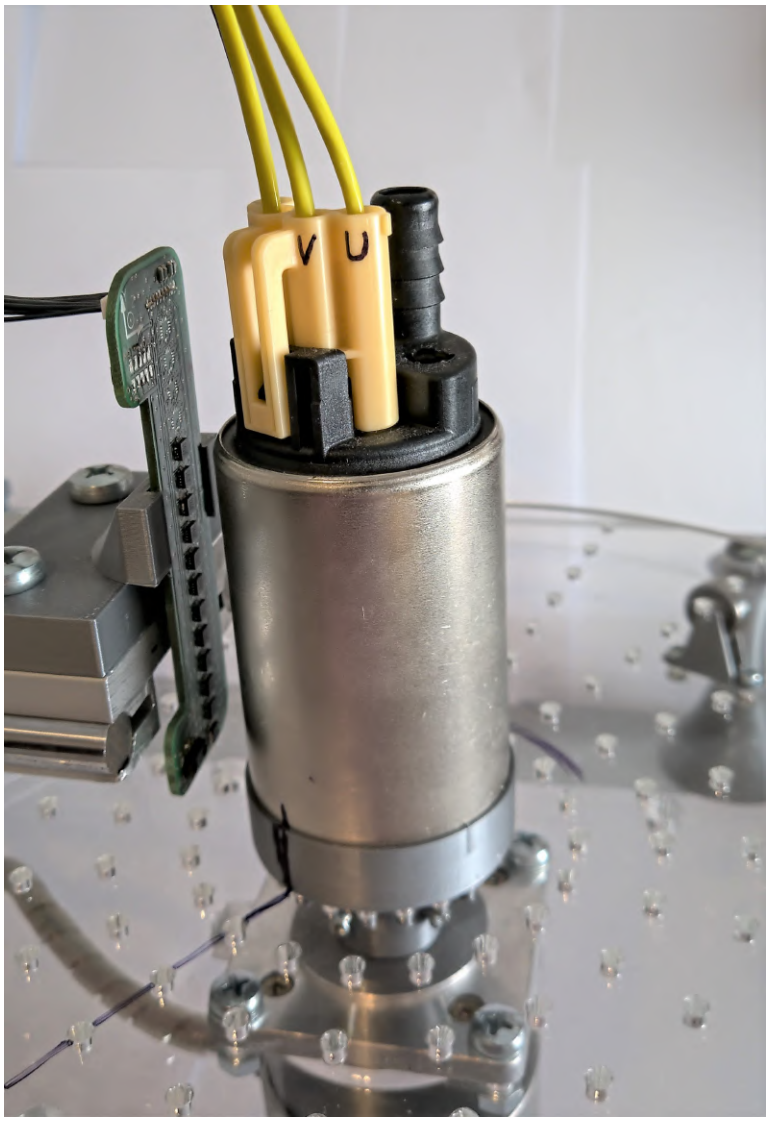


Obrázek 6.22: Velikost úhlů mezi součtovými vektory polí pro *správně* a *nesprávně* zapojený motor.



Obrázek 6.23: Velikost intenzity součtového pole *správně* zapojeného motoru.

U tohoto motoru vyplývá z porovnání obrázků 6.22 a 6.23, že určení směru rotace (zapojení) není snadné, jelikož je oblast v níž se vektory součtových polí rozchází nejvíce překrývá s velikostí intenzity pole jen částečně, a navíc jeví být nekompaktní tvarem.



Obrázek 6.24: Měřená kartáčová BLDC pumpa pro palivové, nádržové moduly.

7 Závěr

Tato práce představuje jednu vylepšenou a jednu zcela novou metodu detekce směru rotace pro malé kartáčové a BLDC motory. Tyto představené metody fungují na principu analýzy unikajícího magnetického pole vně stroje dle předem stanovené měřicí sekvence. Z tohoto důvodu se jedná o metody neinvazivní, což usnadňuje jejich aplikaci v praxi. Specifickými rysy pole unikajícího uzavření v těle motoru jsou charakteristicky slabá intenzita a prudké změny v malém okolním prostoru. Tyto jevy se stávají významnější s menšími rozměry motoru, tudíž slabší intenzitou unikajícího magnetického toku, a výrazněji tak ovlivňují měřená data, zejména z důvodu podobné intenzity magnetického pole se Zemským.

Cíle práce byly stanoveny jako následující:

1. Návrh metodiky měření a interpretace magnetického pole v okolí malých elektrických strojů.
2. Významné vylepšení metody detekce směru rotace DC kartáčových strojů ze změn v magnetické indukci vně opláštění.
3. Vývoj nové unikátní metody detekce správnosti zapojení malých elektricky komutovaných strojů ze změn v magnetické indukci vně opláštění.
4. Návrh měřicího stanoviště pro měření a vizualizaci magnetického pole v okolí malých el.motorů.

První cíl byl diskutován zejména v kapitole 4. Byly prozkoumány interpolační metody vhodné k zpracování měřených dat, které, vzhledem k charakteru měřeného pole (prudké změny v malém prostoru), jsou schopny měřená data vhodným způsobem aproximovat. Metodika měření byla shrnuta v kapitole 4.6.

V kapitolách 5.2 a 6.2 jsou představeny metody z cílů 2 a 3. První metoda, je oproti předchozím znalostem (kapitola 2.3) rozšířena tak, že je aplikovatelná v širším okolí těla diagnostikovaného motoru. Současně byla vylepšena, což vedlo k zvýšení spolehlivosti produkovaných výsledků. Druhá metoda je zcela novou, dříve nepopsanou metodou, která umožňuje diagnostikovat směr rotace elektricky komutovaných motorů na podobném principu jako metoda pro motory kartáčové.

Představené metody jsou dokazovány a jejich funkčnost ověřena pomocí množství provedených měření. Pro tyto účely bylo nejprve využito robotického stanoviště, kapitola 4.4, které ovšem nebylo pro daný účel nejvhodnější. Z těchto snah vznikl článek [1]. Bylo proto navrženo a vyvinuto stanoviště pro tyto účely vhodné (kapitola 4.5), které odstraňuje většinu nedostatků stanoviště robotického, a je výrazně cenově dostupnější - cíl 4., praktický.

7.1 Přínosy disertační práce

Přínosy této práce jsou následující:

- Byla představena metodika pro měření a interpretaci magnetického pole v okolí malých elektrických strojů (kapitola 4.6). Požadavky na tuto metodiku byly odvozeny ze změřených veličin typických pro tyto elektrické stroje. Byly diskutovány specifika těchto měření (velmi slabé změny v měřeném magnetickém toku, prudké změny orientace pole ve velmi prostoru) a postupy, které umožňují tato magnetická pole měřit a správně interpretovat. Výsledky byly publikovány v časopise [1].
- Na základě rešerše byly představeny aproximační metody vhodné pro reprezentaci těchto unikajících magnetických polí. Představené metody byly aplikovány za použití nejběžněji používaného inženýrského nástroje *MATLAB*. Důraz byl kladen na vhodnost využití zejména v místech prudkých změn orientace magnetické indukce. Výsledky budou publikovány.
- Již existující metoda detekce zapojení/směru rotace kartáčových motorů (kapitola 5.2), která je aplikována v komerčně dostupném senzoru (kapitola 2.3)[17], byla významně vylepšena. Představená vylepšení spočívají v aplikovatelnosti metody v širším okolí opláštění měřeného motoru a také ve významném zvýšení spolehlivosti stanovení výsledků měření (kapitola 5.2.4). Výsledky byly publikovány v časopise [1] a na konferencích [2][3][4].
- Byla představena zcela nová, unikátní metoda detekce správnosti zapojení (směru rotace) elektricky komutovaných motorů (kapitola 6.2). Byl obecně popsán princip metody a představen algoritmus její aplikace. Rovněž byly na základě představených vizualizací měřeného pole ukázány její omezení. Výsledky budou publikovány v jednom z budoucích výstupů.
- Pro potřeby provedení přesných měření bylo využito robotického stanoviště (kapitola 4.4), které ovšem mělo určitá omezení [1]. Za účelem odstranění nedostatků robotického stanoviště a naměření lepších dat, bylo nově navrženo vhodné, cenově dostupné měřicí stanoviště (kapitola 4.5). Byla popsána jeho mechanika, představen potřebný software a zpracování dat. Bude-li potřeba, je tak snadné na tyto výsledky navázat a sestavit podobné měřicí stanoviště.

8 Literatura

[1] MATĚJÁSKO, M., BRABLC, M., APPEL, M. and GREPL, R., 2021. Contactless fault detection of a dc motor direction of rotation using its stray magnetic field. Machines, 9(11),. https://doi.org/10.3390/machines9110281

[2] GREPL, R., MATEJASKO, M., BASTL, M. and ZOUHAR, F., 2015. Design of a fault tolerant redundant control for electro mechanical drive system, 2015 21st International Conference on Automation and Computing: Automation, Computing and Manufacturing for New Economic Growth, ICAC 2015 2015.

[3] VEJLUPEK, J.; GREPL, R.; MATEJASKO, M.; ZOUHAR, F. Automotive fuel pump fault detection based on current ripple FFT and changes in magnetic field. International Journal of Systems Applications, Engineering Development, 2013, n.3, p. 130-138. ISSN: 2074-1308.

[4] GREPL, R.; VEJLUPEK, J; MATEJASKO, M.; ZOUHAR, F. Sesnorless detection of DC motor rotation direction for automotive fuel pump fault diagnosis. In Recent Advances in Circuits, Communications and Signal Processing. ELSINA. Cambridge UK: WSEAS Press, 2013. p. 195-199. ISBN: 978-1-61804-164-7.

[5] PUSCA, Remus and Raphael ROMARY. Advances in diagnosis of electrical machines through external magnetic field. In: 2015 7th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI) [online]. IEEE, 2015, 2015, P-5-P-12

[6] RIGONI, M., N. SADOWSKI, N. J. BATISTELA, J.P. A. BASTOS, S. L. NAU and A. KOST. Detection and analysis of rotor faults in induction motors by the measurement of the stray magnetic flux. Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications[online]. 2012, 11(1), 68-80

[7] PUSCA, Remus, Raphael ROMARY, Andrian CEBAN and Jean-François BRUDNY. An Online Universal Diagnosis Procedure Using Two External Flux Sensors Applied to the AC Electrical Rotating Machines. Sensors [online]. 2010, 10(11), 10448-10466

[8] FEDIDA, V., L-L. ROUVE, O. CHADEBEC, L. GARBUIO, S. LEMAITRE, T. TOLLANCE and L. WEBER. Stray magnetic field analysis applied to the internal unbalances diagnosis of low power single phase induction motor. In: 2016 XXII Interna-tional Conference on Electrical Machines (ICEM) [online]. IEEE, 2016, 2016, s. 2352-2358

[9] SZULIM, Przemyslaw and Szymon GONTARZ, USING THE SURROUNDING MAGNETIC FIELD IN DIAGNOSIS OF THE BLDC MOTOR, Journal of Electrical Engineering, vol. 66, 2015, 7p.

[10] SPYROPOULOS, Dionysios V., Konstantinos N. GYFTAKIS, Joya KAPPATOU and Epaminondas D. MITRONIKAS. The influence of the broken bar fault on the magnetic field and electromagnetic torque in 3-phase induction motors. In: 2012 XXth International Conference on Electrical Machines [online]. IEEE, 2012, 2012, s. 1868-187

[11] CABANAS, Manés F., Francisco PEDRAYES, Manuel G. MELERO, Carlos H. ROJAS GARCIA, José M. CANO, Gonzalo Alonso ORCAJO and Joaquín González NORNIELLA. Unambiguous Detection of Broken Bars in Asynchronous Motors by Means of a Flux Measurement-Based Procedure. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement[online]. 2011, 60(3), 891-899

[12] LIU, Zheng, Guiyun TIAN, Wenping CAO, Xuewu DAI, Brian SHAW a Robert LAMBERT. Non-invasive load monitoring of induction motor drives using magnetic flux sensors. IET Power Electronics [online]. 2017, 10(2), 189-195

[13] SERGEANT, Peter, Isabelle HOFMAN and Alex Van DEN BOSSCHE. Magnetic stray field based position detection in BLDC outer rotor permanent magnet synchronous machines. International Journal of Numerical Modelling: Electronic Net-works, Devices and Fields[online]. 2014, 27(3), 544-554

[14] V. Gurusamy, K. H. Baruti, M. Zafarani, W. Lee and B. Akin, "Effect of Magnets Asymmetry on Stray Magnetic Flux Based Bearing Damage Detection in PMSM,"in IEEE Access, vol. 9, pp. 68849-68860, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3076779.

[15] V. Gurusamy, G. -A. Capolino, B. Akin, H. Henao, R. Romary and R. Pusca, "Recent Trends in Magnetic Sensors and Flux Based Condition Monitoring of Electromagnetic Devices,"in IEEE Transactions on Industry Applications, doi: 10.1109/TIA.2022.3174804.

[16] Process Control Electronic GmbH, online: https://www.pce-systems.com/, 01.06.2022

[17] Process Control Electronic GmbH, Products, Rotation direction sensors, online: https://www.pce-systems.com/93.html, 01.06.2022

[18] Melexis, MLX90393, online: https://www.melexis.com/en/product/MLX90393/Triaxis-Micropower-Magnetometer, 01.06.2022

[19] MLX90393 Triaxis® Magnetic Node, Melexis, Datasheet, online: https://www.melexis.com/-/media/files/documents/datasheets/mlx90393-datasheet-melexis.pdf, 01.06.2022

[20] Smoothness - Wikipedia, online: https://en.wikipedia.org/wiki/Smoothness, 01.06.2022

[21] Interpolate 2-D or 3-D scattered data - MATLAB griddata, online: https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/griddata.html, 01.06.2022

[22] Delaunay triangulation - Wikipedia, online: https://en.wikipedia.org/wiki/Delaunay_triangulation, 01.06.2022

[23] UR10e Collaborative industrial robot, online: https://www.universal-robots.com/products/ur10-robot/, 01.06.2022

[24] United States Naval Academy [US], online: https://www.usna.edu/Users/weaprcon/kutzer/_Code-Development/UR_Toolbox.php, 01.06.2022

[25] GitHub - SintefManufacturing/python-urx: Python library to control a robot from 'Universal Robots', online: http://www.universal-robots.com/ https://github.com/SintefManufacturing/python-urx, 01.06.2022

[26] HAWKINS, Kelsey P.; Analytic Inverse Kinematics for the Universal Robots UR-5/UR-10 Arms, Technical report, 2013

[27] Universal Robots - DH Parameters for calculations of kinematics and dynamics, online: https://www.universal-robots.cn/articles/ur/application-installation/dh-parameters-for-calculations-of-kinematics-and-dynamics/, 01.06.2022

[28] dsPIC33CK64MP205 — Microchip Technology, online: https://www.microchip.com/en-us/product/dsPIC33CK64MP205, 01.06.2022

[29] LM2576 data sheet, product information and support — TI.com, online: https://www.ti.com/product/LM2576, 01.06.2022

[30] DRV8844 data sheet, product information and support — TI.com, online: https://www.ti.com/product/DRV8844, 01.06.2022

[31] Pololu - A4988 Stepper Motor Driver Carrier, online: https://www.pololu.com/product/1182, 01.06.2022

[32] ISO7242C data sheet, product information and support — TI.com, onine: https://www.ti.com/product/ISO7242C, 01.06.2022

[33] FT231XS - FTDI, online: https://ftdichip.com/products/ft231xs/, 01.06.2022

[34] MPLAB® X IDE, Microchip Technology, online: https://www.microchip.com/en-us/tools-resources/develop/mplab-x-ide, 01.06.2022

[35] MPLAB® Code Configurator — Microchip Technology, online: https://www.microchip.com/en-us/tools-resources/configure/mplab-code-configurator, 01.06.2022

[36] Termite: a simple RS232 terminal, online: https://www.compuphase.com/software_termite.htm, 01.06.2022

[37] DCSENS06ENGL DRH.pdf, online: https://www.pce-systems.com/system/content/doculink/download.php?id=936, 01.06.2022

[38] surpass-hobby.com, online: http://www.surpass-hobby.com/, 01.06.2022

[39] X-TEAM XTI-3665 Inrunner Brushless Motor for 1/10th R/C car — X-TEAM BRUSHLESS DC MOTOR, online: https://www.x-teamrc.com/product/x-team-xti-3665-inrunner-brushless-motor-for-1-10th-r-c-car/, 01.06.2022

A Seznam publikací autora

A1 MATĚJÁSKO, M., BRABLC, M., APPEL, M. and GREPL, R., 2021. Contactless fault detection of a dc motor direction of rotation using its stray magnetic field. Machines, 9(11),. https://doi.org/10.3390/machines9110281

A2 GREPL, R., MATEJASKO, M., BASTL, M. and ZOUHAR, F., 2015. Design of a fault tolerant redundant control for electro mechanical drive system, 2015 21st International Conference on Automation and Computing: Automation, Computing and Manufacturing for New Economic Growth, ICAC 2015 2015.

A3 VEJLUPEK, J.; GREPL, R.; MATEJASKO, M.; ZOUHAR, F. Automotive fuel pump fault detection based on current ripple FFT and changes in magnetic field. International Journal of Systems Applications, Engineering Development, 2013, n.3, p. 130-138. ISSN: 2074-1308.

A4 GREPL, R.; VEJLUPEK, J; MATEJASKO, M.; ZOUHAR, F. Sesnorless detection of DC motor rotation direction for automotive fuel pump fault diagnosis. In Recent Advances in Circuits, Communications and Signal Processing. ELSINA. Cambridge UK: WSEAS Press, 2013. p. 195-199. ISBN: 978-1-61804-164-7.