



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

AUTHOR

Ing. Michal Matějásko

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. Robert Grepl, Ph.D.

BRNO 2022

Klíčová slova

magnetické pole, unikající magnetické pole, DC motor, BLDC motor, detekce směru rotace, analýza z magnetického pole, diagnostika

Key words

magnetic field, stray magnetic field, DC motor, BLDC motor, detection of rotation direction, magnetic field analysis, diagnostics

Místo uložení práce

Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství
Technická 2896/2
616 69 Brno (CZ)

ISBN 80-214-
ISSN 1213-4198

Obsah

1	Úvod	4
2	Rešerše	6
2.1	Existující metoda detekce směru rotace pro DC motory	6
3	Specifikace cílů práce	9
4	Měření unikajícího magnetického pole z opláštění malých elektrických motorů	11
4.1	Charakteristiky pole	11
4.2	Interpolace měřených dat	13
4.3	Návrh vhodného měřicího stanoviště	16
4.4	Metodika měření	21
5	Detekce směru rotace DC motorů	23
5.1	Unikající magnetické pole	23
5.2	Vylepšení metody detekce směru rotace	26
6	Detekce směru rotace BLDC motorů	31
6.1	Unikající magnetické pole	31
6.2	Nová unikátní metoda detekce směru rotace (správnosti zapojení) . .	34
7	Závěr	38
7.1	Přínosy disertační práce	39
8	Literatura	41

Kapitola 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 stroje (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

stejnosemých 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.

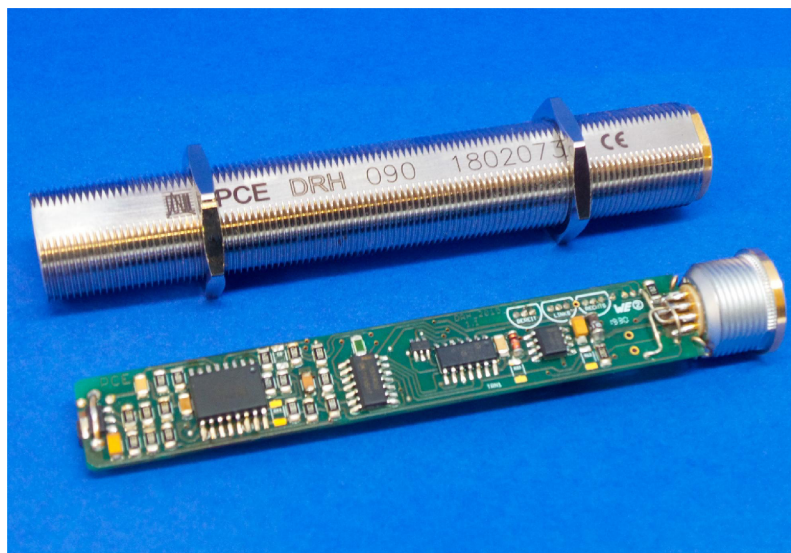
Na základě získaných poznatků jsou diskutovány obtíže spojené s měřením a interpretací unikajícího magnetického pole, a je představena metodika pro tato měření, která usnadňuje aplikaci diagnostických metod pro, v této práci zkoumané, stejnosměrně napájené elektrické stroje nižších výkonů.

Kapitola 2

Rešerše

2.1 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 2.1 můžeme vidět právě jeden z těchto senzorů, který je aplikačně shodný s oblastí zájmu této disertační práce.



Obrázek 2.1: Průmyslový senzor DRH 090 od firmy *Process Control Electronic GmbH* pro detekci směru rotace DC motorů. Převzato z webu firmy [17].

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].

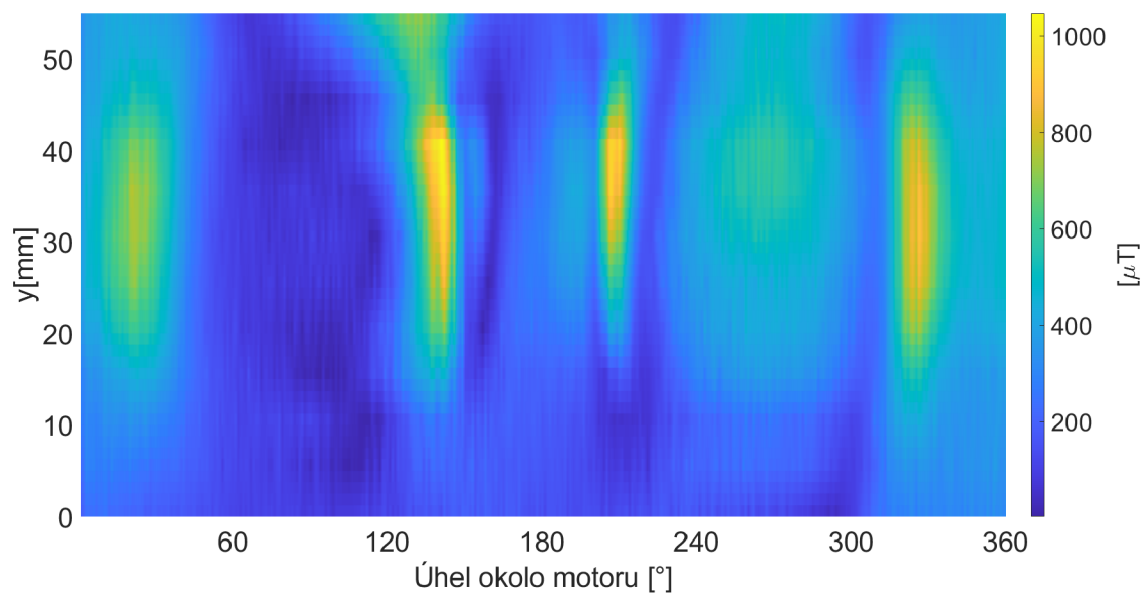
Algoritmus měření se senzorem funguje přibližně takto:

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 \mathbf{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 $\mathbf{b}_{rotujici}$.
5. Senzor stanoví výsledek vypočtením vektoru magnetické indukce jako:

$$\mathbf{b} = \mathbf{b}_{rotujici} - \mathbf{b}_{klid} \quad (2.1)$$

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

Na obrázku 2.2 můžeme vidět intenzitu rozdílového pole v okolí celého motoru. Lze vypořadovat, 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.



Obrázek 2.2: Intenzita rozdílového magnetického pole, pro uvedenou metodu, okolo celého obvodu měřeného motoru (data získána měřením stejného motoru jako v kapitole 5).

Kapitola 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. Navrhujeme 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 doprovázeny 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.

Kapitola 4

Měření unikajícího magnetického pole z opláštění malých elektrických motorů

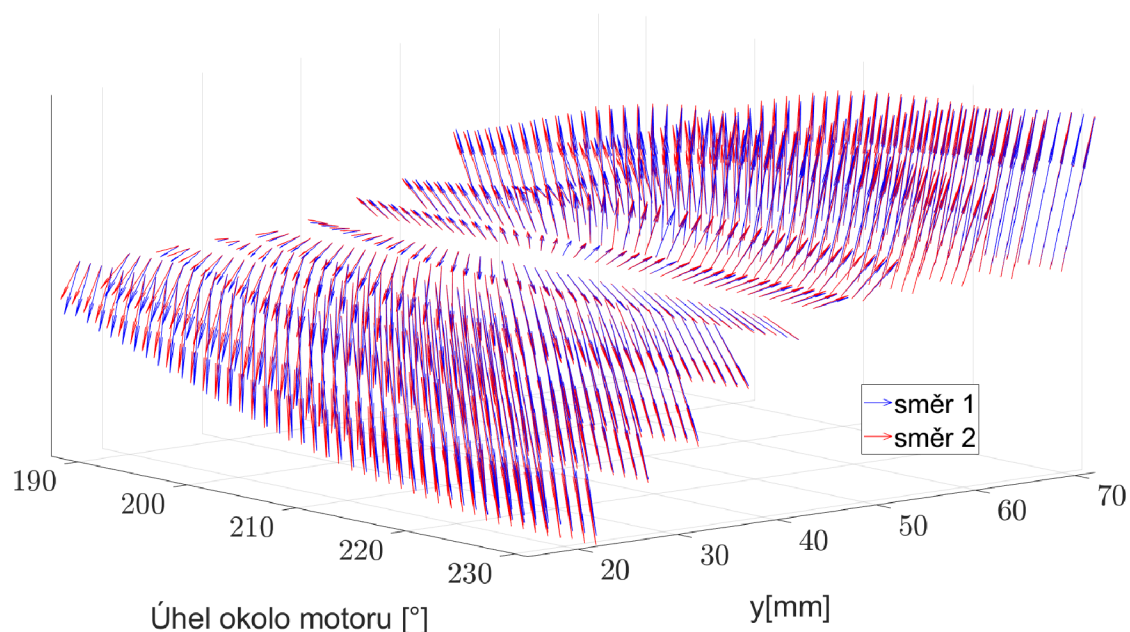
4.1 Charakteristiky pole

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.

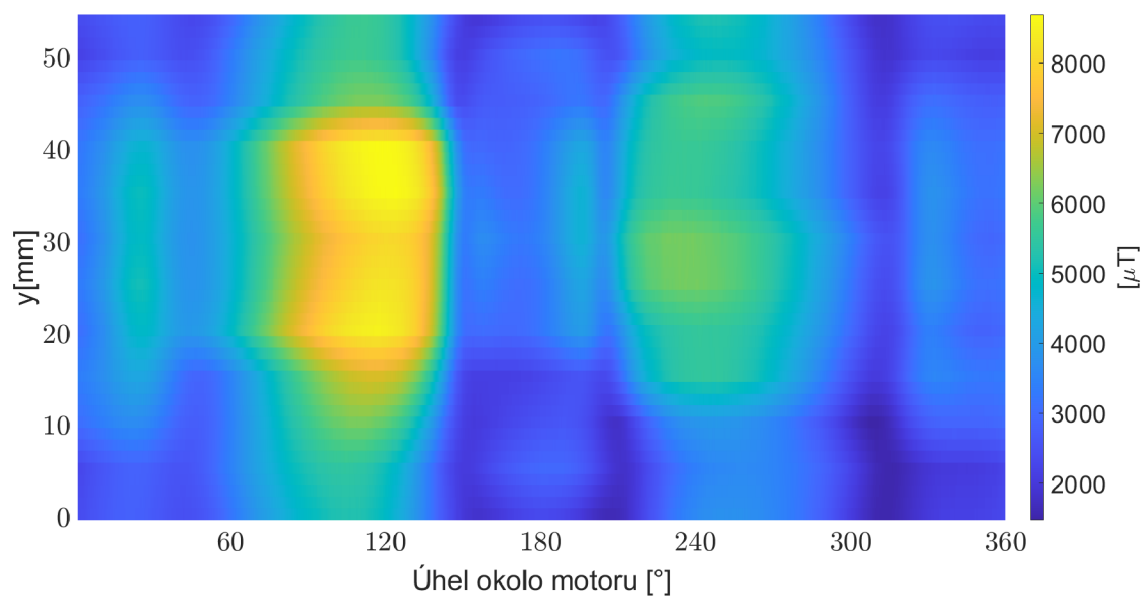
Na obrázku 4.1 je vykreslen výřez pole právě při takovém měření, a to pro rotaci motoru - protékajícím proudem - oběma možnými směry. Z obrázku lze vidět, jak se orientace magnetického pole v daném místě mění, dále lze vidět změnu jeho intenzity v závislosti na místě měření (toto lze usoudit z relativní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

Bylo již zmíněno, že hlavní výzvy pro měření a analýzu unikajícího magnetického pole jsou jeho slabá intenzita a lokálně prudké změny jeho orientace. Vzhledem k podobě intenzity pole nabízí obrázek 4.2. Na tomto obrázku lze vidět, že pro měřený motor, při protékajícím proudem 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° .



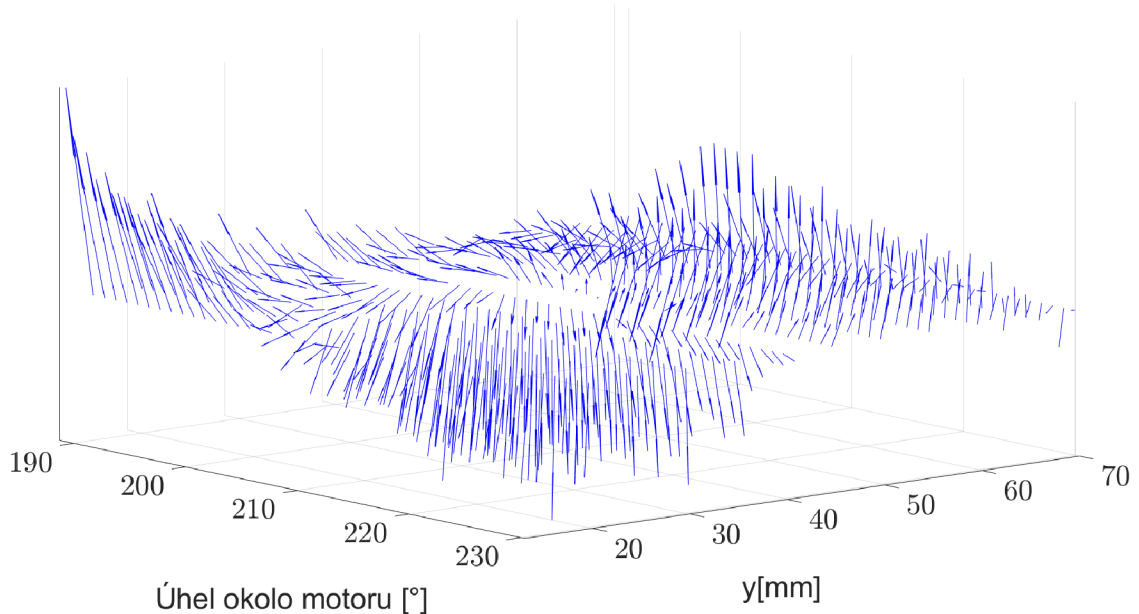
Obrázek 4.1: Výřez ve změřeném unikajícím magnetickém poli v blízkosti pláště měřeného DC motoru, pro dva směry rotace.



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.

Magnetické pole lze také získat výpočtem. Jednou z možností je například již zmíněná metoda komerčního senzoru (rovnice 2.1) v kapitole 2.1. Na obrázku

4.3 můžeme vidět výřez magnetického rozdílové pole, 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 měřeními stavy, což je často předmětem zájmu mnohých diagnostických metod.

4.2 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 unikaajícího 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 $x_3 = (x_3, y_3)$ 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 .

$$h = ax + by + c \quad (4.1)$$

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

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

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

$$h = a_1h_1 + a_2h_2 + a_3h_3 \quad (4.3)$$

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

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

nebo vyjádřeno jiným zápisem jako

$$a_1 = M_1/M, \quad a_2 = M_2/M, \quad a_3 = M_3/M, \quad (4.5)$$

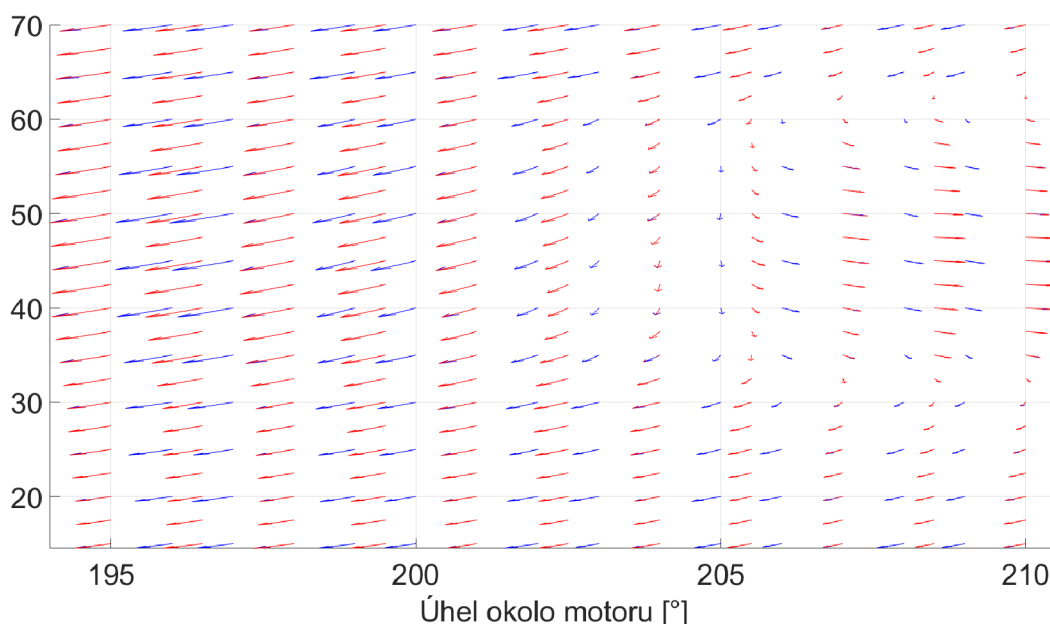
kde

$$\begin{aligned} M &= \begin{vmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}, & M_1 &= \begin{vmatrix} x & x_2 & x_3 \\ y & y_2 & y_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}, \\ M_2 &= \begin{vmatrix} x_1 & x & x_3 \\ y_1 & y & y_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}, & M_3 &= \begin{vmatrix} x_1 & x_2 & x \\ y_1 & y_2 & y \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}. \end{aligned}$$

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

Na obrázku 4.4 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.

4.3 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.

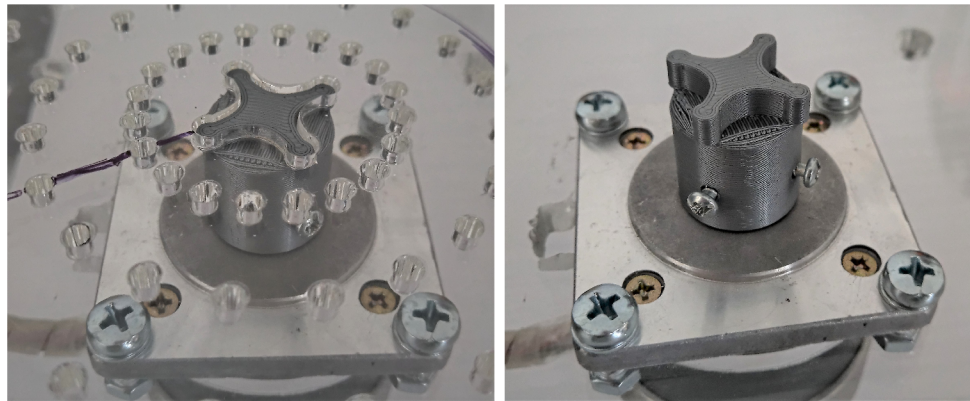
4.3.1 Mechanika stanoviště

Aby mohly být splněny první 3 body z požadavků na mechaniku stanoviště, byl jako materiál základny zvolen plexisklo. Tento materiál poskytuje dostatečnou me-

chanickou stabilitu, je levný a lze jej snadno mechanicky opracovat pomocí laserové rezačky.

Pro umístění a uchycení měřeného motoru byla navržena kruhová platforma s úchytnými děrami, rovněž vyrobená z plexiskla. 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.

Žádaný pohyb kruhové platformy je umožněn díky speciálnímu návrhu tištěné distanční spojky mezi krokovým motorem ovládajícím pohyb platformy, který je umístěn zesponu základní desky, a platformou samotnou (obrázek 4.5), a také díky uložení na třech ložiscích s rozestupem 120° .



Obrázek 4.5: 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. 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.

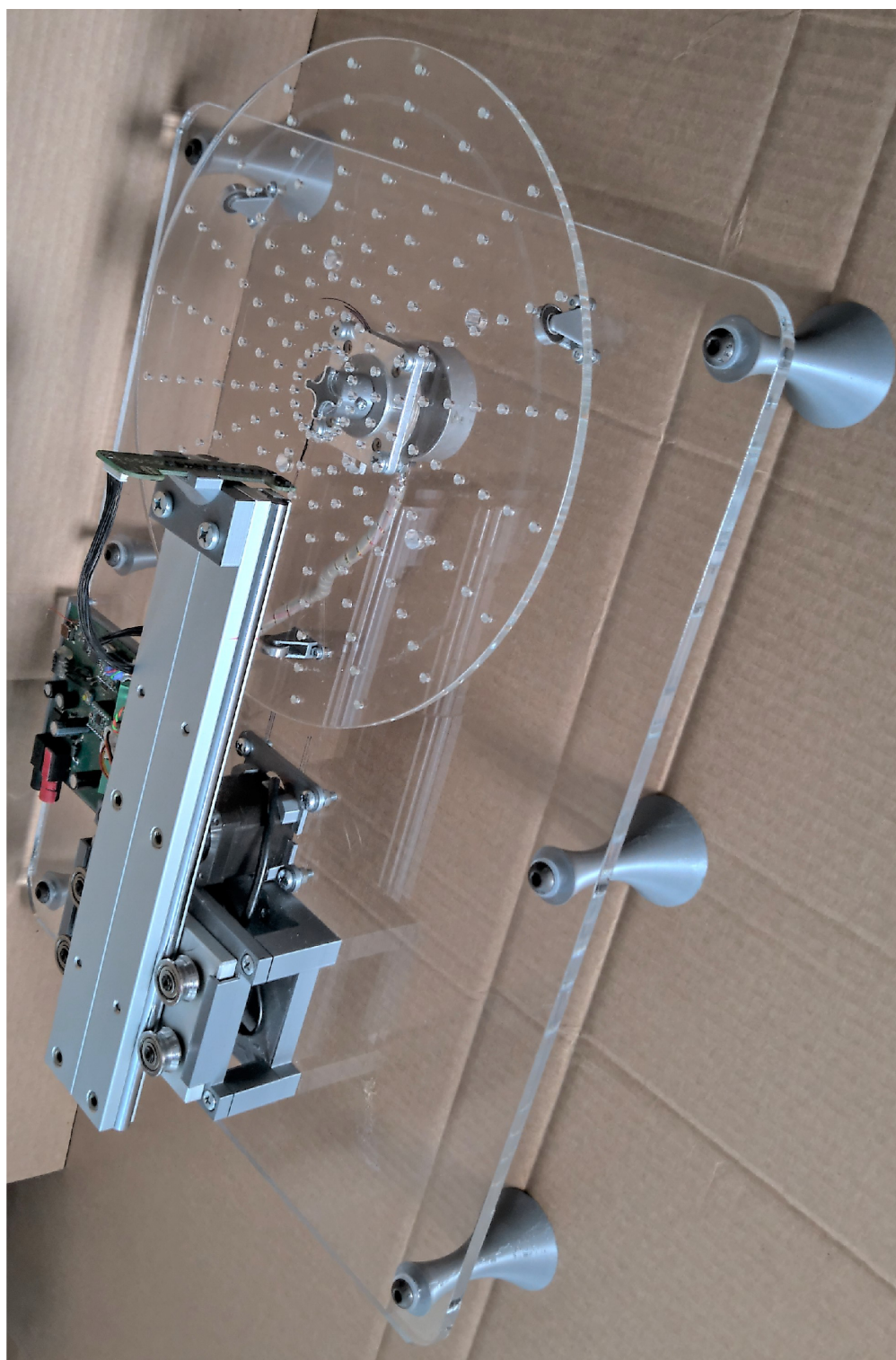
Pohyb lineárního vedení je umožněn krokovým motorem, umístěným ze sporní části, pomocí tištěného ozubeného spojení mezi hřídelí motoru a tištěným ozubením nalepeném v drážce lineárního vedení, tak jak jej lze vidět na obrázku 4.6. Pro správnou funkci celé této sestavy bylo dále potřeba umístit uchycení obráceného vozíku posuvu do správné výšky. Toho bylo docíleno pomocí (opět) tištěného dílu úchytu. Pomocí 3D tisku bylo také řešeno uchycení krokového motoru pro lineární posuv, viditelný na stejném obrázku.

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.

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. Fotografie celého stanoviště lze vidět na obrázku 4.7.



Obrázek 4.6: Detail tištěného ozubeného spojení krokového motoru s lineárním posuvem, přes ozubení umístěné do drážky posuvu.



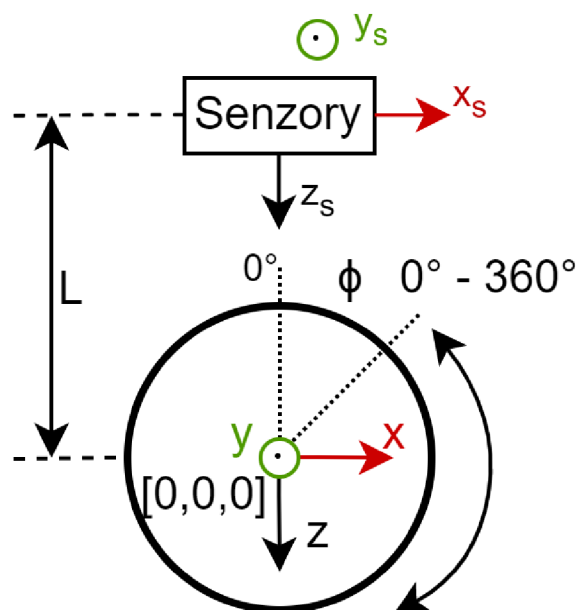
Obrázek 4.7: Foto celé měřicí stanice.

4.3.2 Software

Obslužný PC software

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.

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 4.8 ukazuje sestavu těchto dvou souřadných systémů.



Obrázek 4.8: Schéma souřadného systému senzorů a souřadného systému motoru umístěném na rotační podložce.

Ve schéma na obrázku 4.8 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

systeme, 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:

$$b_x = \cos(\phi)b_{sx} + \sin(\phi)b_{sz} \quad (4.6)$$

$$b_z = \cos(\phi)b_{sz} - \sin(\phi)b_{sx} \quad (4.7)$$

$$b_y = b_{sy} \quad (4.8)$$

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:

$$\mathbf{b} = [b_x, b_y, b_z] \quad (4.9)$$

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

$$p_x = -L \sin(\phi) \quad (4.10)$$

$$p_z = -L \cos(\phi) \quad (4.11)$$

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

4.4 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. 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.*
- *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 rozdílové nebo součtové pole, která při porovnání s referencí odhalí směr rotace či správnost zapojení.*

Kapitola 5

Detekce směru rotace DC motorů

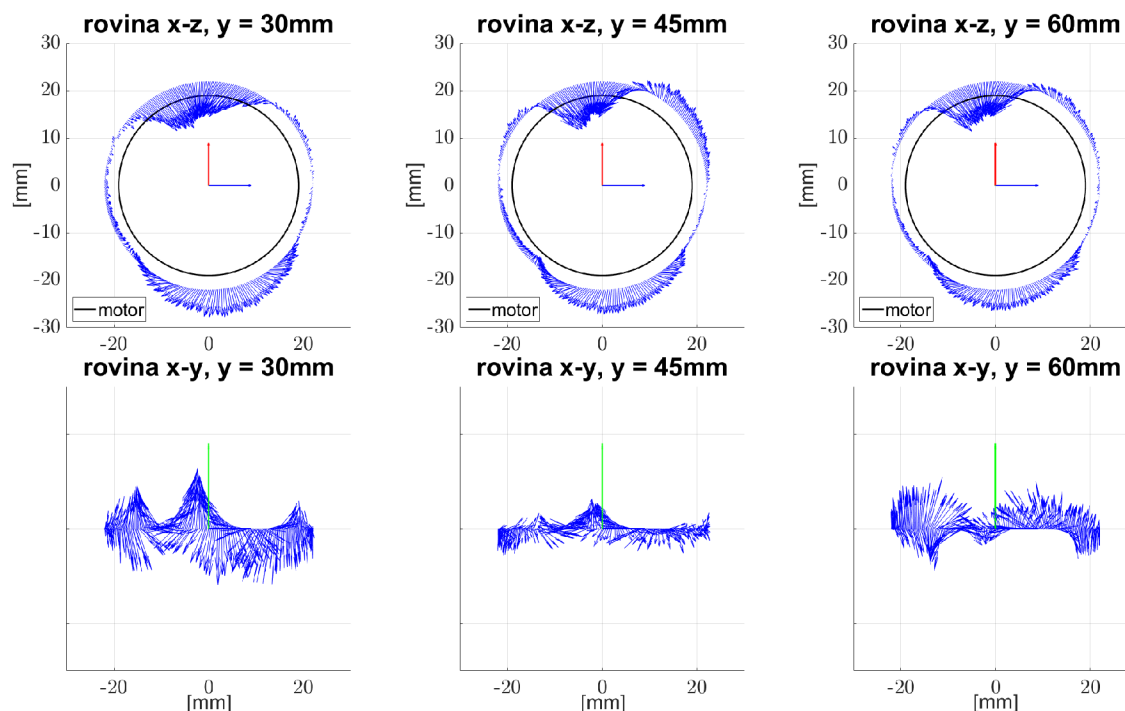
Tato kapitola se zabývá detekcí směru rotace kartáčového DC motoru, respektive vylepšením metody představené v kapitole 2.1. Veškerá tvrzení v této kapitole jsou představena a demonstrována pomocí sady měření provedených na stejném motoru jako v kapitole 4.1, tedy DC palivové pumpě pro nádrže benzínových automobilů, měřené při napětí 5V, protékajícím proudem 1.2A a přibližně 1420 ot./min.

5.1 Unikající magnetické pole

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°.

Poněkud zajímavější vzhled do magnetického pole přináší výpočet pole rozdílového, jenž lze vidět na obrázku 5.1. Jak bylo zmíněno v kapitole 2.1, 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.

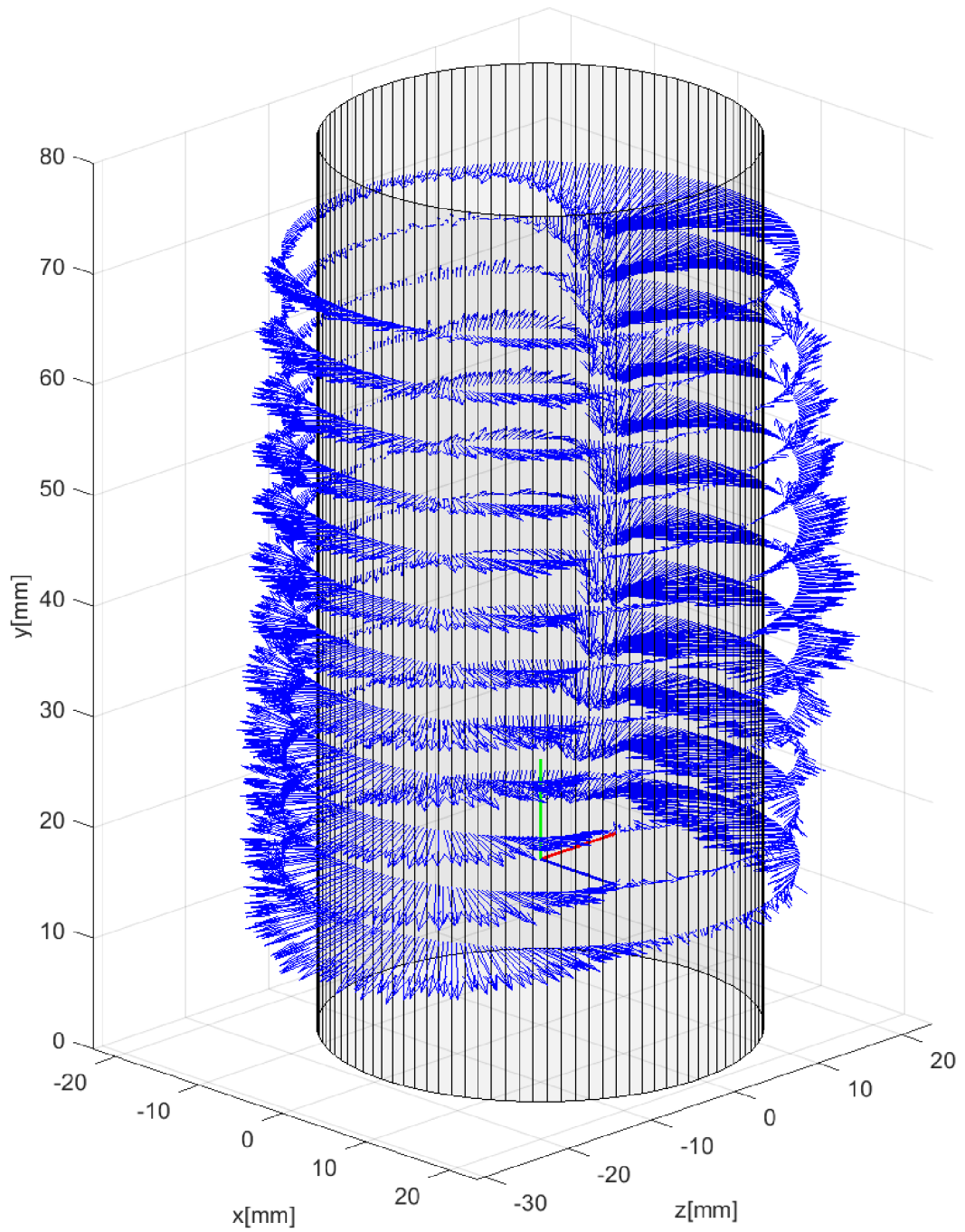


Obrázek 5.1: Vektory magnetické indukce v okolí měřeného DC motoru. Řezy rovinou, poloměr 22mm, rozdílové pole.

Jak lze z obrázku 5.1 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.

Zobrazíme-li rozdílové pole v celé obálce o konstantní vzdálenosti 22mm od motoru z izometrického pohledu, získáme obrázek 5.2. 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 5.2: 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 2.1. 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 2.2.

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:

$$\mathbf{v} = \mathbf{p} - \mathbf{n} \quad (5.1)$$

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 a 5.2 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.

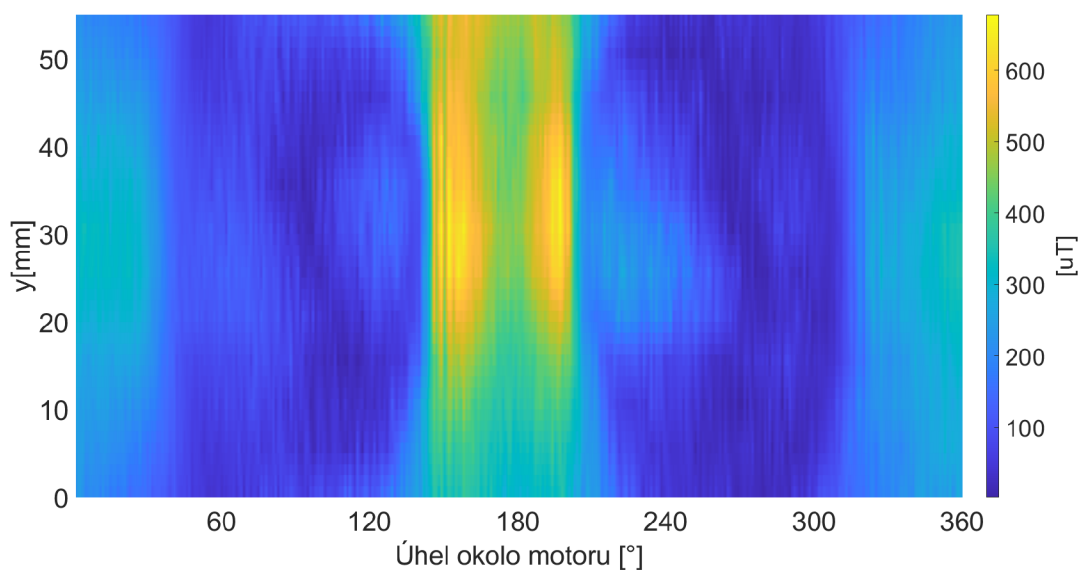
Z toho vyplývá, že vhodná místa pro aplikaci této vylepšené metody detekce musí splňovat následující:

- 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 5.3. 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 $y \in \langle 20\text{mm}, 45\text{mm} \rangle \cap x \in \langle 145^\circ, 205^\circ \rangle$, se nachází v místech mezery mezi statorovými magnety. Právě zde je vliv pole generovaného protékajícím proudem nejsilnější.



Obrázek 5.3: 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:

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

- (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

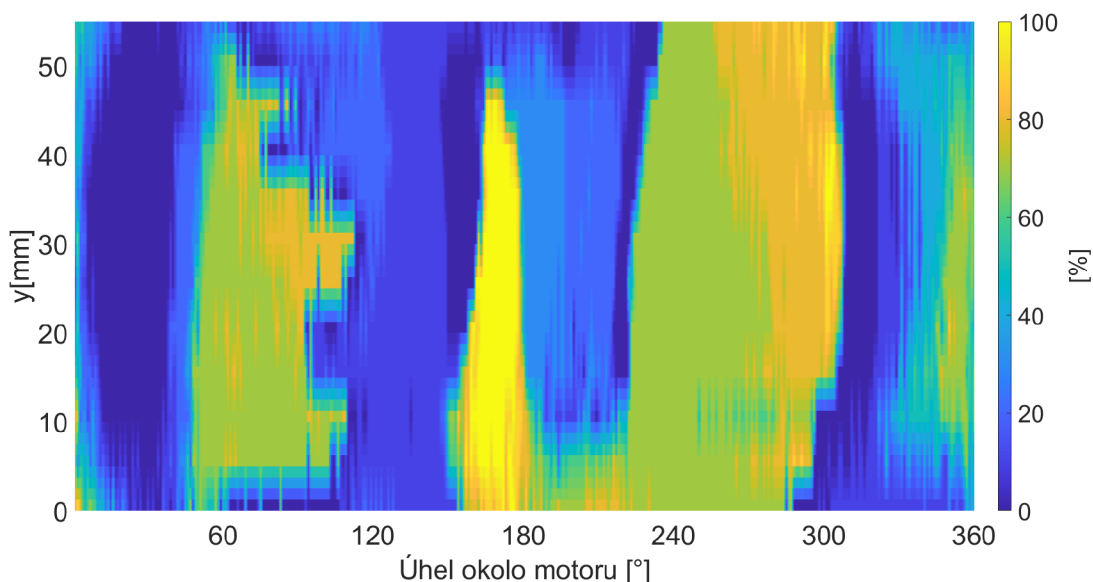
$$K = \frac{\sqrt{2}}{2} \quad (5.3)$$

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 2.1). 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.



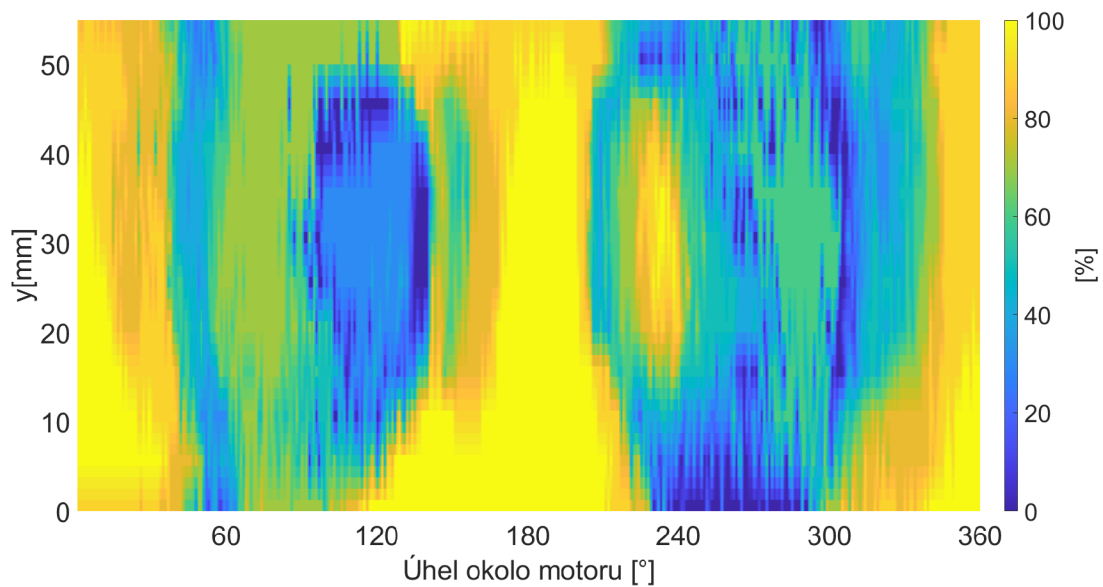
Obrázek 5.4: Úspěšnost aplikace *původního* algoritmu detekce směru rotace v celém okolí měřeného DC motoru.

Na obrázku 5.4 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 2.2 v kapitole 2.1. Můžeme vidět, že oblast, která je podle obrázku 5.4 spolehlivá pro úspěšnost aplikace *původní* metody, neodpovídá oblastem s nejvyšší intenzitou z obrázku 2.2. 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 5.5 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 5.3, a navíc se zde objevuje druhá významná oblast v okolí úhlů 0° a 360° , jenž je na obrázku s intenzitou také viditelná.



Obrázek 5.5: Úspěšnost aplikace *vylepšeného* algoritmu detekce směru rotace v celém okolí měřeného DC motoru.

Kapitola 6

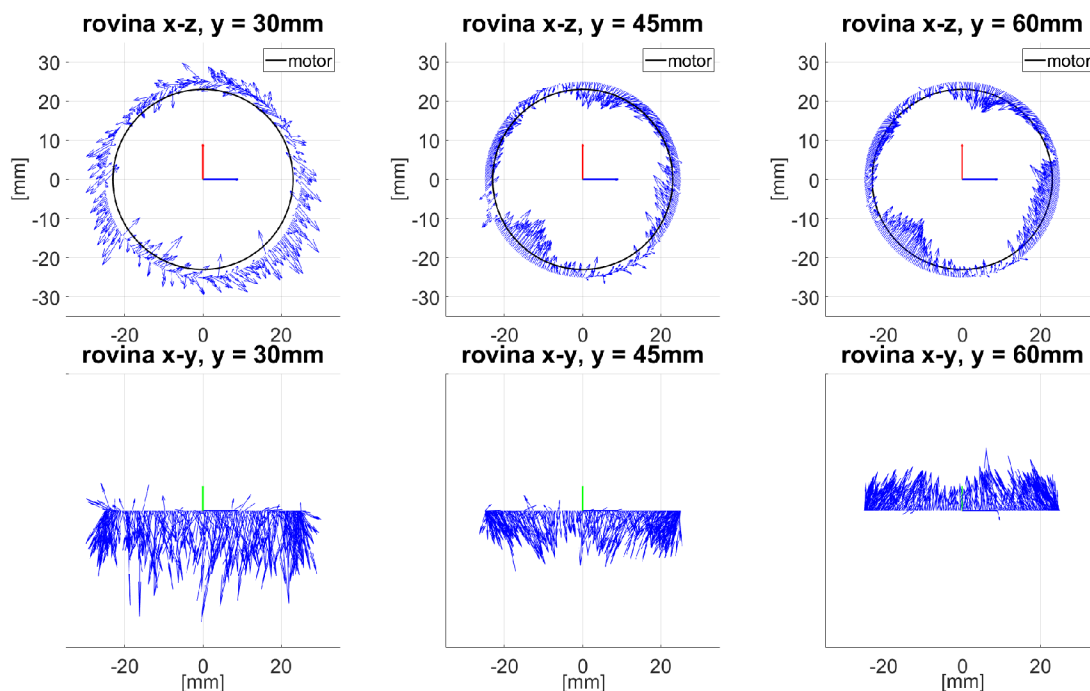
Detekce směru rotace BLDC motorů

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.

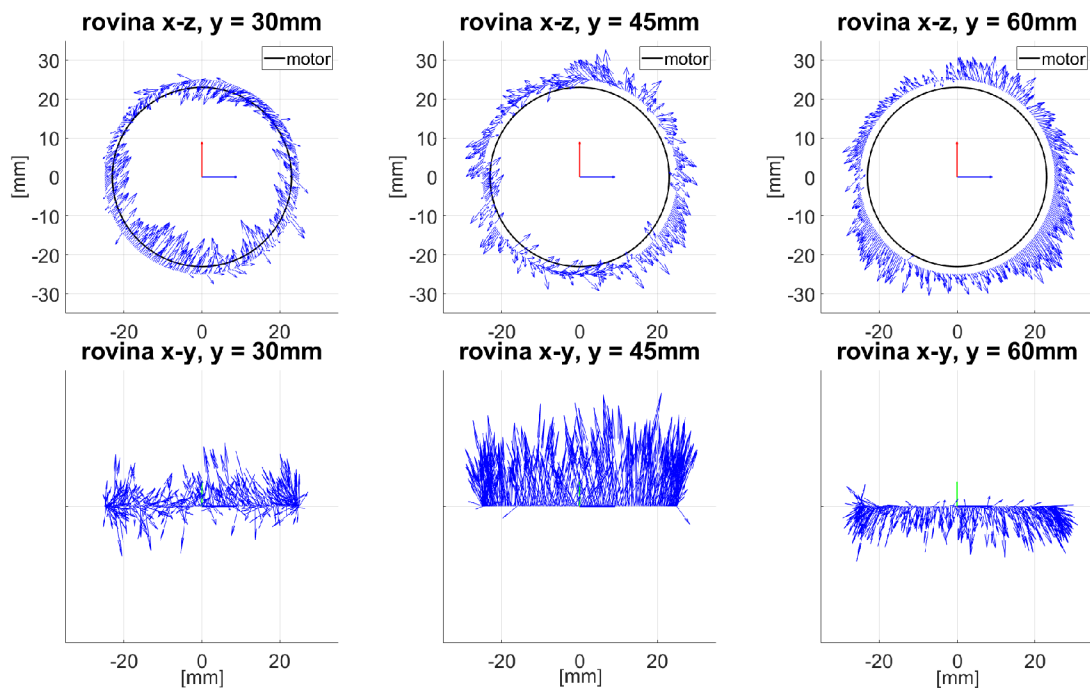
6.1 Unikající magnetické pole

Součtové pole vypadá je zobrazeno na obrázku 6.1 pro správné zapojení, a na obrázku 6.2 pro zapojení obrácené. Z obrázků lze vidět, že součtové pole se skutečně chová tak je předpokládáno, a zejména na obrázku 6.1 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 6.2 lze vidět, že pole je orientováno právě opačně.

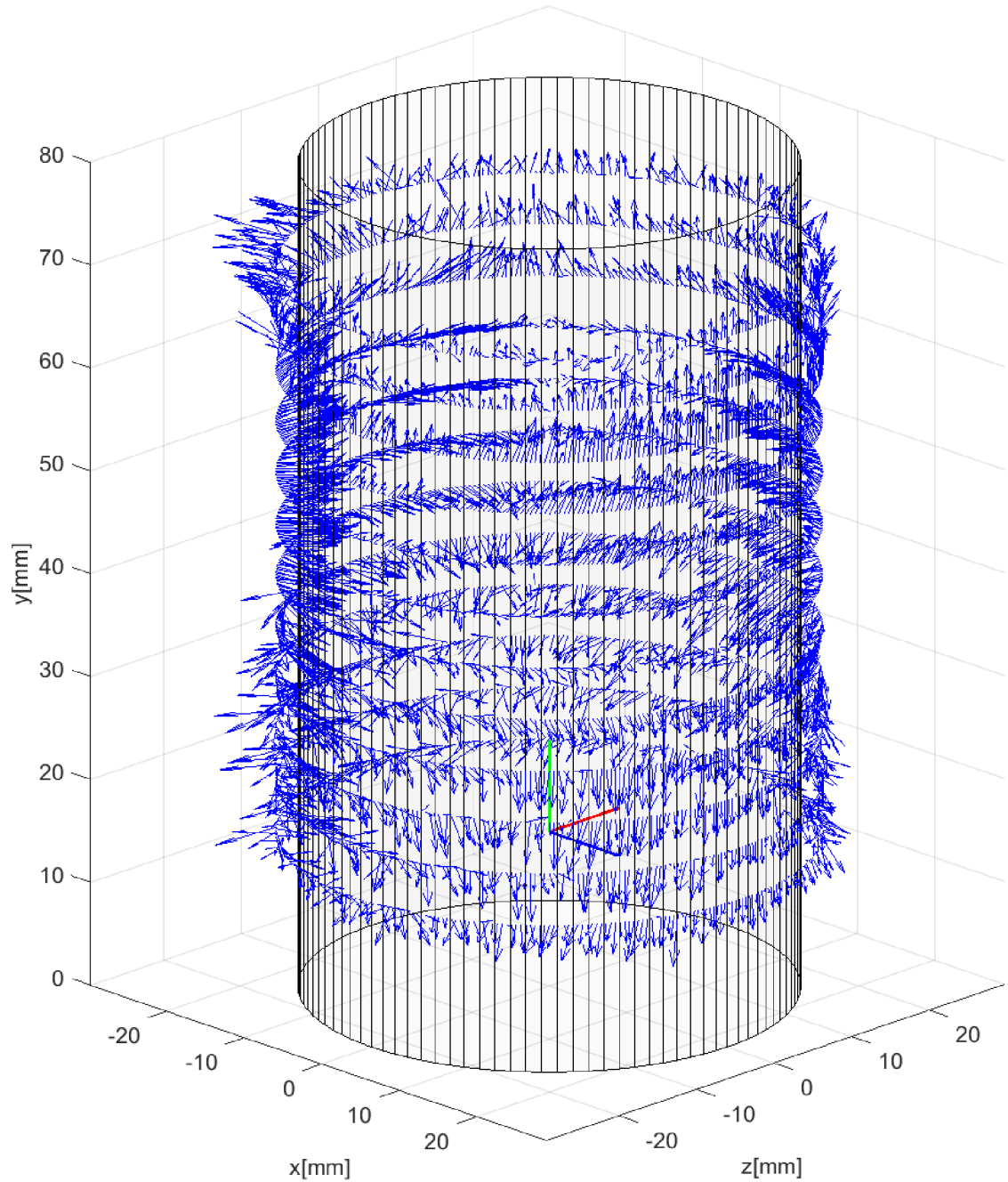
Pro úplnost je na obrázku 6.3 zobrazeno unikající magnetické pole v okolí měřeného motoru v celém rozsahu ve 3D z izometrického pohledu. V rozmezí $y = 40 - 70mm$ jsou vidět zřetelně oblasti, ve kterých na obrázku 6.3 směřují vektory magnetické indukce do středu motoru. Právě v těchto místech je nejpatrnější 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 6.1: Součtové magnetické pole v okolí BLDC motoru získané vektorovým součtem jednotlivých rozdílových polí. Řezy rovinou, *správné zapojení*.



Obrázek 6.2: Součtové magnetické pole v okolí BLDC motoru získané vektorovým součtem jednotlivých rozdílových polí. Řezy rovinou, *nesprávné zapojení*.



Obrázek 6.3: Součtové magnetické pole v okolí BLDC motoru získané vektorovým součtem jednotlivých rozdílových polí. Plná obálka v konstantní vzdálenosti, izometrický pohled, *správné 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:

$$\mathbf{uv} = \mathbf{uv}_+ - \mathbf{uv}_0 \quad (6.1)$$

$$\mathbf{vw} = \mathbf{vw}_+ - \mathbf{vw}_0 \quad (6.2)$$

$$\mathbf{wu} = \mathbf{wu}_+ - \mathbf{wu}_0 \quad (6.3)$$

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

$$\mathbf{v} = \mathbf{uv} + \mathbf{vw} + \mathbf{wu} \quad (6.4)$$

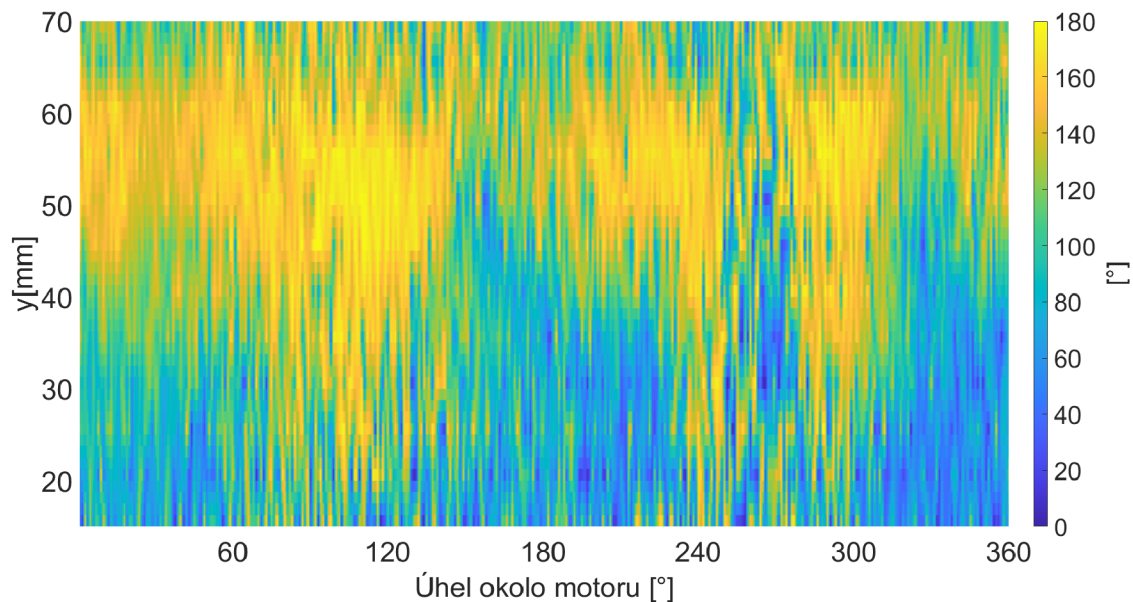
Tímto způsobem lze změřit vektor magnetické indukce v jednom bodě, několik vektorů magnetické indukce v určité oblasti, nebo celé pole v okolí motoru.

Díky výpočtu jednotlivých vektorů \mathbf{uv} , \mathbf{vw} a \mathbf{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.

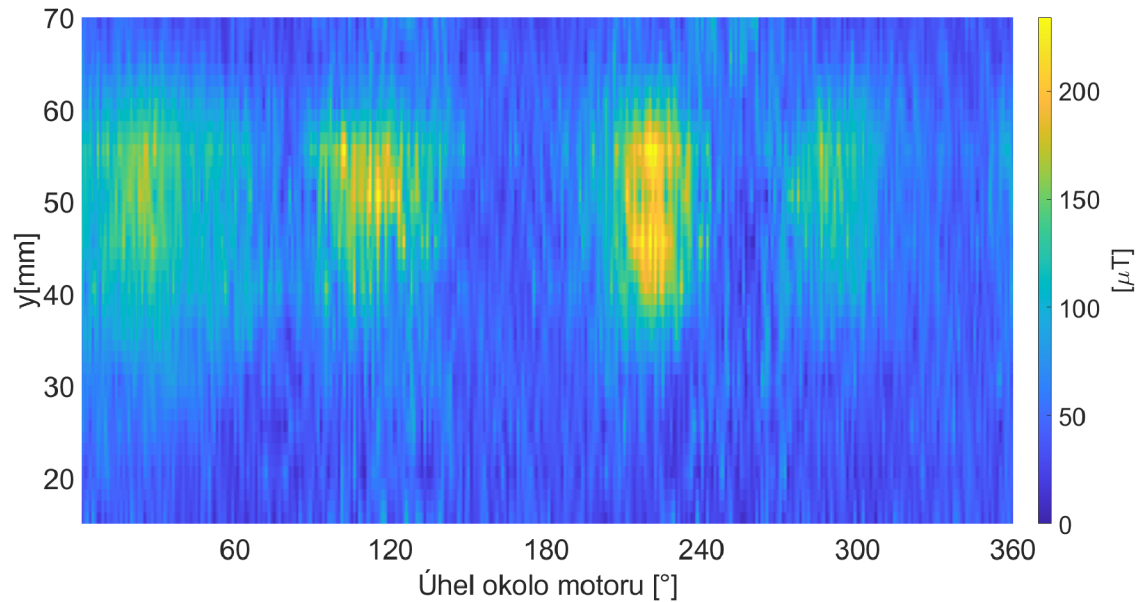
6.2.2 Kritéria optimálního místa pro měření

Z 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 6.4 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 $y = 40 - 65\text{mm}$. V úrovni $y < 40\text{mm}$ 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 6.5.



Obrázek 6.4: Velikost úhlů mezi součtovými vektory polí pro *správně* a *nesprávně* zapojený motor.



Obrázek 6.5: Velikost intenzity součtového pole *správně* zapojeného motoru.

Na obrázku 6.5 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.*

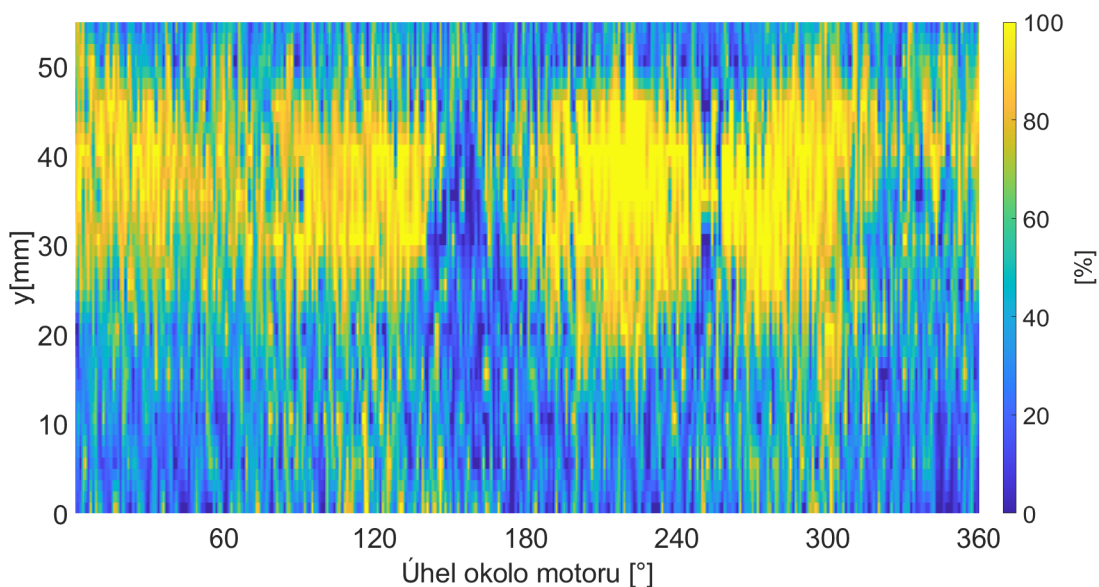
6.2.3 Algoritmus detekce správnosti zapojení / směru rotace

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 6.6 můžeme vidět, že existují oblasti ve kterých lze metodu úspěšně aplikovat, jež jsou shodné s oblastmi určenými na obrázku 6.5 jako vhodné pro aplikaci metody.



Obrázek 6.6: Úspěšnost aplikace algoritmu detekce směru rotace (správnosti zapojení) v celém okolí měřeného BLDC motoru.

Kapitola 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 4.4.

V kapitolách 5.2 a 6.2 jsou představeny metody z cílů 2 a 3. První metoda, je oproti předchozím znalostem (kapitola 2.1) 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, které ovšem nebylo pro daný účel nejvhodnější. Z těchto snah vznikl článek [1]. Bylo proto navrženo a vyvinuto stanoviště pro tyto účely vhodné (kapitola 4.3), 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 4.4). 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 2.1)[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, které ovšem mělo určitá omezení [1]. Za účelem odstranění nedostatků ro-

botického stanoviště a naměření lepších dat, bylo nově navrženo vhodné, cenově dostupné měřicí stanoviště (kapitola 4.3). 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.

Kapitola 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. Sensorless 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 International 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 KAPPA-TOU 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 Networks, 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/weapcon/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, online: <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] DCSSENS06ENGL 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