

Diplomová práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra řídicí techniky

Rozšíření platformy pro magnetickou manipulaci

Bc. Filip Richter

Vedoucí: Ing. Jiří Zemánek
Obor: Systémy a řízení
Studijní program: Kybernetika a Robotika
Květen 2017

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Richter Filip**

Studijní program: Kybernetika a robotika
Obor: Systémy a řízení

Název tématu: **Rozšíření platformy pro magnetickou manipulaci**

Pokyny pro vypracování:

Na laboratorní platformě pro magnetickou manipulaci vyřešte následující úkoly:

1. Převedte stávající řídicí systém ze stolního počítače na Raspberry Pi.
2. Oživte upravenou řídicí elektroniku, připravte její výrobu a sestavte novou platformu s více moduly.
3. Teoreticky a experimentálně analyzujte možnosti určování polohy objektu pomocí měření magnetického pole.
4. Dokončete a otestujte zkušební přípravek pro manipulaci s mikroskopickými objekty.
5. Navrhněte novou řídicí elektroniku s vyšším výkonem procesoru a lepšími komunikačními možnostmi.

Seznam odborné literatury:

- [1] M. Weiss, F. Schwarz, S. Jakubowski, and J. Borchers, "Madgets: Actuating Widgets on Interactive Tabletops," in Proceedings of the 23rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, New York, NY, USA, 2010, 293-302.
- [2] G. Pangaro, D. Maynes-Aminzade, and H. Ishii, "The Actuated Workbench: Computer-controlled Actuation in Tabletop Tangible Interfaces," in Proceedings of the 15th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, New York, NY, USA, 2002, 181-190.
- [3] E. Diller, J. Giltinan, and M. Sitti, "Independent control of multiple magnetic microrobots in three dimensions," The International Journal of Robotics Research, vol. 32, no. 5, pp. 614-631, Apr. 2013.

Vedoucí: Ing. Jiří Zemánek

Platnost zadání: do konce letního semestru 2017/2018

L.S.

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze, dne 30. 11. 2016

Poděkování

V první řadě bych rád bych poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Jiřímu Zemánkovi za pomoc a cenné rady. Dále bych chtěl poděkovat celému týmu AA4CC za jejich návrhy, rady a pomoc. V neposlední řadě chci také poděkovat svým rodičům za podporu při studiu a hlavně při psaní této práce.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, 25. května 2017

Abstrakt

Tato práce se věnuje úpravám a inovaci na platformě MagMan. Práce srovnává možné varianty řešení řídicího systému nezávislého na osobním počítači, který je zároveň dostatečně kompaktní a mobilní. V této práci je také popsána knihovna, která umožňuje převedení hotových schémat v MATLAB Simulinku na zvolený řídicí systém (Raspberry Pi). Další součástí je výroba nových modulů platformy z nichž byla sestavena nová větší platforma. Tyto moduly nově obsahují funkční měření proudu, což umožnilo i proud zpětnovazebně řídit. Návrh a realizace regulátoru je také součástí práce. V druhé polovině se práce věnuje měření magnetického pole a jeho srovnáním s numerickou simulací. Kromě měření pole okolo modulů je také zkoumán vliv kovové kuličky na pole a možnostem jak z něj určit polohu kuličky. V poslední části se práce věnuje dokončení přípravku pro mikromanipulaci a jeho použití pro první experiment.

Klíčová slova: MagMan, magnetická manipulace, mikromanipulace, jMagMan, řízení proudu, měření magnetického pole

Vedoucí: Ing. Jiří Zemánek
Katedra řídicí techniky - K13135,
Karlovo náměstí 13,
121 35 Praha 2

Abstract

This thesis deals with innovation on the MagMan platform. It compares possible variants of a control solution that is both compact and mobile and not based on personal computer. It describes a library that allows the transformation of the models in MATLAB Simulink for the chosen control system, which is in our case the Raspberry Pi. Another part of the thesis describes the production of new modules from which a new larger platform was built. These new modules include working current measurement. It allows the control of the current. The design and implementation of the controller are also part of the work. In the second half, the thesis deals with the measurement of the magnetic field and its comparison with the numerical simulation. In addition to measuring the field around the modules, the influence of the metal ball to the field is also measured. The possibilities of how to determine the location of the ball from the magnetic field measurements are also examined. In the last part, the thesis deals with the completion of the micromanipulator and its use for the first experiment.

Keywords: MagMan, magnetic manipulation, micromanipulation, jMagMan, current control, magnetic field measuring

Title translation: Extension of the platform for magnetic manipulation

Obsah

1 Úvod	1	7 Přípravek pro mikromanipulaci	41
2 Řídící systém	5	8 Návrh nového konceptu platformy	45
2.1 SpeedGoat	5	8.1 Procesor	45
2.2 dSpace	6	8.2 Komunikační možnosti	45
2.3 Raspberry Pi	6	8.3 Návrh řešení	46
2.4 Implementace řešení	6	9 Závěr	47
Nastavování cívek	7	Literatura	49
Poloha z dotykové fólie	8	A Obsah příloženého CD	51
Poloha z kamery	8		
3 Rozšíření platformy	11		
3.1 Komunikace	12		
3.2 Měření proudu	13		
3.3 Řízení proudu	14		
3.4 Nastavení regulátoru	15		
4 Aplikace jMagMan	19		
4.1 Karta informace	20		
4.2 Karta přímé ovládání	20		
4.3 Karta řízení proudu	21		
4.4 Karta terminál	21		
4.5 Karta vzorkování proudu	22		
4.6 Karta aktualizace	22		
5 Magnetické pole platformy	25		
Základna a jádra cívek	25		
Cívky	25		
5.1 Měření pole	26		
5.2 Hystereze a závislost na proudu	27		
5.3 Srovnání modelu a simulace	29		
5.4 Vzájemná indukčnost	30		
6 Měření polohy	35		
6.1 Odhad polohy podle měření pole	35		
6.2 Odhad polohy podle měření vzájemné indukčnosti	37		
6.3 Srovnání všech možností měření polohy	38		

Obrázky

1.1	Moduly platformy MagMan	1	5.4	Srovnání hysterezní smyčky použité cívky s a bez přiložené kuličky, včetně možných lineární aproximací. Sonda byla umístěna mezi jádrem a kuličkou.	28
1.2	Původní verze platformy	2	5.5	Průběh z složky magnetického pole v ose x, normalizované na 1 A z -250 mA a -100 mA a jejich relativní chyba	29
1.3	Schéma platformy MagMan s připojeným řídicím systémem	3	5.6	Průběh magnetického pole (složka Z) podél osy X při 250 mA a jejich relativní chyba	29
2.1	Knihovna bloků v Simulinku	7	5.7	Průběh magnetického pole (složka Z) podél osy Y při 250 mA a jejich relativní chyba	30
2.2	Struktura zpracování obrazu	9	5.8	Průběh z složky magnetického pole v ose Z při 250 mA a jejich relativní chyba	30
3.1	Zdroj MEAN WELL RSP-750-24 (převzato z [5])	11	5.9	Zapojení včetně vazby mezi cívkami a náhradní zapojení přijímací části	31
3.2	Nová sestavená platforma doplněná o měřicí zařízení	12	5.10	Vájemná indukčnost experiment	33
3.3	Původní "Low Side" měření proudu	13	6.1	Šablona pro pozicování kuličky	36
3.4	Nové plovoucí měření proudu	14	6.2	Rozložení senzorů pro měření magnetického pole	37
3.5	Srovnávací průběhy s a bez P regulátoru	17	6.3	Srovnání složek magnetického pole mezi měřením a simulací a ukázka vlivu kuličky na magnetické pole mezi cívkami v závislosti na její poloze	39
3.6	Schéma proudového regulátoru	18	6.4	Průběh proudu na přijímací cívice v závislosti na poloze kuličky mezi cívkami	40
3.7	Srovnání mezi simulací a měřením	18	7.1	Přípravek pro mikromanipulaci s připojeným modulem	41
3.8	Root Locus pro lineární aproximaci systému.	18	7.2	Vrcholy špiček blížící se k sobě	42
4.1	Karta "Informace" aplikace jMagMan	20	7.3	Nádoba pro provádění experimentů osazená na přípravku	43
4.2	Karta "Přímé ovládání" aplikace jMagMan	21	7.4	Záznam stopy miniaturních niklových čtverečků	43
4.3	Karta "Řízení proudu" aplikace jMagMan	22			
4.4	Karta "Terminál" aplikace jMagMan	23			
4.5	Karta "Vzorkování proudu" aplikace jMagMan	24			
4.6	Karta "Aktualizace" aplikace jMagMan	24			
5.1	Geometrie simulačního modelu	26			
5.3	Magnetická sonda	26			
5.2	Vizualizace řezu magnetickým polem ze simulace. Cívkou v zadním rohu (na souřadnicích $x = 12.5$ mm a $y = 12.5$ mm) prochází proud $I_{max} = 440$ mA.	27			

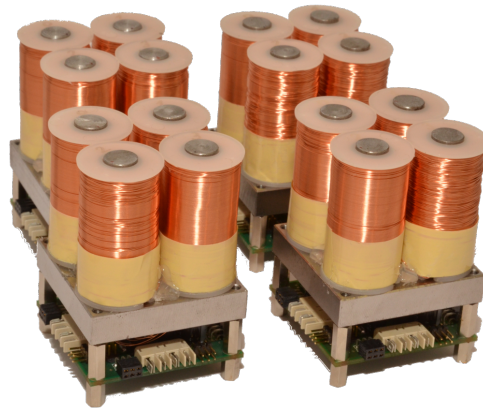
Tabulky

3.1 Parametry komunikace	13
3.2 Parametry cívky při teplotě 20 °C	16
6.1 Srovnání metod	35

Kapitola 1

Úvod

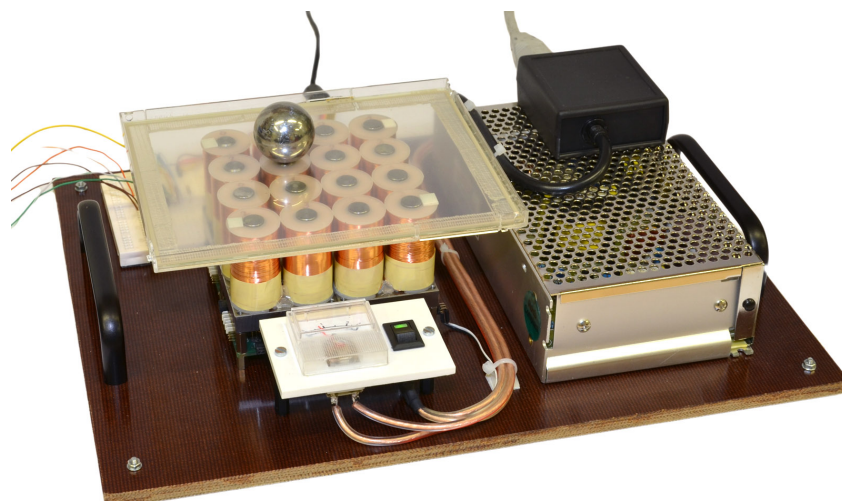
Platforma MagMan (obr. 1.2) je laboratorní zařízení, které slouží pro experimentální testování centralizovaných i distribuovaných algoritmů řízení manipulace pomocí fyzikálních polí. Doplnjuje dostupné možnosti manipulace předměty pomocí fyzikální polí o magnetickou doménu. Její výhodou je, že umožňuje manipulovat předměty viditelnými pouhým okem a lze si tak experiment "osahat", čímž o něm vzniká lepší představa. Hlavním úkolem platformy je manipulace kovovou kuličkou, která se pohybuje po podložce (kontaktně, nelevituje) položené na platformě. Takovou podložkou může být buď dotyková fólie (slouží zároveň pro měření polohy) a nebo jakákoli plochá deska. Podložka by měla být ideálně co nejtenčí, tak aby zbytečně nesnižovala vliv magnetického pole vytvářeného pomocí cívek.



Obrázek 1.1: Moduly platformy MagMan

Platforma je složena z jednotlivých modulů (obr. 1.1), kdy každý z nich je sestaven ze čtyř cívek a jejich jader, nosné části a desky plošných spojů. Moduly jsou vybaveny oboustrannými konektory na všech čtyřech stranách. A lze tak kromě čtvercového tvaru platformy sestavit i mnoho dalších různých tvarů. Konektory propojují jak napájení, tak datovou sběrnici mezi moduly a proto není potřeba nic dalšího spojovat. Moduly se pouze sesadí k sobě, čímž dojde ke spojení konektorů.

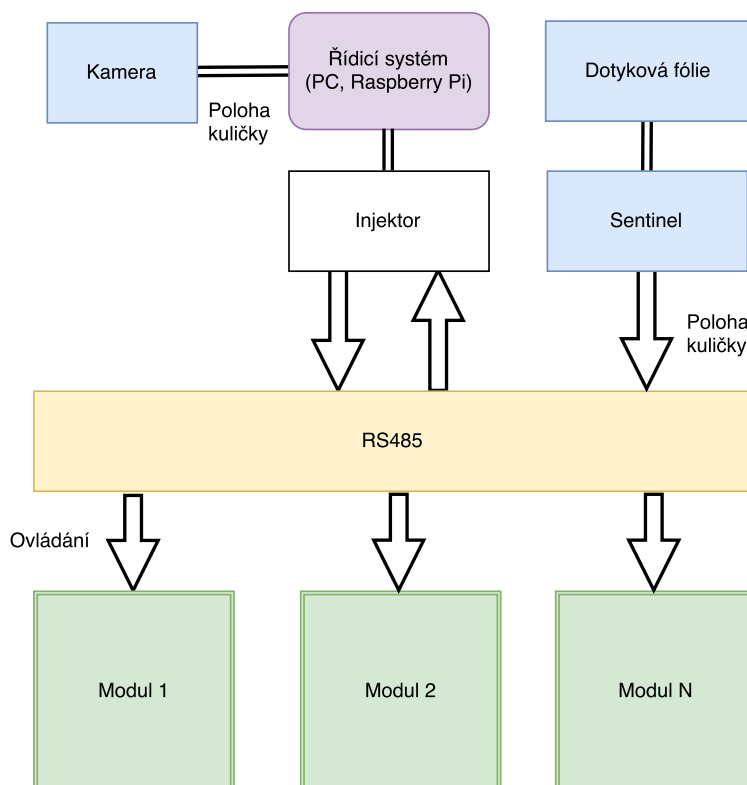
Další částí platformy je deska *Injektor*, která slouží pro připojení platformy



Obrázek 1.2: Původní verze platformy

k napájení a řídicímu systému. Chová se jako převodník USB – RS485, čímž umožňuje připojení k řídicímu systému, který neobsahuje komunikační rozhraní RS485. Poslední částí platformy je deska *Sentinel*. Ta obsluhuje dotykovou fólii a předává informaci o poloze kuličky do řídicího systému. Obě tyto desky také obsahují oboustranný konektor, kterým se připojí k modulům. Schéma propojení platformy je na obr. 1.3. Detailní popis jednotlivých částí lze nalézt v Bakalářské práci [7].

Cílem této práce je platformu inovovat a vytvořit tak nové možnosti jejího využití. Práce je strukturovaná do kapitol, které popisují jak rozšíření tak i provedené experimenty. Následující kapitola popisuje výměnu řídicího systému. Třetí kapitola se věnuje návrhu a sestavení nové rozšířené verze platformy. Čtvrtá kapitola popisuje vytvořenou aplikaci jMagMan, která vznikla jako vedlejší produkt pro usnadnění práce s platformou. Další kapitola je zaměřena na magnetické pole platformy a jeho simulaci. Šestá kapitola je věnována návrhu metod pro odhad polohy kovové kuličky. Sedmá kapitola se věnuje dokončení a otestování přípravku pro mikromanipulaci. A poslední kapitola se zabývá návrhem nového konceptu platformy.



Obrázek 1.3: Schéma platformy MagMan s připojeným řídicím systémem

Kapitola 2

Řídicí systém

Platforma MagMan se používá ve spojení s řídicím systémem. Všechny její části připojené na sběrnici (moduly, deska Sentinel¹) se v současné době chovají podřízeně, řídicí systém jim posílá povely a dotazy. V první fázi pošle řídicí systém dotaz na pozici kuličky, kterou použije pro výpočet akčního zásahu. Ten je pak odeslán po sběrnici jednotlivým modulům. Jako řídicí systém se momentálně používá stolní počítač a prostředí MATLAB. Toto řešení je vhodné pro rychlý vývoj, ale nehodí se například k transportu platformy za účelem její prezentace (velké rozměry, složité sestavení).

V rámci možných řešení bylo posuzováno několik variant. Hlavní kritéria jsou:

- Využití velké části již hotových kódů
- Zachování rychlého vývoje
- Kompaktnost platformy včetně řídicího systému
- Přiměřená cena
- Připojení kamery

2.1 SpeedGoat

První z možných řešení je zařízení SpeedGoat, což je realtime počítač přímo navržený pro rychlý vývoj ve spolupráci se Simulinkem. Řešení založené na platformě Speedgoat používal v roce 2014 Aram Simonian v rámci své diplomové práce [8]. Knihovny dodávané k zařízení obsahují všechny potřebné periferie, a tak není připojení platformy nijak složité. Jelikož se jedná o průmyslové řešení, je jeho nevýhodou cena. Další nevýhodou je složitost připojení kamery za účelem zpracování obrazu, a to v případě, když by se poloha kuličky určovala na základě počítačového vidění. Poslední nevýhodou je mobilita takového zařízení, protože je vestavěné v boxu o velikosti stolního počítače, což je pro kompaktnost celého zařízení nevyhovující.

¹Deska připojená ke sběrnici platformy. Jejím hlavním úkolem je měření polohy kuličky pomocí dotykové fólie. Její program může být rozšířen o další úkoly.

2.2 dSpace

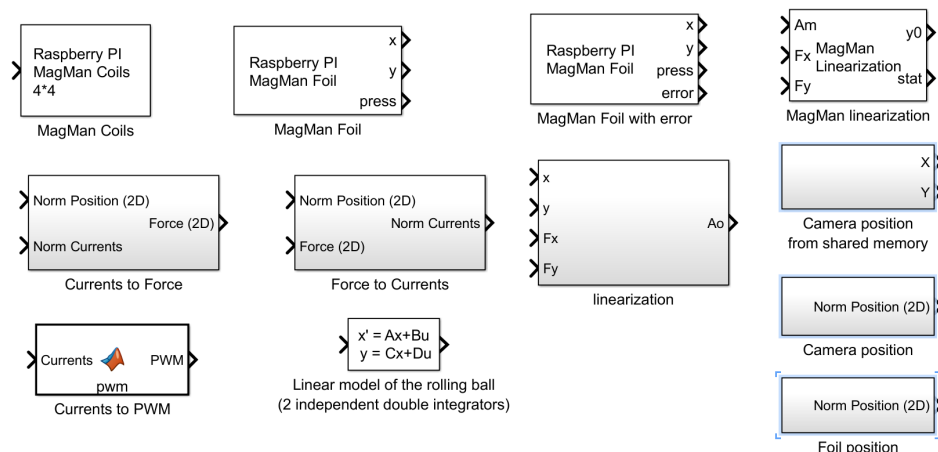
Platforma dSpace je obdoba SpeedGoatu. Jde o platformu, která umožňuje vykonávat algoritmy v reálném čase a díky dostupnosti velkého množství vstupně-výstupních pinů a dalších periférií umožňuje procesy přímo řídit. Tato platforma je často využívána v automobilovém průmyslu, což předurčuje i její vysokou cenu. Rozměrově je zařízení daleko úspornější. V tomto případě je největší nevýhodou cena a zbytečná složitost celého řešení proti následujícímu řešení.

2.3 Raspberry Pi

Raspberry Pi je jednodeskový miniaturní počítač, na němž běží obvykle operační systém Linux. Výhodou tohoto řešení je, že tuto desku podporuje (stejně jako obě předchozí) přímo prostředí MATLAB včetně Simulinku a to je její cena o poznání nižší než předchozí uvedené řešení. K dispozici je předpřipravený obraz Raspbianu (operační systém založený na Debianu). Tento obraz obsahuje vše potřebné, aby mohl být cílem (zařízení schopné přímého ovládnutí z MATLAB Simulinku angl. "MATLAB Target" nebo "Simulink Target") pro MATLAB. Lze tak využít hotové grafické schéma v aplikaci Simulink, u kterého vyměníme vstupní a výstupní bloky dostupné v nově vytvořené knihovně. Další jeho výhodou je obecně velká podpora, protože se tento počítač stal v oblasti prototypování velmi populárním. Díky tomu lze najít nespočet návodů na většinu problémů. K Raspberry se dá také připojit kamera vyráběná jako jeho příslušenství.

2.4 Implementace řešení

Na základě srovnání jednotlivých řešení vychází, zejména díky poměru cena/výkon, nejlépe řešení s Raspberry Pi. Pro použití s platformou MagMan musela být vytvořena knihovna bloků, které reprezentují části platformy (obr. 2.1). Pro komunikaci s vnějším světem se v Simulinku obvykle používají S-Funkce. S-Funkce je zdrojový kód v jazyce C, který obsahuje funkce a makra požadovaná Simulinkem. Tyto funkce Simulink za běhu volá a předává pomocí nich hodnoty ze vstupů bloku, aktualizuje vnitřní stavy a získává hodnoty pro výstupy bloku. Také pomocí nich získává informace o tom, jak má blok v grafickém schématu vypadat (počty vstupů, výstupů a jejich datové typy). Pro jednodušší vytváření S-Funkcí obsahuje Simulink grafický nástroj *S-Function Builder*, který umožňuje provést toto nastavení (počty vstupů, datové typy, atd.) mnohem přívětivěji a zdrojový kód v jazyce C programově vygenerovat. S-Function Builder má také výhodu v tom, že celý program v jazyce C včetně ostatního nastavení je uložen vnitřně, a je tak součástí bloku a tím i modelu a knihovny. Není proto třeba distribuovat s modelem nebo knihovnou další soubory.



Obrázek 2.1: Knihovna bloků v Simulinku

Kompilace kódu pro Raspberry Pi ze Simulinku probíhá tak, že se nejdříve grafické schéma převede pomocí Simulink Coderu do podoby programu v jazyce C nebo C++. Tyto zdrojové kódy lze zkompileovat i na lokálním počítači, ale většinou to nemá smysl, jelikož k počítači nejsou připojeny periferie (platforma MagMan, kamera), které jsou připojeny přímo k Raspberry. V případě provozu v Externím módu (režim pro provoz algoritmů na vzdáleném cíli) se zdrojové kódy zabalí do balíku, který se pomocí počítačové sítě přenesne na Raspberry. Tam je tento balík rozbalen a zkompileován, čímž nevzniká potřeba tzv. cross-kompilace (kompilace na počítači pro jinou platformu).

Program je možné vygenerovat buď pro externí mód nebo pro přímé spuštění. Varianta pro externí mód po spuštění (většinou provede vzdáleně Simulink) čeká na připojení přes počítačovou síť a následně umožňuje monitoring běhu programu (nastavení parametrů, sledování průběhu signálu atd.). Dokud se Simulink nepřipojí, tak program není spuštěn. Druhou možností je vytvoření programu pro přímé spuštění, který nelze vzdáleně monitorovat, ale spouští se ihned. Tato varianta je vhodná například pro automatické spuštění demonstrační aplikace hned po startu Raspberry.

Pro demonstraci použití platformy s Raspberry Pi byl použit grafický program v prostředí Simulinku, který slouží k řízení kuličky na referenční polohu. Měření polohy bylo realizováno pomocí dotykové fólie. Toto řešení bylo do té doby používáno na stolním počítači, který platformu ovládal, takže stačilo vyměnit bloky z knihovny.

Nastavování cívek

Pro nastavení cívek byl vytvořen blok, který zajistí otevření sériového portu, přes který je Raspberry připojené ke komunikační sběrnici platformy (RS-485). Pak v každé vzorkovací periodě vezme hodnoty ze vstupu Simulinkového bloku

(požadovaná střída resp. proud cívkami), vytvoří z nich povel protokolu Elvis² a ten odešle na sběrnici. Pro ovládání z tohoto bloku je použita nepotvrzovaná zpráva³. Sériový port použitý v tomto bloku je případně sdílen s blokem pro čtení z dotykové fólie, protože o čtení z dotykové fólie se stará deska Sentinel (periferie platformy viz. [7]), která je také připojena na sběrnici.

■ Poloha z dotykové fólie

Oba bloky (nastavování cívek, čtení polohy) potřebují komunikovat pomocí sběrnice platformy. Tuto sběrnici je v operačním systému možné otevřít pouze jednou. Proto je nutné, aby v rámci programu byl přístup sdílen. Sílení je vyřešeno tak, že blok, který je proveden jako první, otevře port pro přístup ke sběrnici. Otevřený port pak využívají všechny bloky. Dotaz na polohu z dotykové fólie je odesílán každou vzorkovací periodu a pak se čeká na odpověď od desky Sentinel, která obsahuje změřenou polohu, ta se použije pro výstup bloku v Simulinku. Pokud není přijatá odpověď, signalizuje se chyba do Simulinku.

■ Poloha z kamery

Zpracování obrazu z kamery je vytvořeno jako samostatný program v jazyce Python, který byl vytvořen ve spolupráci s Martinem Gurtnerem, který ho využívá v jiných projektech [2]. Pro zpracování obrazu se nepoužívá nativní program v Pythonu, ale z Pythonu se pouze volají funkce z knihovny pro počítačové vidění OpenCV. Díky tomu probíhá detekce do 8 ms resp. vzorkovací frekvence je až 125 Hz. Pro zpracování obrazu je na Raspberry vyhrazené jedno ze čtyř jader procesoru.

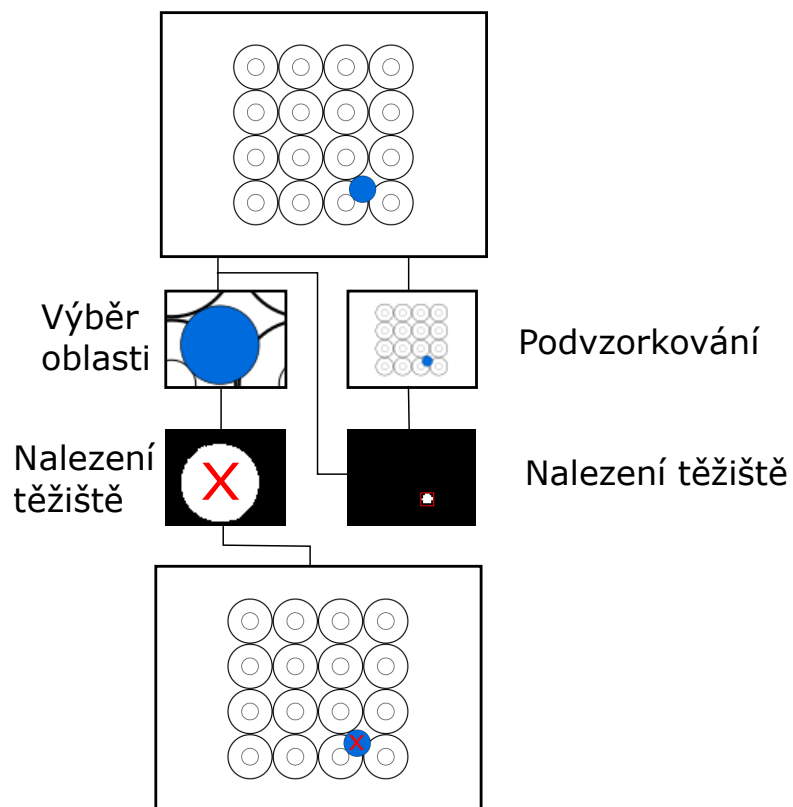
Program strojového vidění přečte jede snímek z kamery, a provede na něm váhovaný součet jeho barevných složek s tím, že pro složku odpovídající barvě kuličky (nebo jiného hledaného předmětu) se použije kladná váha a pro ostatní záporná. Ve vzniklém obrázku se pixely přesahující nastavenou hodnotu označí jako součást hledaného předmětu. Na tento binární obrázek se použije algoritmus pro hledání těžiště, které je označeno jako střed hledaného předmětu. Pro zprovoznění strojového vidění je potřeba zkopírovat na Raspberry zdrojový kód, který je veřejně k dispozici⁴. Program vyžaduje, aby byl nainstalován Python 3 a knihovna pro počítačové vidění OpenCV.

Celý algoritmus se provádí ve dvou iteracích (obr. 2.2), kdy v první iteraci se provede hrubé hledání na obrázku se zmenšeným rozlišením a v druhé na výřezu okolo nalezené hrubé pozice na čisto. Nalezená poloha se předá

²Elvis je protokol, který je použit ke komunikaci na sběrnici platformy [10]

³Nepotvrzovaná zpráva je zpráva, na kterou se neodpovídá. Tím pádem není k dispozici informace o úspěšném doručení adresátovi

⁴Program včetně ukázky nastavení je k dispozici na <https://github.com/aa4cc/raspi-ballpos> nebo v příloze



Obrázek 2.2: Struktura zpracování obrazu

Simulinku pomocí sdílené paměti. Do této paměti přistupuje zároveň S-funkce tvořící blok v Simulinku.

Kapitola 3

Rozšíření platformy

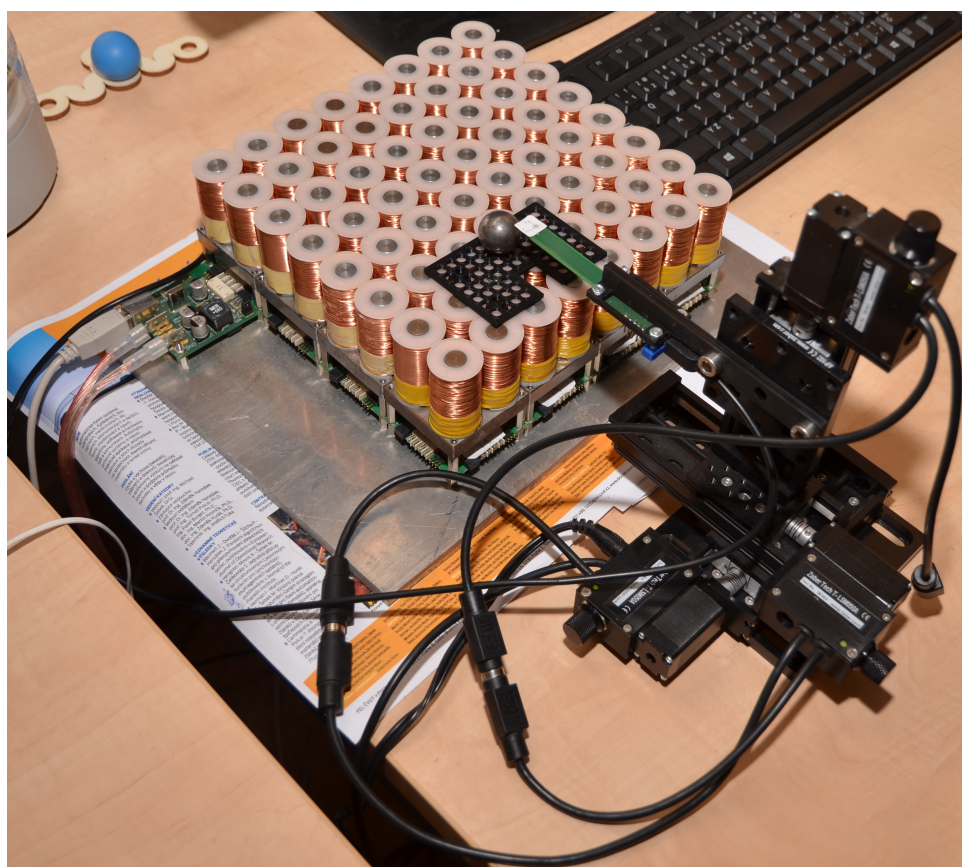
Vzhledem k výsledkům experimentů původní verze platformy bylo rozhodnuto, že bude vyrobena nová větší sestava tvořená z 16-ti modulů. S touto sestavou lze provádět experimenty ve větším měřítku a díky tomu dosáhnout snad i ještě zajímavějších výsledků. Ve čtvercové konfiguraci může mít platforma hranu až 8-mi cívek. Desky plošných spojů pro nové moduly byly vytvořené revizí minulé verze, byly vyrobeny na zakázku firmou ELSO Ostrava. Moduly proti původní verzi obsahují přepracované měření proudu (viz kap. 3.2), signalizační LED diodu a opravy navržené v rámci Bakalářské práce [7], jmenovitě přidání rezistorů nastavujících klidové hodnoty na signálech RESET, BOOT a SLEEP a přepracování řešení nastavení klidových hodnot signálech komunikační sběrnice RS-485 podle standardu [9].

Pro novou sestavu bylo třeba zvolit vhodný napájecí zdroj, protože více modulů znamená větší spotřebu. Zdroj je navržený na maximální výkon platformy a to navzdory tomu, že většinu času nejsou v provozu všechny cívky platformy na plný výkon. Je to tak proto, že může být v budoucnu prováděn experiment, při kterém by se maximální výkon využil a to třeba i jen po krátkou dobu. To znamená, že při 16-ti modulech (tedy 64 cívek) vychází maximální

dodávaný proud $I_{\max} = nI_0 = 64 \cdot 0.450 = 28.1$ A. Maximální výkon při napájecím napětí platformy $U = 24$ V vychází přibližně $P_{\max} = 676$ W na cívkách a k tomu ještě drobná spotřeba řídicí elektroniky. Zvolený zdroj MEAN WELL RSP-750-24 (obr. 3.1) je schopný takový výkon s rezervou poskytnout nejen špičkově, ale dokonce i dlouhodobě [5]. Dokáže dodávat až 31.3 A, má ochranu proti přetížení, zkratu i přehřátí. Další výhodou je konektor dálkového ovládní, přes který lze zdroj ovládat z předního panelu.



Obrázek 3.1: Zdroj MEAN WELL RSP-750-24 (převzato z [5])



Obrázek 3.2: Nová sestavená platforma doplněná o měřící zařízení

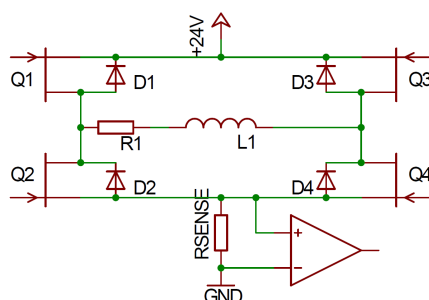
3.1 Komunikace

Rozšířením platformy při zachování komunikační rychlosti omezuje její obnovovací rychlost. Teoretická maximální obnovovací rychlost klesla na 80 Hz (resp. 65 Hz) při nastavování střídy (resp. proudů) vždy celému modulu naráz (nejrychlejší možnost). Tuto rychlost by mělo být možné v případě potřeby zvýšit upravením bitové rychlosti sběrnice. Bitová rychlost sběrnice je omezena shora nejslabším článkem, kterým je procesor použitý na modulu (LPC1313 od firmy NXP). Jeho blok seriové linky je schopený pracovat až do rychlosti 4.5 Mb/s [6], tedy přibližně 19-krát rychleji než nyní. Omezením by neměl být převodník sběrnice RS485, protože ten by měl být schopený přenosové rychlosti až 20 MHz [4]. Tato změna nebyla prakticky ověřena, pravděpodobně by bylo zapotřebí změnit nastavení zdroje hodinového signálu v procesoru. Pokud by se platforma provozovala v blízkosti maximální rychlosti, bylo by dobré v experimentech zvážit použití příkazu "Trigger"¹, který se odešle na všechny moduly zároveň a zajistí synchronní změnu nastavení.

¹Při využití tohoto příkazu se nejdříve do všech modulů nahraje postupně nové nastavení, ty ho ale pouze připraví a zatím nepoužijí. Nové nastavení se při příchodu příkazu "Trigger" vymění za aktuální na všech modulech zároveň

Bitová rychlost sběrnice	230 400 bd
Rychlost komunikace	23 040 B/s
Délka zprávy nastavení PWM	18 B
Délka zprávy nastavení proudu	22 B
Max. obnovování PWM (1 modul)	1 280 Hz
Max. obnovování proudů (1 modul)	1 047 Hz
Max. obnovování PWM (16 modulů)	80 Hz
Max. obnovování proudů (16 modulů)	65 Hz

Tabulka 3.1: Parametry komunikace

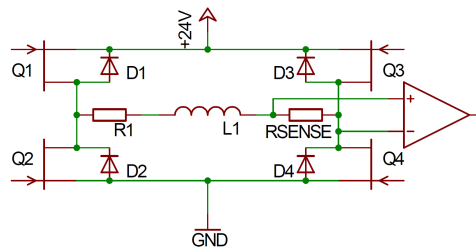


Obrázek 3.3: Původní "Low Side" měření proudu

3.2 Měření proudu

Měření proudu bylo od minulé verze z velké části přepracováno. Předchozí verze byla osazena zesilovačem INA210 od firmy Texas Instruments. Tento zesilovač je třeba zapojit tak, že jeden jeho vstup pro připojení snímacího rezistoru je připojen zem napájecího napětí. Díky této podmínce se snímací rezistor zapojuje pod spínací H-můstek (obr. 3.3). Toto zapojení bývá označováno jako *Low-side* a má několik nevýhod. Zaprvé proud prochází měřicím rezistorem pouze v době, kdy je aktivní H-můstek. Tedy během aktivní části (logické jedničky) PWM signálu, ve zbylém čase proud měřit nelze. Druhou nevýhodou je, že díky tomu se napětí na snímacím rezistoru velmi rychle mění (s frekvencí PWM, tedy 18 kHz). Tato frekvence je o dva řády větší než nejrychlejší odezva cívky. Bohužel obvod INA210 má frekvenční pásmo pouze 10 kHz s odezvou blízkou systému prvního řádu [3], což pro přenos 11-bit PWM signálu málo. Dalším problémem je, že se orientace měření proudu mění se změnou orientace spínání H-můstku. Takové přepnutí tedy také způsobí přechodový jev na výstupu. Bližší detaily jsou k dispozici v [7].

Původní měřicí zesilovače byly nahrazeny typem LT1999 od firmy Linear Technology. Tento obvod umožňuje plovoucí měření [11], kdy je snímací rezistor přímo v sérii s cívkou (obr. 3.4). Napětí na něm je pak přímo úměrné měřenému proudu. Toto řešení významně zjednodušuje programovou část měření ve srovnání s řešením použitým v bakalářské práci, které způsobovalo značné vytížení modulu. Také umožňuje měřit proud cívkou i v okamžiku, kdy



Obrázek 3.4: Nové plovoucí měření proudu

není aktivována (není připojena ke zdroji). Díky tomu lze například použít některé cívky jen jako pasivní přijímač změn magnetického pole a měřit proud, který se na nich naindukuje (viz kap. 5.4).

Úprava hardwarového řešení měření proudu umožnila jeho zprovoznění i po softwarové stránce. K měření se používá přímo A/D převodník, který je součástí procesoru. Převodník je taktován frekvencí 4.5 MHz a převod jedné hodnoty potřebuje 11 taktů, takže vzorkovací frekvence převodníku je přibližně 409 kHz. Měření probíhá cyklicky na každém z pěti kanálů (čtyři měřené proudy a reference) se vzorkovací frekvencí přibližně $f_s = 81$ kHz. Protože měření probíhá asynchronně vůči generování PWM na vstupu, stává se, že dojde ke vzorkování v okamžiku hrany PWM signálu. To způsobí špičku na měřeném signálu, která je způsobena současným skokem obou vstupů zesilovače (Common Voltage Mode [11]). Jelikož tyto špičky nepříznivě ovlivňují filtr typu dolní propust, byl mu předřazen mediánový filtr typu 3 z 5. Na něj už navazuje diskretní dolní propust o mezní frekvenci $f_m = 4$ kHz. Výstup je uložen a považován za aktuální hodnotu proudu cívky.

Firmware zařízení umožňuje základní funkce jednoduchého osciloskopu (záznam dat, trigger) a naměřená data jsou odesílána do připojeného počítače buď do aplikace jMagMan (viz kap. 4) nebo pomocí knihovny do MATLABu.

3.3 Řízení proudu

Většina experimentů (řízení kuličky, měření pole) vznáší požadavek na proud procházející cívkou, protože proud je veličina, na které je závislé magnetické pole. Takže je vhodné proud regulovat a urychlit jeho odezvu v případech, kdy je to fyzikálně možné. Hlavním omezením je dostupný akční zásah, tedy napájecí napětí (konstantních 24 V) a odpor cívky, který ještě roste s teplotou. Regulace díky tomu funguje lépe při nižších požadavcích na proud, kdy je dostupná dostatečná rezerva akčního zásahu pro regulaci.

Regulátor proudu je navržen a implementován jako kombinace dvou částí (viz obr. 3.7), a to:

- Přímovazební regulátor (zesílení)
- Zpětnovazební regulátor (P)

Přímovazební regulátor je tvořen pouze zesílením a využívá fyzikální stability systému (integračního charakteru cívky), kdy po odeznění přechodového děje se na cívce ustálí proud odpovídající jejímu odporu. Výstupem přímovazebního regulátoru je právě taková střída, jaká je potřebná k dosažení referenční hodnoty.

Zpětnovazební regulátor potlačuje vzniklou regulační odchylku při přechodovém jevu a také ostatní vnější rušení, jako je například měnící se teplota nebo indukované napětí jako následku změny magnetického pole v okolních cívkách. Vlivy změn proudů v ostatních cívkách nemusí být zanedbatelné, jejich vzájemná vazba je blíže popsána v kapitole 5.4.

Navržený regulátor je implementován ve firmwaru modulu a pro jeho ověření byla naměřena odezva na různé průběhy (obr. 3.5). Ve srovnání jednotlivých odezev na skok 200 mA (obr. 3.5a) v závislosti na teplotě je vidět, že P regulátor výrazně zrychluje a zlepšuje odezvu systému. Protože je přímovazební regulátor nastaven podle parametrů systému při teplotě přibližně 20 °C, tak se za této teploty proud ustálí na požadované hodnotě i bez P regulátoru. I v tomto případě ale P regulátor výrazně zrychluje odezvu. V případě jiné teploty pak P regulátor odstraňuje odchylku tak, že se odezva blíží stavu při teplotě 20 °C. Navzdory tomu, že P regulátor z principu neodstraňuje trvalou regulační odchylku, je tato dostatečně malá. Pokud jde o změnu v blízkosti maximálních hodnot (obr. 3.5b) není změna odezvy tak markantní, protože je menší dostupný akční zásah pro účely P regulace. To vyplývá z toho, že maximální stříde PWM signálu odpovídá ustálená hodnota $I_{\max} = 440$ mA, to je hodnota, kterou nelze přesáhnout. Poslední graf (obr. 3.5c) ukazuje srovnání složitějšího průběhu, kde jsou patrné závislosti popsané výše.

Pro účely simulace byl vytvořen model v Simulinku obsahující i část generátoru PWM (Pulzně šířkové modulace), modelu připojené cívky (sériový LR obvod) a také vzorkovací a kvantovací části A/D převodníku. Celý model je vidět na obr. 3.7. Model neuvažuje indukci proudu v ostatních vypnutých cívkách (zkratovaných), což je jeden z důvodů rozdílů mezi simulací a naměřenými daty. Srovnání ověřovacího experimentu na obr. 3.6 ukazuje, že model dobře popisuje chování systému a lze ho používat pro komplexní simulace, například pro ověření chování při rychlých změnách referenčního signálu.

3.4 Nastavení regulátoru

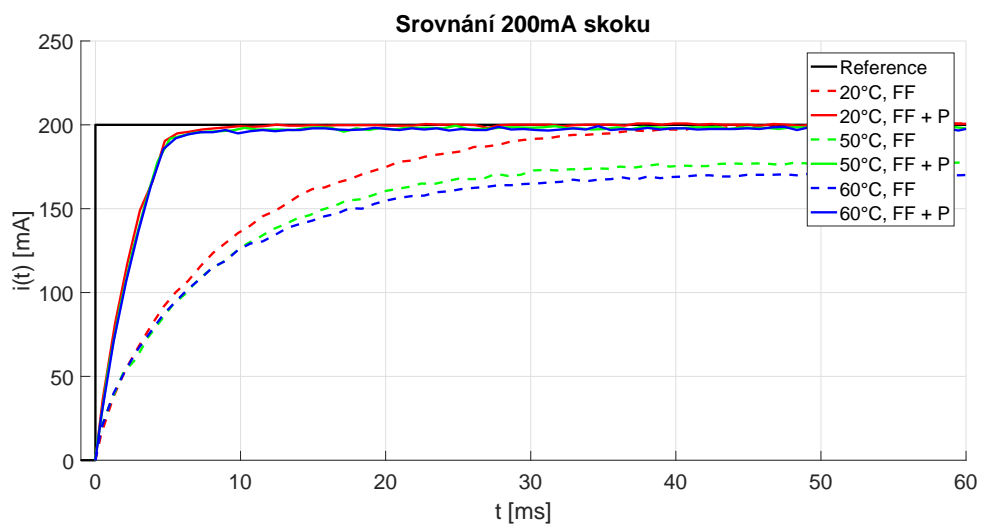
Parametry regulátoru byly navrženy pomocí výše zmíněného modelu. Přímovazební regulátor je navržen pro parametry cívky při teplotě cívky 20 °C. Přenos systému cívky z nastavené střídy je modelován jako $G(s) = \frac{U}{Ls+R}$, což znamená statické zesílení $G(0) = \frac{U}{R}$. Přímovazební regulátor má nastavené zesílení jako

$$F = \frac{1}{G(0)} = \frac{R}{U} = 2.27 \text{ mA}^{-1}.$$

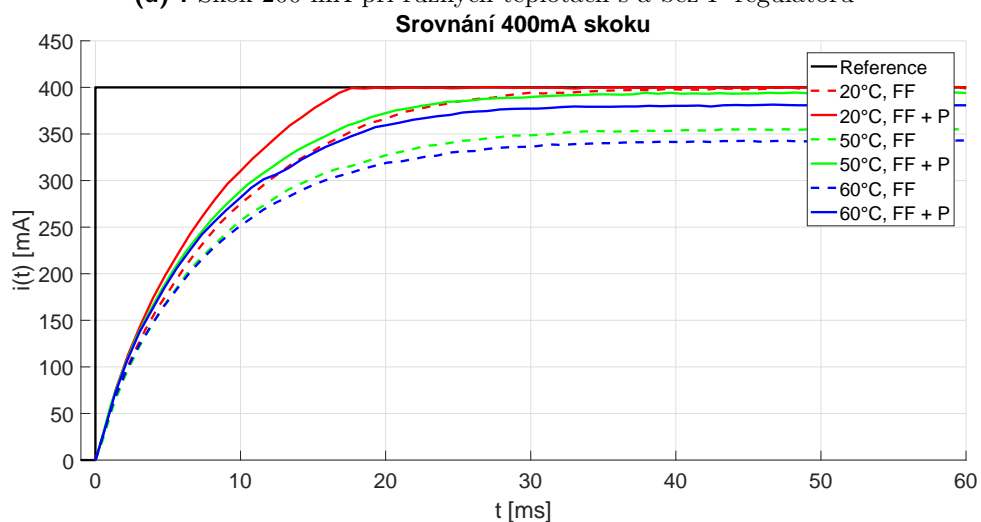
Napájecí napětí	U	14 V
Max. proud cívkou	I_{\max}	440 mA
Odpor cívky	R	54 Ω
Indukčnost cívky	L	490 mH

Tabulka 3.2: Parametry cívky při teplotě 20 °C

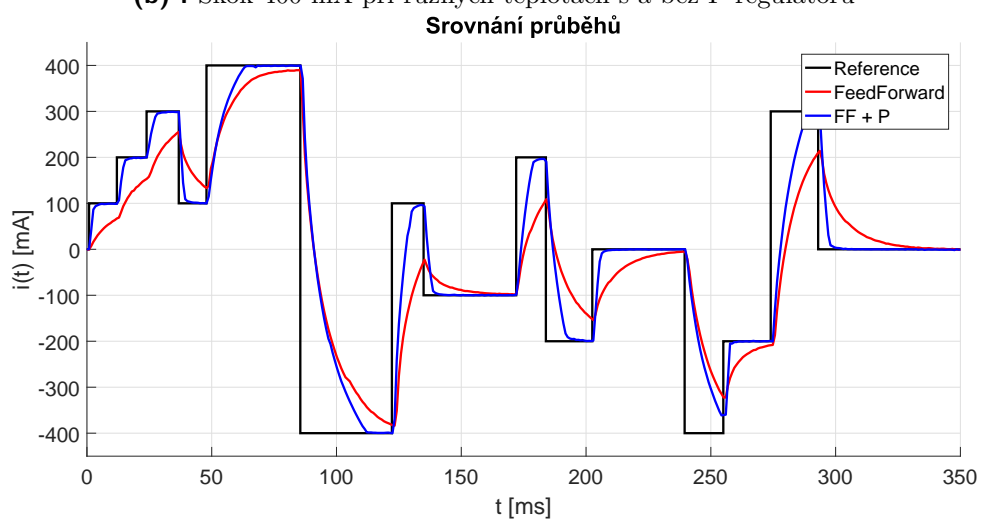
Zpětnovazební regulátor byl nastavován pomocí modelu popsaného výše. Při návrhu byl brán ohled na omezený akční zásah (střídu). Výsledkem je nejvyšší zesílení ($P = 30$), při kterém je překmit (způsobený dopravním zpožděním) ještě zanedbatelný ($< 2\%$) a zároveň zesílení šumu měření nezpůsobí výraznější reakci. Při významné změně reference se takto nastavený regulátor blíží regulátoru typu Bang-Bang, tedy takového, který využívá celý použitelný akční zásah. Lineární řízení probíhá pouze v blízkém okolí (± 33 mA) nulové regulační odchylky. Nastavení regulátoru ukazuje grafické zobrazení *Root-Locus* (obr. 3.8). Je třeba zdůraznit, že Root-locus slouží k návrhu regulátoru pro lineární systém (bez omezení akčního zásahu a dalších nelinearit). Proto byl návrh upravován dle požadavků výše a ověřován na nelineárním modelu.



(a) : Skok 200 mA při různých teplotách s a bez P regulátoru

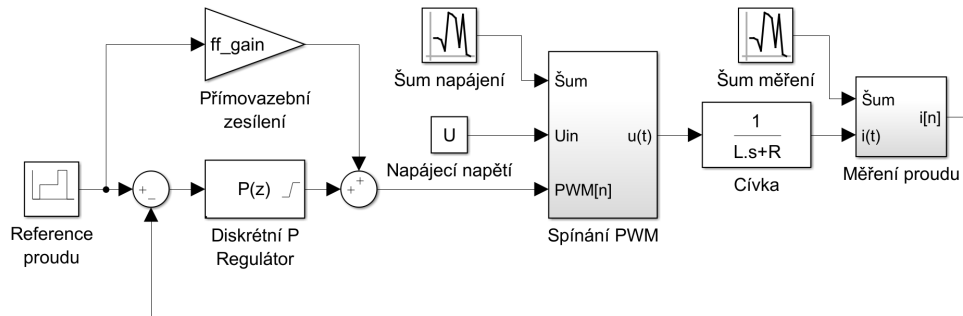


(b) : Skok 400 mA při různých teplotách s a bez P regulátoru

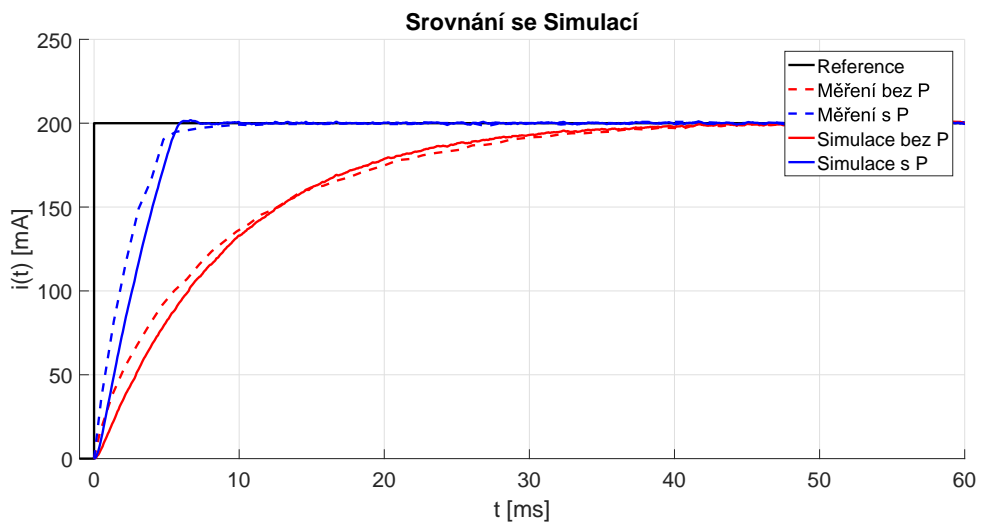


(c) : Složitější průběh

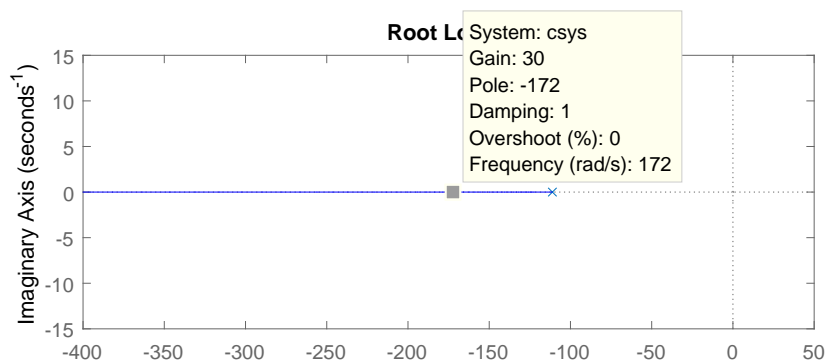
Obrázek 3.5: Srovnávací průběhy s a bez P regulátoru



Obrázek 3.6: Schéma proudového regulátoru



Obrázek 3.7: Srovnání mezi simulací a měřením



Obrázek 3.8: Root Locus pro lineární aproximaci systému.

Kapitola 4

Aplikace jMagMan

Aplikace jMagMan vznikla částečně už v rámci mé bakalářské práce [7], a nyní (v rámci této práce) byla významně rozšířena. Za jejím vznikem stála původně potřeba odesílat z počítače ručně příkazy protokolu Elvis [10]. Tyto příkazy obsahují kontrolní součet CRC16, takže je nelze jednoduše odesílat například z klasického terminálu.

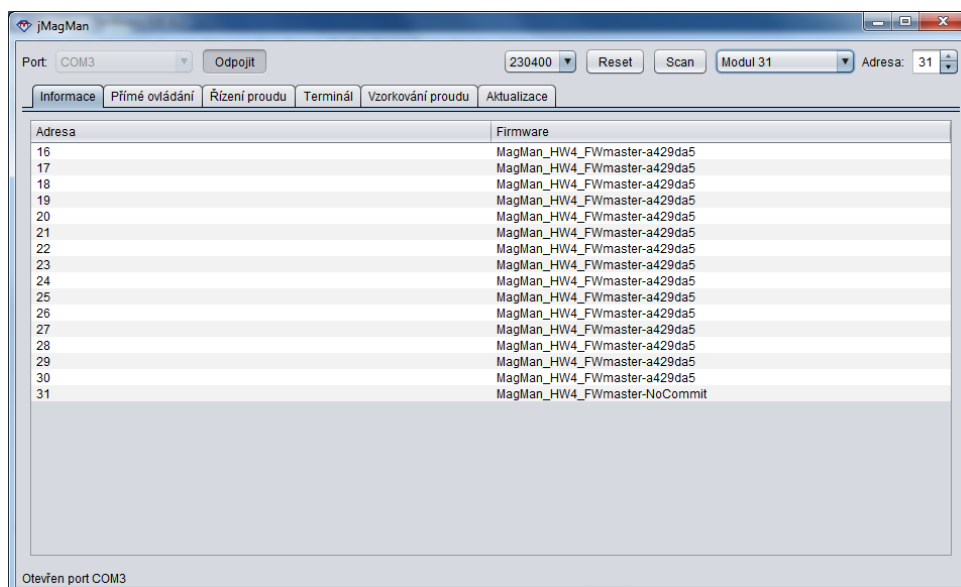
Tato potřeba se postupně rozrostla až na jednoduché ruční ovládání celé platformy. Je totiž poměrně obvyklé, že se v první fázi experimentu používá ruční ovládání, a až postupně se řízení pokusu převede na skript v MATLABu, který má třeba opakovatelný průběh a umožňuje následně jednodušší zpracování naměřených dat.

Užitečnou funkcí je také možnost přehrávání firmwaru modulu. Tuto funkci obstarával dříve konzolový program napsaný pouze pro Linux a až díky integraci této funkce do aplikace a přenositelnosti aplikace je možné přeprogramování modulů z ostatních operačních systémů.

Celá aplikace byla vyvíjena v souběhu s prací na platformě, takže funkce přímo odpovídají potřebám.

Aplikace je napsána v jazyce Java 8 s využitím *Java Development Kitu* (JDK8) od firmy Oracle. Měla by být kompatibilní s jakýmkoli prostředím Java 8. Díky tomu je přenositelná mezi různými platformami. Největším omezením přenositelnosti je knihovna *JSSC*, která obstarává přístup na sériové rozhraní (tedy sběrnici platformy). Tato knihovna je však kompatibilní s operačním systémem Windows, Linux i Mac OS, takže se omezení neprojevílo. Aplikaci jMagMan lze spustit i na mini počítači Raspberry Pi, pokud obsahuje nainstalované grafické prostředí, a lze platformu ovládat přímo z jeho dotykového displeje.

Po spuštění aplikace uživatel vybere sériový port, který se použije pro připojení ke sběrnici. Když se otevření portu zdaří, má uživatel na výběr několik karet mezi které je rozdělené celé ovládání. Jednotlivé karty jsou níže samostatně popsány.



Obrázek 4.1: Karta "Informace" aplikace jMagMan

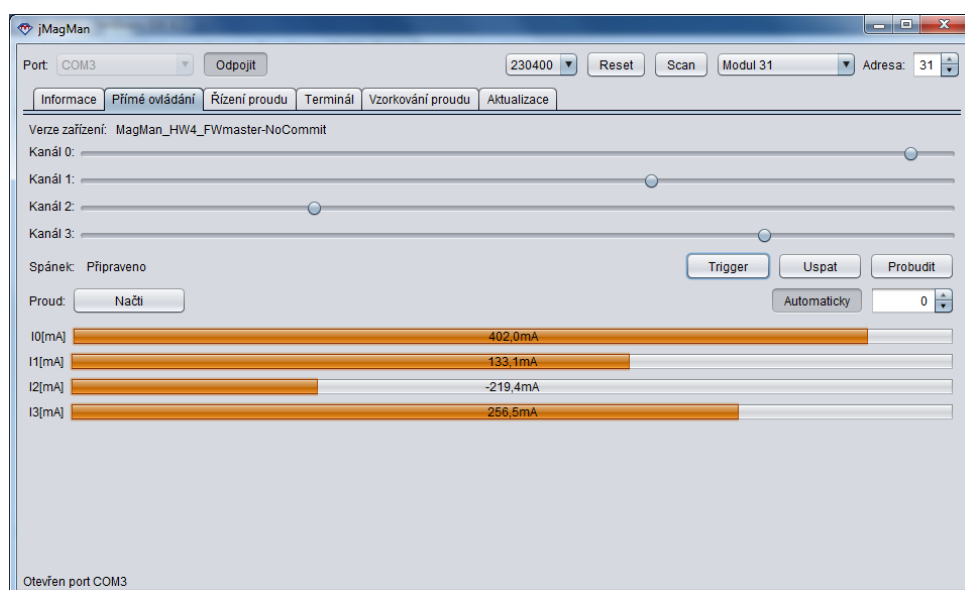
4.1 Karta informace

Na této kartě (obr. 4.1) je vidět seznam momentálně připojených modulů, které odpovíděly na vyhledávání. Pro aktualizaci tohoto seznamu slouží tlačítko v pravé části horní lišty. Po stisku tohoto tlačítka zkusí aplikace postupně poslat vyhledávací příkaz na jednotlivé moduly. Každý modul, který odpoví, je dále dotázán na verzi instalovaného firmwaru. Celý seznam včetně verzí je přehledně zobrazen v tabulce.

4.2 Karta přímé ovládání

Další karta (obr. 4.2) slouží primárně pro nastavování střídy jednotlivých cívek pomocí táhla. Kromě táhel obsahuje tlačítka pro uspání a probuzení modulu. V případě uspání modulu zůstává nezměněné celé jeho nastavení a jen se zablokuje H-můstky, čímž je zastaven proud cívkami. Tato funkce je užitečná například při pozastavení experimentu, aby cívkami zbytečně neprotékal proud a neohříval je. Po pokračování se pak použije tlačítko "Probudit". Další funkce na této kartě je tlačítko "Trigger", které umožňuje do modulů postupně nahrát nové nastavení (proudy, střídy). Nakonec, po stisknutí tohoto tlačítka, všechny moduly použijí nové nastavení.

Ve spodní části karty jsou vidět čtyři bar-grafy, které ukazují aktuální proud. Tyto hodnoty jsou standardně k dispozici na dotaz, uživatel má ale možnost spustit pravidelného vyčítání (tlačítko v pravé části s označením "Automaticky"). Obvykle se vyčítání používá jen dočasně, protože v případě více modulů by negativně ovlivňovalo vytížení komunikační sběrnice.



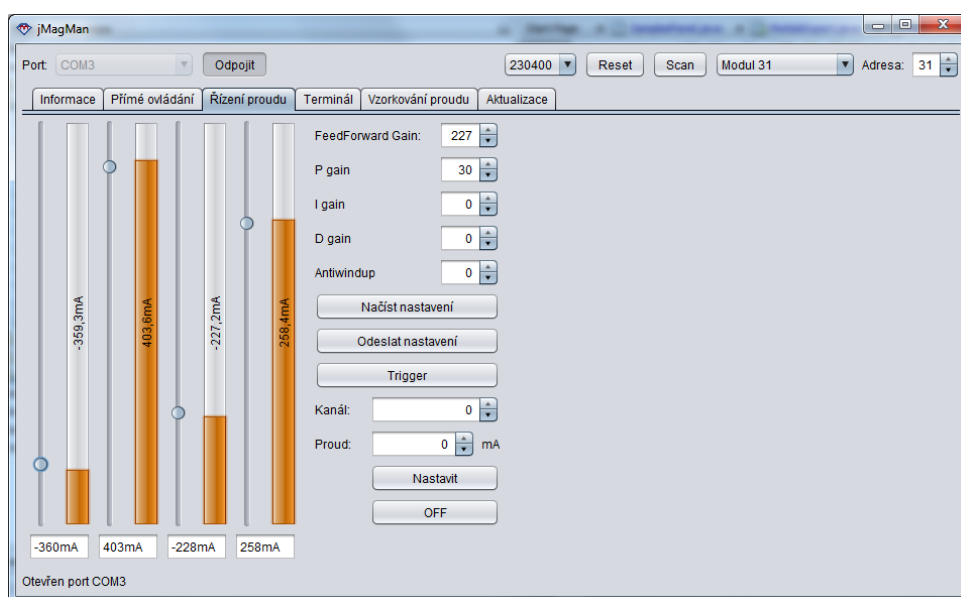
Obrázek 4.2: Karta "Přímé ovládání" aplikace jMagMan

4.3 Karta řízení proudu

Třetí karta (obr. 4.3) umožňuje uživateli nastavit referenční hodnoty pro regulátory proudů jednotlivých cívek modulu. Obdobně jako na předchozí kartě je také vidět aktuální měřený proud. Tyto hodnoty jsou, stejně jako na minulou kartě, na dotaz. Karta rovněž umožňuje nastavení parametrů regulátorů proudu. Díky tomu je možné nastavovat dočasně (do restartu modulu) parametry za běhu. Odladěné nastavení se potom použije v nové verzi firmwaru.

4.4 Karta terminál

Karta Terminál (obr. 4.4) je nejstarší částí aplikace, která ukazuje veškerou probíhající komunikaci (jak odesílání tak příjem) na platformě. Navíc zobrazuje i zprávy, které nemají platný kontrolní součet. Tyto zprávy jsou zvýrazněny červeně. Kromě zobrazování komunikace umožňuje zprávy i odesílat. Odesílaná zpráva může být libovolná, ale pro nápovědu je zde roletkové menu se seznamem známých příkazů. Při vybrání jednoho z nich je předvyplněno jeho číslo. Při odeslání zprávy se aplikace postará o výpočet kontrolního součtu.



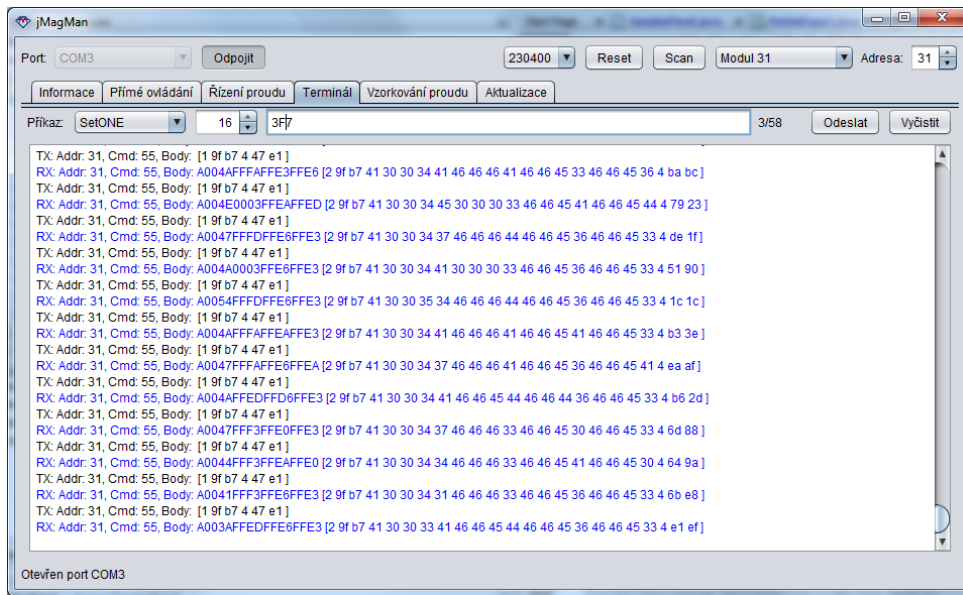
Obrázek 4.3: Karta "Řízení proudu" aplikace jMagMan

4.5 Karta vzorkování proudu

Tato karta (obr. 4.5) obsahuje funkce jednoduchého osciloskopu. Lze z ní instruovat modul, aby zaznamenal průběh proudu po výskytu spouštěcí události. Spouštěcí událostí může být překročení dané hodnoty (náběžnou a/nebo sestupnou hranou) nebo synchronizační příkaz "Trigger" používaný pro synchronizaci změny nastavení (lze použít pro synchronní měření několika modulů). Poslední možností je měření bez spuštění, kdy se měření provede okamžitě. Vzhledem k rychlosti komunikace není možné průběh zobrazovat v reálném čase při zachování rychlého vzorkování. Je proto nutné data nejdříve zaznamenat (přímo v modulu) do paměti a pak je postupně přenést do aplikace. Takto přenesená data jsou zobrazena ve střední části do grafu. Modul umožňuje zaznamenávat buď jeden vybraný kanál nebo všechny, ale pouze po čtvrtinu doby. Toto omezení vzniklo díky omezené paměti procesoru. Za zmínku také stojí tlačítko "Export", po jehož stisku se otevře okno s textovým polem, kde jsou data v podobě, která jde vložit do konzole MATLABu. Pomocí tohoto nástroje byly zaznamenány průběhy proudu použité v této práci.

4.6 Karta aktualizace

Poslední karta (obr. 4.6) umožňuje přeprogramování jednoho nebo více modulů. V pravé části se zobrazuje seznam dostupných modulů, který vznikne skenováním společně s kartou "Informace". V tomto seznamu uživatel vybere moduly, na kterých chce aktualizaci provést. Následně vybere soubor firmwaru modulu ve formátu Intel-HEX. V tuto chvíli aplikace ověří poslední datum



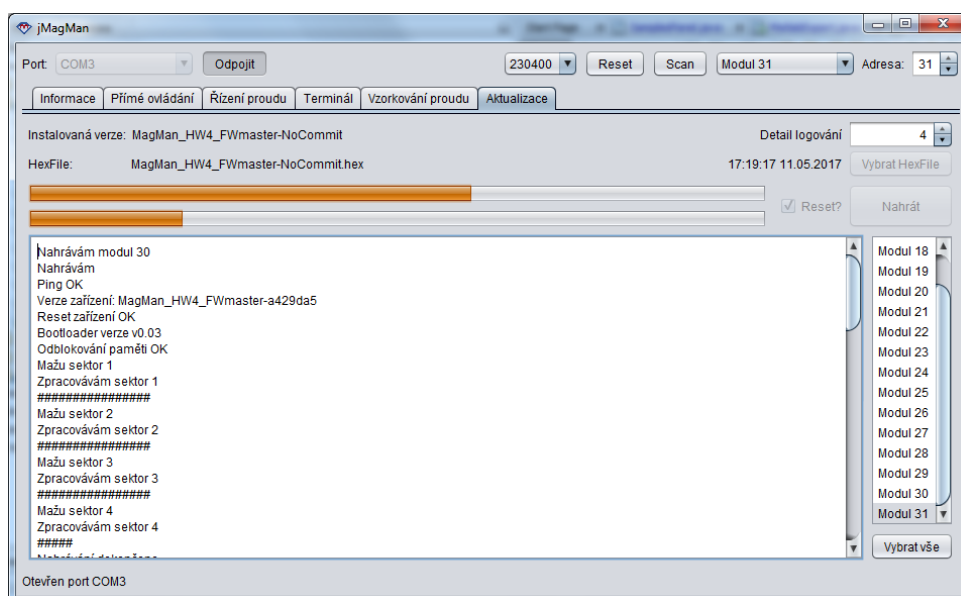
Obrázek 4.4: Karta "Terminál" aplikace jMagMan

úpravy souboru, informaci zobrazí v textovém poli a pravidelně aktualizuje. Před každým nahráním tak může uživatel zkontrolovat, zda došlo k aktualizaci souboru. Díky této funkci nedochází k tomu, že by se omylem nahrál starý firmware (například při chybě při kompilaci). Pokud jsou vybrány požadované moduly a soubor s firmwarem, tak nic nebrání stisknutí tlačítka "Nahrát". Pak aplikace ukazuje průběh nahrávání v podobě dvou bargrafů. Jeden ukazuje průběh nahrávání do jednoho modulu a druhý průběh celé operace. Detailní průběh je v textové podobě v hlavním poli karty.

4. Aplikace jMagMan



Obrázek 4.5: Karta "Vzorkování proudu" aplikace jMagMan



Obrázek 4.6: Karta "Aktualizace" aplikace jMagMan

Kapitola 5

Magnetické pole platformy

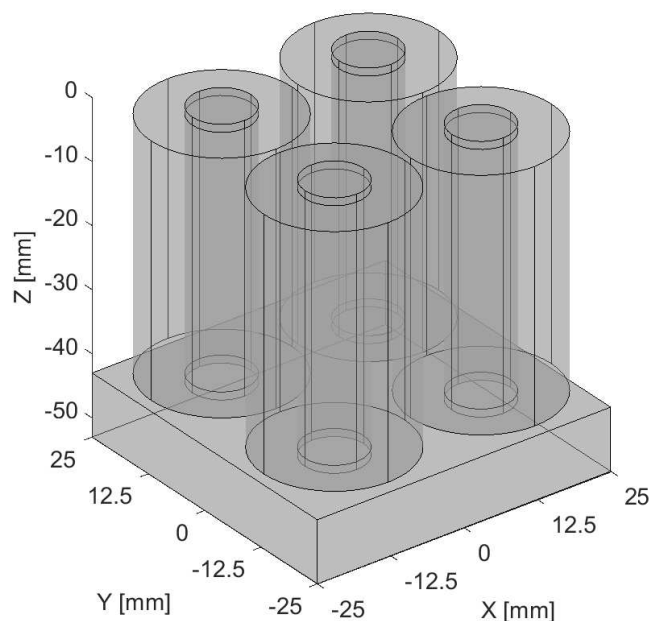
Magnetické pole platformy je díky tvaru celého zařízení komplikované, pro jeho modelování byl zvolen software COMSOL. V tomto programu byla namodelována geometrie modulu a pro jeho součásti byly dosazeny nebo odhadnuty fyzikální parametry. Tento simulační model může být použit jako základ pro numerické simulace experimentů obsahujících další předměty (kulička, atd.).

Geometrie modulu v prostředí COMSOL (obr. 5.1) je reprezentována jako základna ve tvaru kvádru, čtyři cívky tvořené měděným drátem, jejich plastová kostra a čtyři válcová jádra cívek. Pro potřeby experimentů je také připravena kovová kulička. Celý model (včetně některých parametrů) vychází z modelu vytvořeného Jakubem Tomáškem v rámci nedokumentovaných experimentů na cívkách platformy MagMan.

Model dále obsahuje nastavení jednotlivých fyzikálních domén, které obsahují fyzikální zákony platné pro danou doménu vyjádřené soustavou rovnic. V tomto případě je použit Ampérův zákon a také popis chování cívky. Tyto rovnice pak software řeší pro nastavenou síť bodů. Výstupem je řešení v každém bodě sítě, které se potom interpoluje pro účely vizualizace nebo následného zpracování.

Základna a jádra cívek

Základna (nosná část spojující jádra cívek) se chová se jako magnetický zkrat mezi jádry a tím také chrání elektroniku umístěnou pod ní proti rušení. Jádra cívek zesilují magnetické pole okolo cívek. Obě jsou vyrobené ze železa a pro model byla použita relativní permeabilita $\mu_r = 105$. Ostatní parametry tohoto materiálu byly ponechány v nezměněné podobě proti knihovnímu materiálu "železo".



Obrázek 5.1: Geometrie simulačního modelu

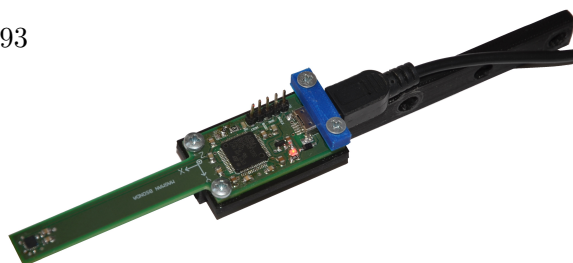
Cívky

Cívky jsou modelovány jako 2600 závitů měděného drátu s relativní permeabilitou 1. Do každé cívky je zaveden proud podle požadavků experimentu.

5.1 Měření pole

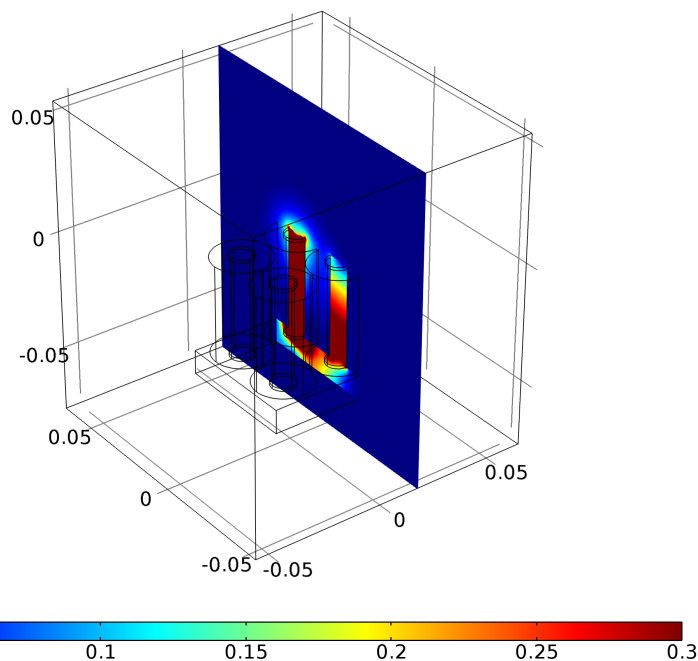
Pro účely srovnání modelu bylo provedeno měření magnetického pole v okolí modulu. K měření byla využita magnetická sonda vytvořená přímo k tomuto účelu Jiřím Záhorou v rámci letní stáže.

Magnetická sonda (obr. 5.3) je založena na senzoru MLX90393 od firmy Melexis, což je 16-ti bitový tří-osý magnetometr. Umožňuje měřit pole v osách X a Y až do 104.5 mT (s citlivostí 3.22 μT). Osa z má rozsah až 192.4 mT (s citlivostí 5.872 μT). Dříve provedená měření ukazují, že těsně nad koncem jádra modulu (oblast s nejsilnějším magnetickým polem, která je



Obrázek 5.3: Magnetická sonda

Slice: Magnetic flux density norm (T)



Obrázek 5.2: Vizualizace řezu magnetickým polem ze simulace. Cívkou v zadním rohu (na souřadnicích $x = 12.5$ mm a $y = 12.5$ mm) prochází proud $I_{max} = 440$ mA.

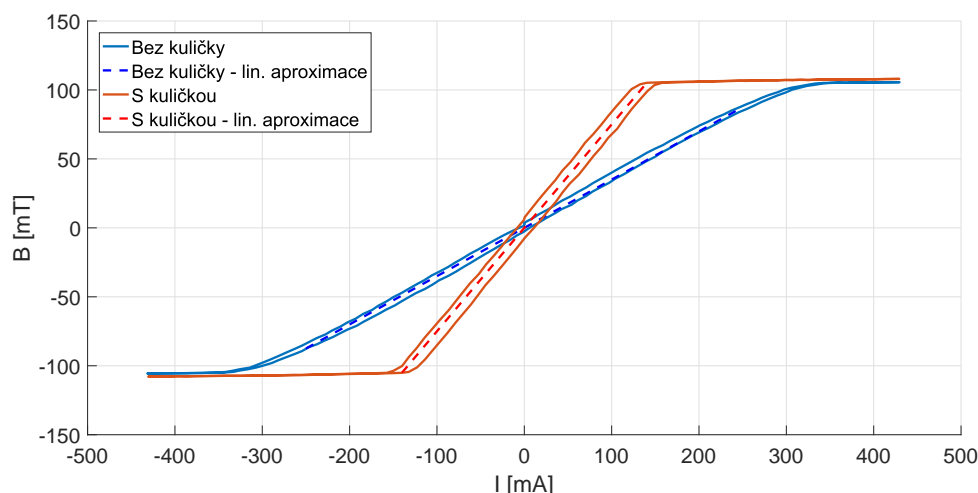
mimo pevné části) je magnetické pole přibližně 110 mT. Z toho vyplývá, že rozsah a citlivost sondy vyhovují měření platformy MagMan, protože nejsilnější složka je v ose, která odpovídá měřicí ose z sondy.

Měřicí sonda dále obsahuje procesor STM32F072RB od firmy ST, který má USB periférii a díky tomu je možné ho připojit přímo k počítači. Tento procesor přijímá pokyny od počítače (zahájit měření, změnit rozsah a citlivost) a podle nich obsluhuje senzor. Naměřenou hodnotu z převodníku senzoru podle aktuální citlivosti přepočte a do počítače posílá už hodnotu v podobě čísla s pohyblivou desetinnou čárkou ve fyzikálních jednotkách (mT). K sondě je také připraven ovladač do MATLABu, což umožňuje automatizaci měření.

Měřicí sonda byla namontována pomocí držáku vyrobeného pomocí 3D tisku na 3-osý manipulátor sestavený ze tří lineárních posuvů Zaber Tech T-LSM050A. Díky tomu je možné senzor přesně polohovat nad platformou. Manipulátor je říditelný z počítače (díky ovladači přímo z MATLABu) a tak bylo možné dlouhé měření z velké části zautomatizovat.

5.2 Hystereze a závislost na proudu

Průběhy hystereze (obr. 5.4) zaznamenané pomocí magnetické sondy ukazují, jak moc je magnetické pole platformy ovlivněné přítomností kuličky. Osa X



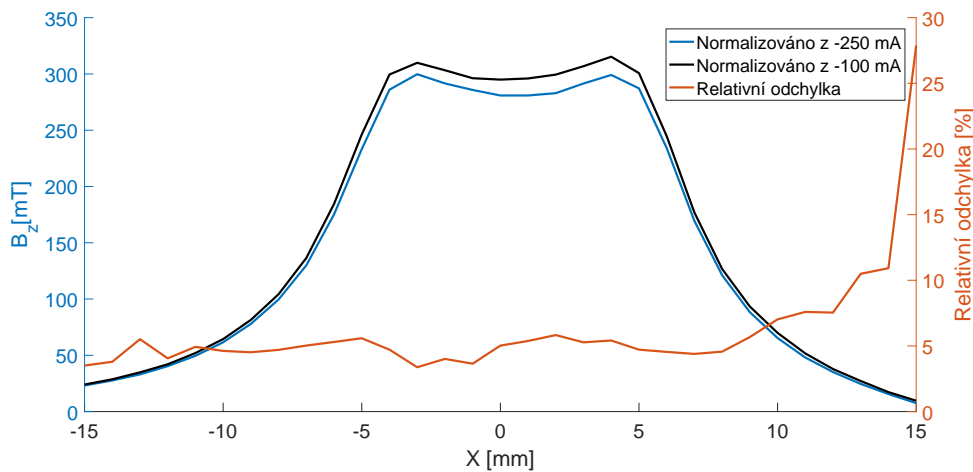
Obrázek 5.4: Srovnání hysterezní smyčky použité cívky s a bez přiložené kuličky, včetně možných lineární aproximací. Sonda byla umístěna mezi jádrem a kuličkou.

by mohla být také přepočtena do jednotek magnetické intenzity (H) pomocí vztahu $H = \frac{nI}{l}$, kde $n = 2600$ je počet závitů a $l = 40$ mm je délka cívky. Pro lepší představu jsou ale vhodnější jednotky proudu.

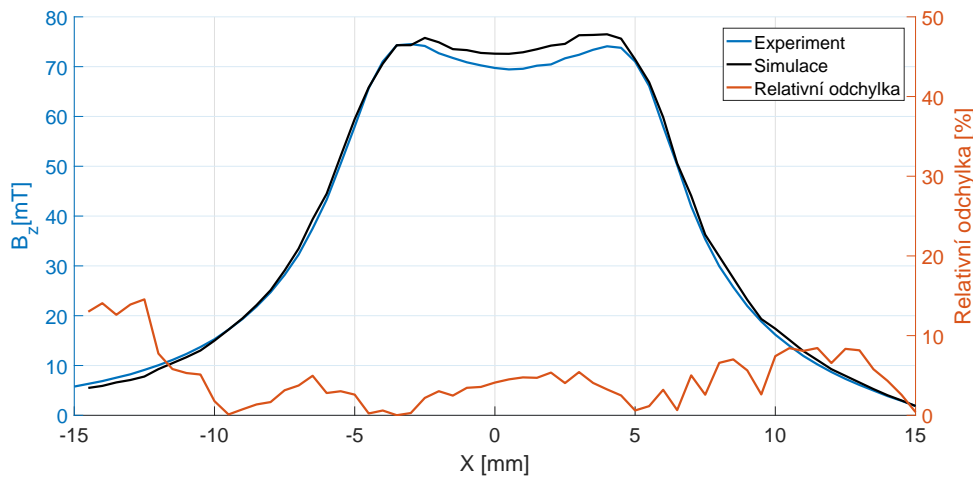
Průběh ukazuje, že pokud je cívka bez kuličky, tak dochází k nasycení při proudu $I_s = 350$ mA. Pokud je nad cívku kulička dochází k nasycení již při proudu $I_s = 170$ mA. Mezi body nasycení (kladný a záporný) lze nalézt oblast, kde se dá model zjednodušeně nahradit lineární závislostí. Při této náhradě dochází k zanedbání tvaru křivky a také remanentní magnetizace, která způsobuje magnetickou indukci naměřenou v případě nulového proudu. Bez kuličky taková náhrada způsobuje chybu do ± 6 mT (resp. ± 8 mT s kuličkou), pokud se povede na rozsahu ± 250 mA (resp. ± 100 mA s kuličkou). O vhodnosti takové náhrady je třeba rozhodnout v rámci každého prováděného experimentu. Pro některé experimenty může být tato odchylka již nepřijatelná a je nutné brát v úvahu celou závislost.

V rámci měření a ověřování simulačního modelu v COMSOLu bylo provedeno měření magnetického pole při různých proudech cívku (v oblasti, kde byla provedena náhrada hystereze cívky lineární závislostí magnetické indukce na proudu). Naměřená data byla normalizována na proud 1 A. Tato normalizace slouží pouze pro zjednodušení výstupů simulace, možnosti porovnávání a snížení množství dat. Vždy musí být zajištěno, aby využití dat probíhalo na rozsahu, pro který byla aproximace navržena.

Průběh v ose X (obr. 5.5) ukazuje, že rozdíl mezi magnetickým polem vzniklým normalizací měření při -250 mA a při -100 mA se pohybuje kolem 5 %. Výraznější chyba se ukazuje v pravé části průběhu, tu ale lze připsat chybě měření. Naměřená hodnota pole se zde blíží 0, čímž je relativní chyba zdůrazněna.



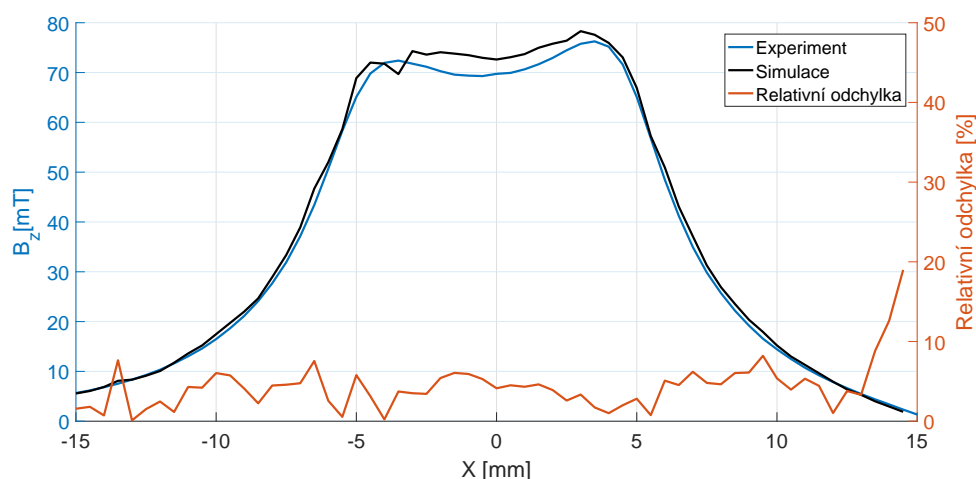
Obrázek 5.5: Průběh z složky magnetického pole v ose x, normalizované na 1 A z -250 mA a -100 mA a jejich relativní chyba



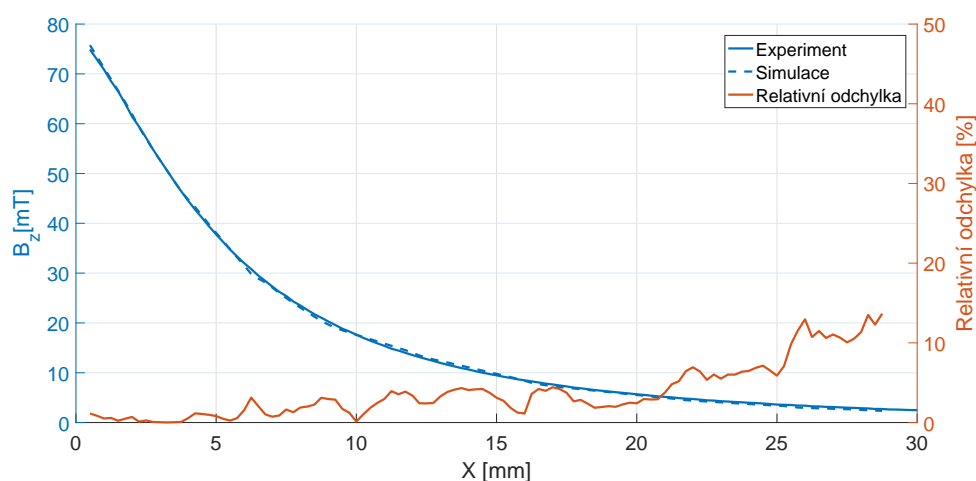
Obrázek 5.6: Průběh magnetického pole (složka Z) podél osy X při 250 mA a jejich relativní chyba

5.3 Srovnání modelu a simulace

Simulační model je díky lineární aproximaci závislosti na proudu normalizován pro proud 1 A. a výsledné magnetické pole je násobeno proudem použitým při experimentu. Srovnávací průběh (obr. 5.6) ukazuje, že relativní odchylka mezi měřením a simulací se pohybuje do 10 %. Tuto hodnotu opět přesahuje jen v oblastech, kde je nízké magnetické pole, tam převažuje chyba měření. Tvar průběhu v ose X (obr. 5.6) a Y (obr. 5.7) je podobný díky osové symetričnosti cívky. Rozdíly jsou způsobeny nosnou konstrukcí (do které jsou namontována jádra cívek) a ostatními cívkami modulu. Srovnání v ose z (obr. 5.8) ukazuje, že model dobře popisuje pole kolem cívky. Relativní odchylka se opět projevuje u nízkých hodnot magnetické indukce.



Obrázek 5.7: Průběh magnetického pole (složka Z) podél osy Y při 250 mA a jejich relativní chyba

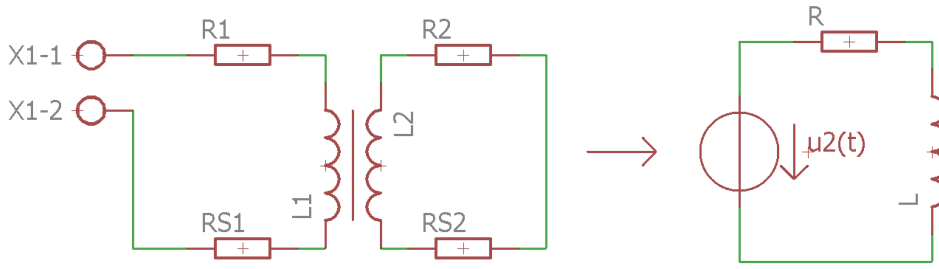


Obrázek 5.8: Průběh z složky magnetického pole v ose Z při 250 mA a jejich relativní chyba

5.4 Vzájemná indukčnost

Jeden ze zatím nezkoumaných fyzikálních jevů na platformě MagMan je vzájemná indukčnost cívek. Dá se očekávat, že vzájemná vazba mezi cívkami bude nezanedbatelná, protože cívky mají jádra spojená v magneticky dobře vodivé základně. Díky této vazbě vzniká silná závislost mezi změnami proudů v jednotlivých cívkách vyjádřená vzájemnou indukčností. Dohromady tvoří spojení podobné transformátoru. Další motivací může být odhadování polohy kuličky ze vzájemné indukčnosti cívky. Pro odhadování polohy může být také použita vlastní indukčnost, protože i ta je ovlivněna přítomností kuličky.

Pro návrh složitějších experimentů je vhodné mít tuto vazbu změřenou a získat tak možnost rozhodnutí zda je vazba pro daný experiment zanedbatelná. Pro odhad vzájemné indukčnosti byl proveden experiment, při



Obrázek 5.9: Zapojení včetně vazby mezi cívkami a náhradní zapojení přijímací části

kterém byl jednou cívkou vyslán pulz skokovou změnou napájecího napětí (resp. střídou spínání), a ostatní cívky byly ponechány v klidu. Díky vzájemné indukčnosti se na nich naindukují napětí, což způsobí tok indukovaného proud, který je měřen. Všechny průběhy proudů byly zaznamenány přímo na modulech, a to díky možnosti přímého záznamu, která byla přidána při úpravě softwaru pro nové moduly (viz kap. 3). Průběhy pak byly staženy do počítače prostřednictvím aplikace jMagMan (kap. 4) do MATLABu pro jejich následné zpracování.

Náhradní zapojení (obr. 5.9) uvažované při tomto experimentu se skládá ze zdroje napětí, který reprezentuje indukované napětí díky vazbě mezi cívkami, odporu cívky a její vlastní indukčnosti. Vzájemná indukčnost je pak vypočtena ze vztahu

$$M \frac{di_1(t)}{dt} = u_2(t), \quad (5.1)$$

kde $i_1(t)$ je průběh proudu ve vysílací cívce a $u_2(t)$ je indukované napětí na přijímací cívce. Vzhledem k tomu, že je přijímací cívka zatížena zkratem, tak platí, že

$$u_2(t) = u_{L_2}(t) + u_{R_2}(t), \quad (5.2)$$

$$u_2(t) = L \frac{di_2(t)}{dt} + Ri_2(t), \quad (5.3)$$

takže

$$M = \frac{L \frac{di_2(t)}{dt} + Ri_2(t)}{\frac{di_1(t)}{dt}}, \quad (5.4)$$

kde R je odpor a L je indukčnost náhradního zapojení cívky. M je hledaná vzájemná indukčnost. Vzhledem k numerickému řešení byla celá rovnice zintegrována pro větší numerickou stabilitu. Rovnice použitá pro řešení za počáteční podmínky $i_2(t_0) = 0$ je

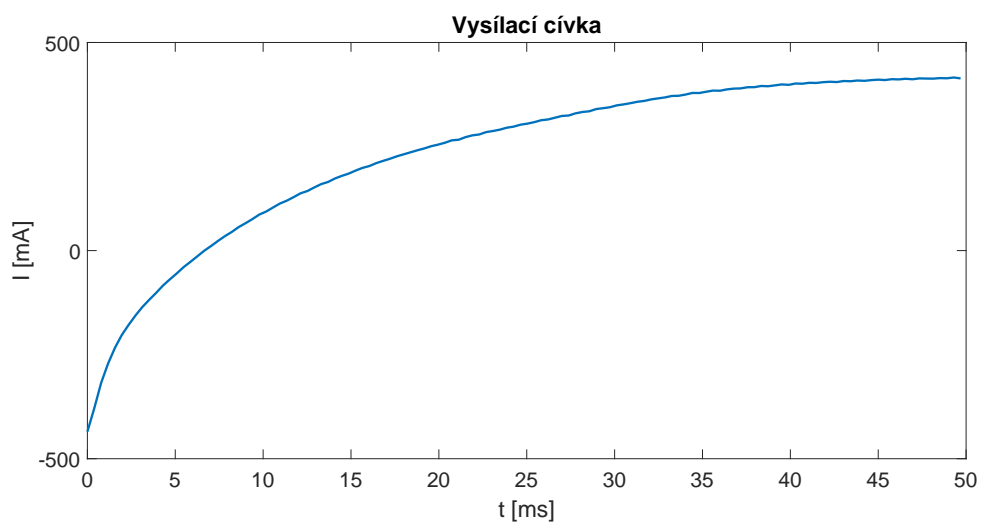
$$M = \frac{Li_2(t) + R \int_{t_0}^t i_2(\tau) d\tau}{i_1(t)} \quad (5.5)$$

resp. v diskretní formě se vzorkovací periodou t_s

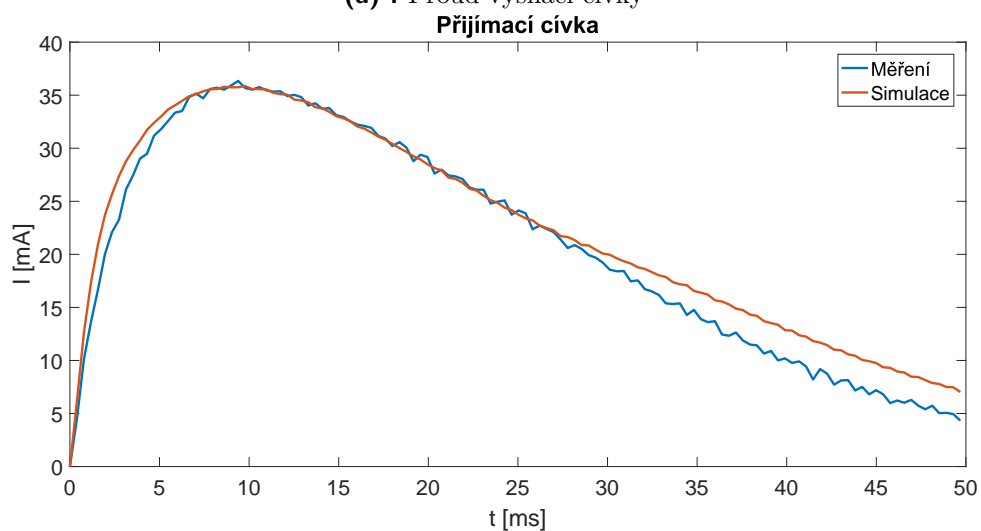
$$M_n = \frac{Li_2[n] + Rt_s \sum_{k=0}^n i_2[k]}{i_1[n]}. \quad (5.6)$$

Z tohoto vztahu byla vypočtena vzájemná indukčnost ve všech bodech (obr. 5.10c) a pro odhad byla použita pouze její část, ve které dochází k velké změně proudu na vysílací cívce. Přesnost výpočtů totiž přímo závisí na velikosti této změny (kvůli dělení derivací proudu (rovnice 5.4)).

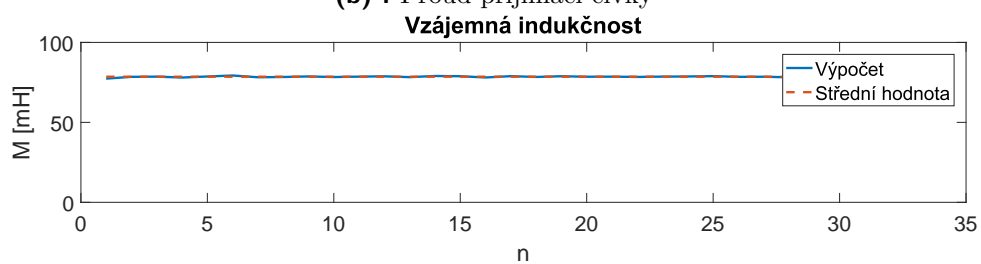
Střední hodnota (části) průběhu vzájemné indukčnosti vychází $M = 78.5$ mH. Tato hodnota pak byla použita k simulaci jejíž srovnání s experimentem je vidět na obr. 5.10b.



(a) : Proud vysílací cívky



(b) : Proud přijímací cívky



(c) : Odhad vzájemné indukčnosti

Obrázek 5.10: Vájemná indukčnost experiment

Kapitola 6

Měření polohy

V současné době se pro měření polohy používá buď dotyková fólie nebo kamera. Obě možnosti plní funkci dobře, každá má ale nevýhody.

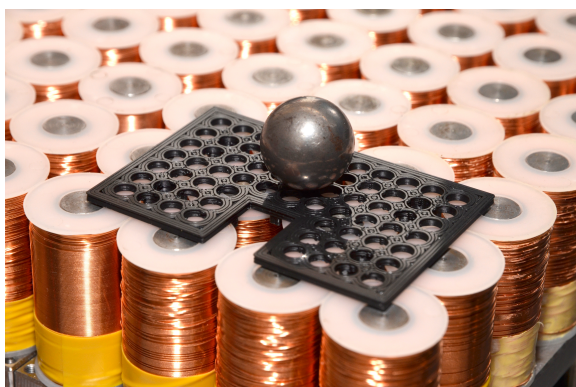
Metoda	Výhody	Nevýhody
Strojové vidění	+ Dobré rozlišení + Možnost detekce více předmětů + Neovlivňuje mg. pole	– Rychlost vzorkování – Bez možnosti distribuovaného řešení – Nutnost dostatečného a stálého osvětlení scény
Dotyková fólie	+ Rychlost vzorkování + Dobré rozlišení + Neovlivňuje mg. pole	– Omezení na hmotnost kuličky (nutnost dostatečného tlaku) – Bez možnosti distribuovaného řešení

Tabulka 6.1: Srovnání metod

Obě momentálně používané metody vyžadují, aby byla platforma osazena dalším vybavením, a to buď kamerou nebo dotykovou fólií. Při použití kamery ještě dostatečné a stálé osvětlení scény. Dotyková fólie podmínky na osvětlení neklade, ale zvyšuje vzdálenost mezi jádry cívek a kuličkou. Hlavní výhodou momentálně používaných metod je fakt, že neovlivňují magnetické pole platformy a že nekladou ani žádný požadavek na magnetické pole (resp. proudy cívkami). Všechny nyní navrhované metody takové požadavky vznášejí, což by pravděpodobně negativně ovlivnilo schopnosti řízení. Minimálně by je řídicí systém musel brát v úvahu, a bylo by třeba vždy posoudit jejich vliv. Z tohoto hlediska by, i v případě realizace, navrhované metody sloužily spíše jen jako ukázka možných řešení.

6.1 Odhad polohy podle měření pole

Možností jak využít magnetické pole je víc. První z nich je přímé měření magnetického pole platformy. V případě přímého měření je potřeba po platformě rozmístit senzory magnetického pole (například typ použitý v kap. 5.1). Z těchto senzorů je třeba pravidelně snímat hodnotu magnetického pole. Toto



Obrázek 6.1: Šablona pro pozicování kuličky

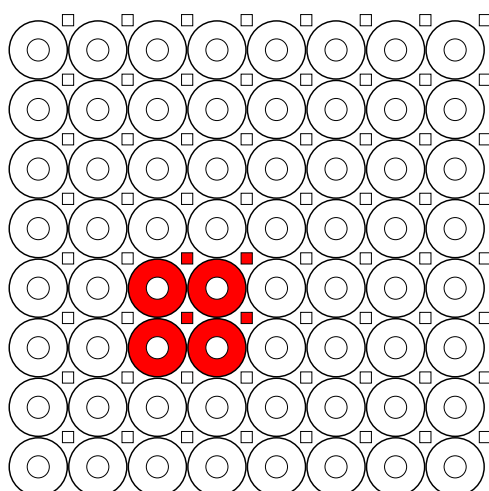
měření lze provádět jak centralizovaně, tak distribuovaně. V obou případech je ale nutné znát aktuální proud, který je nutné snímat synchronně s měřením magnetického pole.

Pro tuto metodu by bylo ideální, kdyby bylo pole co nejsilnější, aby vliv předmětu způsobil velkou změnu magnetického pole. Požadavek na hodnotu proudu může znamenat, že buď v některých stavech nebude možné měřit (kvůli kolizi požadavku řídicího a měřicího systému), nebo že měření dostane prioritu a díky němu bude ovlivněno řízení. Řízení by pak muselo být na takový případ připravené a vzniklou regulační chybu stíhat odstranit.

V ideálním případě by byl (pomocí proudu cívky) vytvořen velmi krátký pulz magnetického pole, naměřeny požadované hodnoty a pak by se hodnoty proudu vrátily na úroveň požadovanou řídicím systémem. Problémem ale je, že možnosti rychlých změn proud jsou omezené i za použití regulace (viz kap. 3.3). Pro měření vlivu kuličky je třeba, aby se proud ustálil (a tím i magnetické pole). K tomu dochází v řádu desítek milisekund. To znamená, že pokud by pro lokalizaci kuličky stačil jediný pulz (což nestačí, je potřeba minimálně střídat různé cívky), bylo by možné měřit s frekvencí až 100 Hz. Měření s touto frekvencí by znamenalo, že by byl využit veškerý čas pro měření a žádný čas pro řízení, což také není žádoucí, takže by musela být řádově menší. I v případě realizace této metody za ideálních podmínek by obnovovací frekvence nebyla dostačující pro řízení. V současné době se používá frekvence alespoň 25 Hz.

Pro určení vlivu předmětu na magnetické pole byl proveden experiment s použitím měřicí sondy (viz kap. 5.1) a numerické simulace v programu COMSOL. Sonda byla umístěna do středu mezi cívky, tedy do místa, kde by v budoucnu mohl být senzor umístěn. Ve stejném místě byla také vyhodnocována simulace. Pro pozicování kuličky byla použita šablona (obr. 6.1) vyrobená pomocí 3D tisku. Díky této šabloně měla kulička požadovanou polohu. Rozteč jejích děr určuje mřížku, ve které byla data měřena (rozteč 6.25 mm).

Při tomto rozložení senzorů (obr. 6.2) by každý modul obsahoval a případně i obsluhoval čtyři senzory. V případě centralizovaného řešení by všechny



Obrázek 6.2: Rozložení senzorů pro měření magnetického pole

senzory měly být připojené k řídicí jednotce měření. V případě distribuovaného řešení by bylo potřeba, aby si sousední moduly (i úhlopříčně) mezi sebou vyměňovaly výsledky měření a synchronizovaly se v jednotlivých krocích měření.

Naměřená data ukazují, že kulička má vliv na magnetické pole ve středu mezi cívkami. Změna magnetického pole však není velká vůči magnetickému poli u cívky, která ho vytváří. V případě experimentu byl použit proud cívkou $I_2 = 250 \text{ mA}$, tedy podle dříve naměřených dat je u cívky magnetické pole o velikosti přibližně $|\mathbf{B}| \doteq 75 \text{ mT}$. Vliv kuličky je při tomto proudu přibližně $|\Delta B| \doteq 6 \text{ mT}$, pokud se nachází přímo nad senzorem.

Na srovnání měření se (obr. 6.3) simulací je vidět, že simulace poměrně dobře popisuje reálný model vzhledem k tomu, o jak velké hodnoty pole jde. Pro určení polohy z naměřených dat by bylo třeba najít inverzi této závislosti. V ideálním případě také analytický model pole v závislosti na poloze kuličky a jeho inverzi. Analytický model bude, vzhledem ke tvaru modulu, poměrně složitý.

6.2 Odhad polohy podle měření vzájemné indukčnosti

Druhá možnost, jak odhadovat polohu, je využití změn vzájemné indukčnosti v závislosti na poloze kuličky. Pro tuto možnost hovoří fakt, že by nebylo nutné přidávat na platformu žádné další měřicí prvky. K měření by se totiž použil již obsažený systém měření proudu.

Měření by probíhalo podobně jako provedený experiment (kap. 5.4) s tím rozdílem, že by muselo být pro vysílání pulzu použito střídavě několik různých cívek. Vzhledem k časové konstantě použitých cívek (přibližně 10 ms) by i v případě distribuovaného řešení trvalo několik těchto měření. Takže perioda

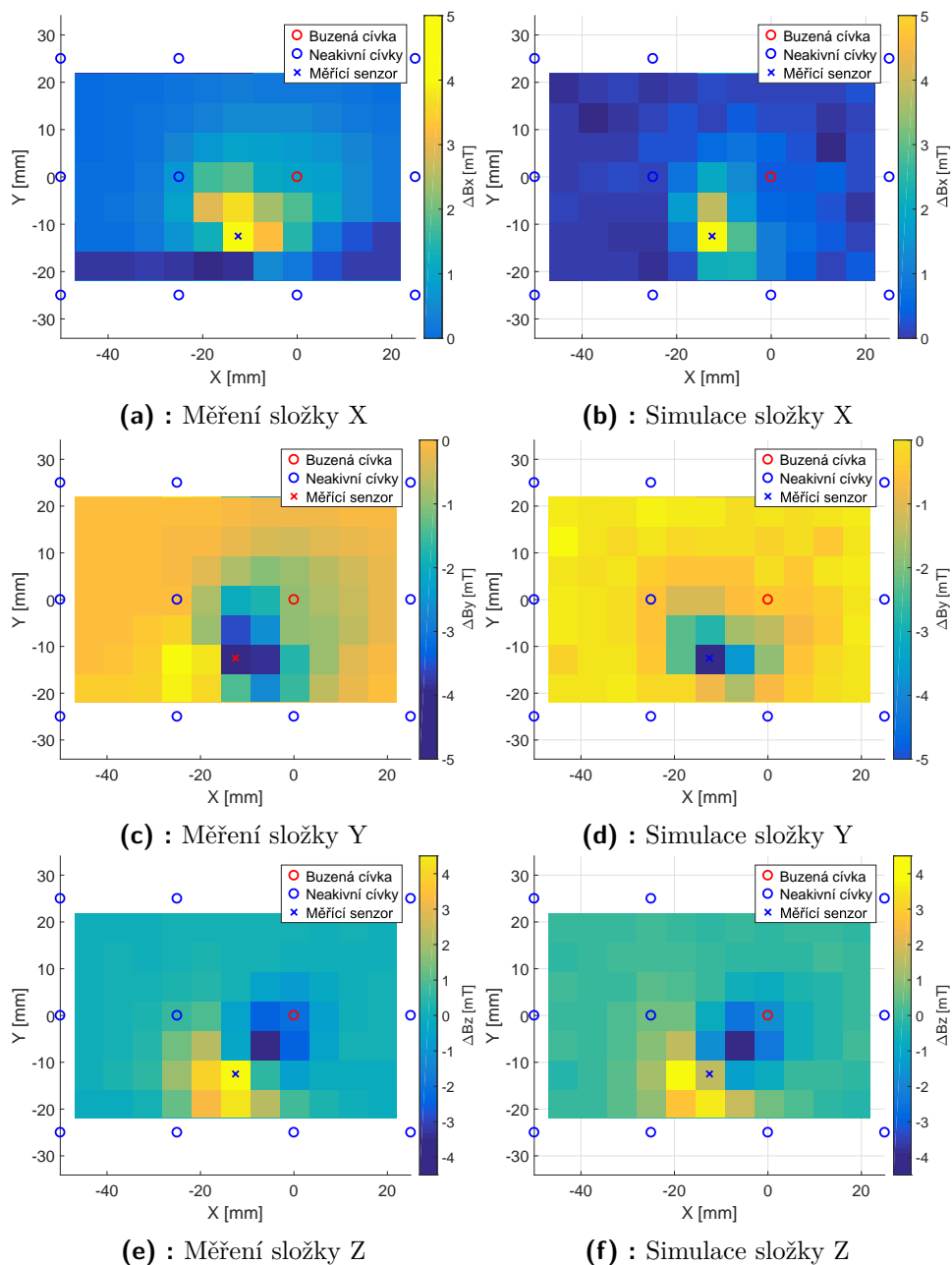
měření by se pohybovala v nejlepším případě kolem 50 ms s podmínkou zajištění komunikace mezi sousedními moduly. Kromě výměny výsledků měření po každém pulzu by bylo nutné také zajistit synchronizaci jednotlivých měření.

Pro naměření dat, ze kterých lze usuzovat možnosti takového řešení byl využit obdobný experiment jako v kapitole 5.4. Sestava byla doplněna kuličkou, jejíž pozice byla postupně upravována. Průběhy, které byly zaznamenány ukazují, že vliv kuličky na vzájemnou indukčnost (resp. na vybuzený proud v přijímací cívce) je malý. Při největší možné změně na vysílací cívce (tedy z maximálního záporného proudu na maximální kladný proud) je bez kuličky vybuzený proud v maximu přibližně $I_{2max} = 37$ mA (viz. obr. 5.10b). Po vložení kuličky mezi cívky se vzájemná vazba změní, jak ukazuje výstup experimentu (obr. 6.4). V grafu je vidět rozdíl mezi jednotlivými průběhy, kterým odpovídá poloha kuličky. Tento rozdíl je sice patrný avšak je pouze 3 mA. To je vzhledem k absolutní chybě měření (přibližně 2 mA) málo.

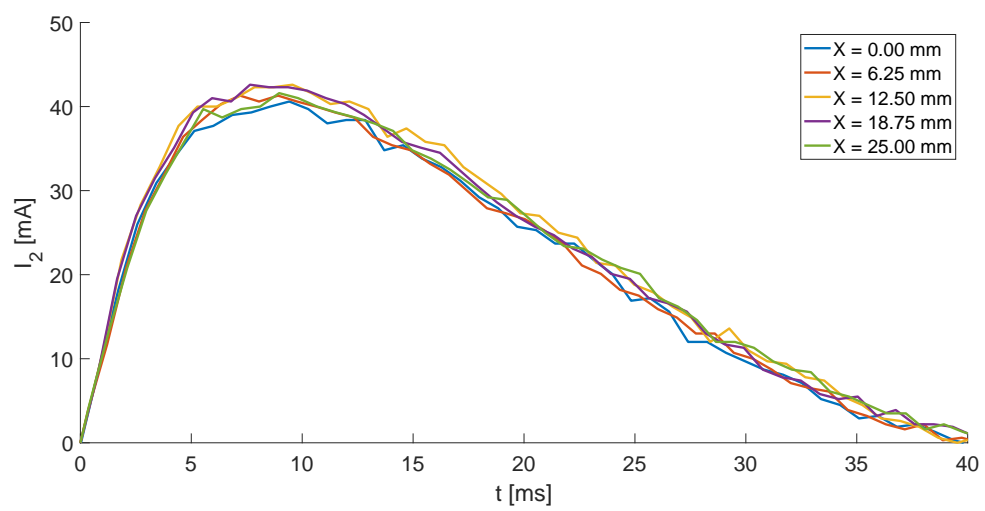
Vzhledem k výše uvedeným informacím není určení polohy touto metodou v současné konfiguraci možné. Vyžadovalo by to přesnější měření proudu a i tak zůstává problém nutnosti velkých změn proudu ve vysílací cívce, což výrazně ovlivní řízení. Nemluvě o velmi pomalé frekvenci odhadování polohy, protože vyslání a naměření pulzu trvá přibližně 40 ms a pro určení polohy by bylo nutné použít postupně několik pulzů z různých cívek.

6.3 Srovnání všech možností měření polohy

Obě popsané metody mají značnou nevýhodu a tou je ovlivňování magnetického pole. Pokud by měřící systém neovlivňoval proudy v cívkách, docházelo by k měnící se přesnosti měření a tím i odhadu polohy. V některých případech by měření ani nebylo možné (například vypnuté cívky). Měření vzájemné indukčnosti vznáší požadavek dokonce na změnu magnetického pole, čímž metodu pro použití diskvalifikuje. Odhad polohy z měření magnetického pole mezi cívkami vychází lépe. I tak ale nejlépe vychází dosud používané metody (dotyková fólie a strojové vidění).



Obrázek 6.3: Srovnání složek magnetické pole mezi měřením a simulací a ukázka vliv kuličky na magnetické pole mezi cívkami v závislosti na její poloze

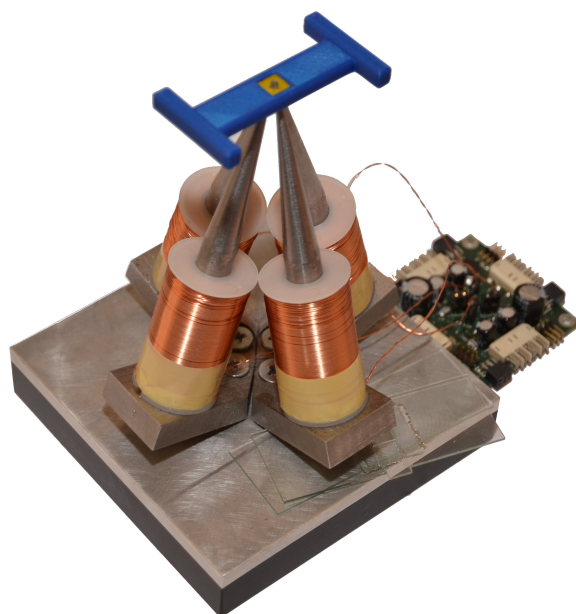


Obrázek 6.4: Průběh proudu na přijímací cívce v závislosti na poloze kuličky mezi cívkami

Kapitola 7

Přípravek pro mikromanipulaci

Přípravek pro mikromanipulaci (obr. 7.1) je zařízení, které vzniká paralelně s platformou MagMan. Jeho úkolem má být manipulace s předměty o rozměrech v řádu μm , což by rozšířilo spektrum možných budoucích aplikací.



Obrázek 7.1: Přípravek pro mikromanipulaci s připojeným modulem

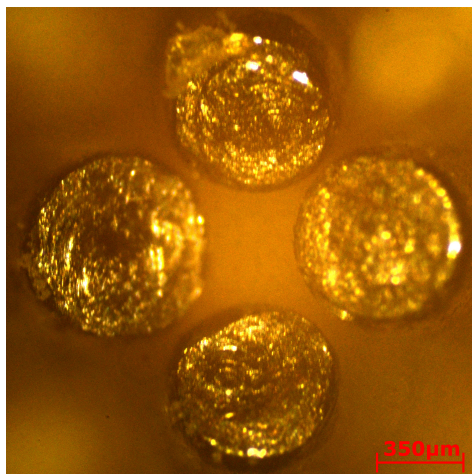
Jedná se o konstrukci jader tvořících špičky. V rámci této práce byla jádra osazena cívkami a připojena k desce elektroniky. Vzhledem k jeho podobnosti s modulem platformy MagMan byla použita použita deska elektroniky stejná jako pro moduly. Dokonce jsou použity i stejné cívky. Jednotlivé špičky směřují k sobě a jsou spojeny ve spojovacím dílu (žlutý díl v horní části obr. 7.1 vyrobený 3D tiskem) tak, že se téměř dotýkají (obr. 7.2). Spojovací díl také slouží pro montáž nástavců pro provádění experimentů.

První experiment byl prováděn s niklovými kvádry, které ale mají jeden rozměr výrazně menší než ostatní. Jde proto v podstatě o velmi tenké objekty tvaru čtverce. Na spojovací díl byl osazen plastový díl (také vyrobený 3D

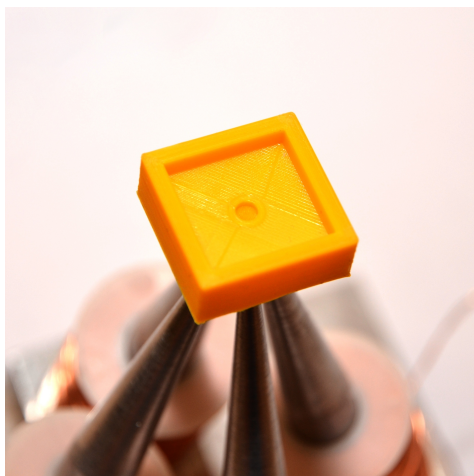
tiskem) tvořící nádobu na vodu s objekty (obr. 7.3). Spodní stěna nádoby je v místě kontaktu se špičkami tlustá pouze 0.2 mm, aby byla zajištěna nejlepší možná magnetická vazba.

První poznatky ukázaly, že se objekty pohybují směrem k cívce, pokud je buzena obdélníkovým průběhem napětí se střídavou polaritou. Pohyb objektů byl sledován a zaznamenáván pomocí mikroskopu. Zaznamenaná stopa (obr. 7.4) ukazuje, že při střídání buzených cívek lze dosáhnout dvouosé manipulace. Jednotlivé fáze experimentu odpovídají buzení jednotlivých cívek. Jako nejúčinnější frekvence byla experimentálně určena hodnota $f_{\text{switch}} = 5$ Hz, při které se objekty pohybovaly nejrychleji. Každá fáze (střídavé spínání jedné cívky) trvala 4 s. Problémem provedeného experimentu bylo, že povrch nádoby nebyl hladký, a proto se objekty zachytávaly na jeho hranách. Pro další experimenty by bylo vhodnější vyrobit nádobu s hladkým dnem.

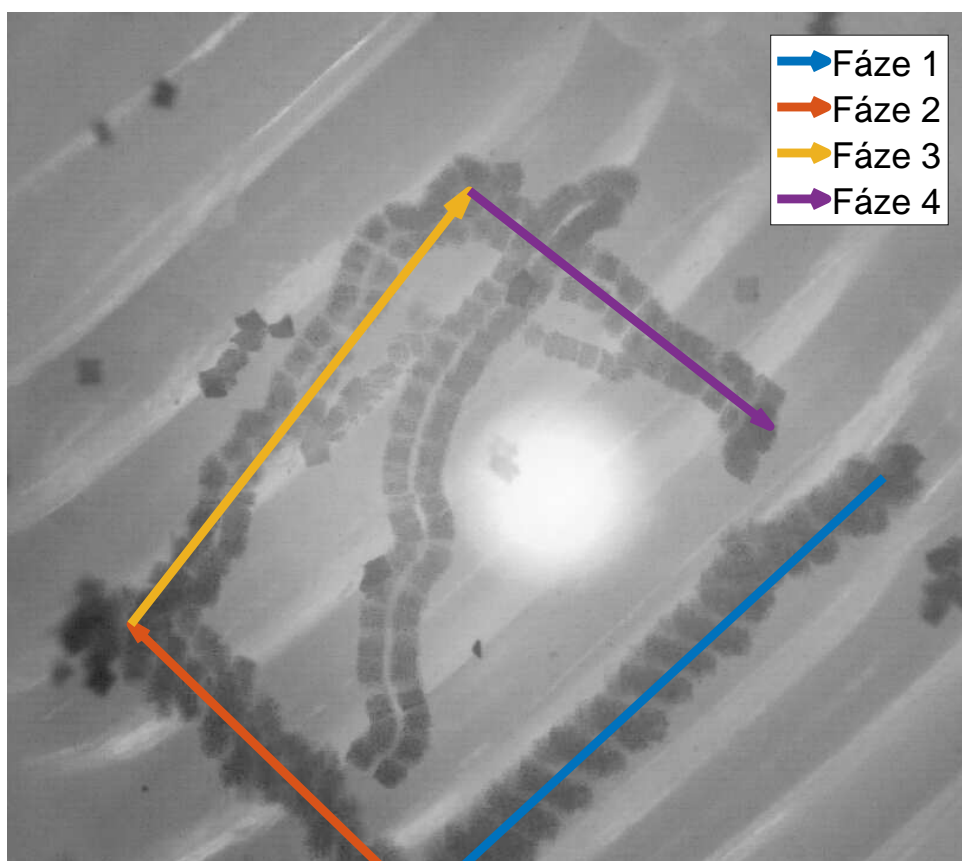
Tento experiment ukazuje, že manipulace pomocí tohoto přípravku je možná a stojí za další důkladnější prozkoumání. Aplikací by mohlo být například třídění objektů připlouvajících v kapalině.



Obrázek 7.2: Vrcholy špiček blížící se k sobě



Obrázek 7.3: Nádoba pro provádění experimentů osazená na přípravku



Obrázek 7.4: Záznam stopy miniaturních niklových čtverečků

Kapitola 8

Návrh nového konceptu platformy

Ačkoliv proběhlo rozšíření platformy v rámci této práce teprve nedávno (kap. 3), je v dlouhodobém plánu celkové přepracování a tvorba verze, která se bude významně lišit. Během používání platformy se totiž ukázalo, že má principiální omezení, které nelze překonat. Pro mnoho experimentů je ale dostačující. Hlavním omezením je v současné době výpočetní výkon procesoru a dostupnost jeho periférií. Dalším významným omezením jsou komunikační možnosti desky modulu.

8.1 Procesor

Deska modulu je nyní osazená procesorem LPC1313 od firmy NXP [6]. Jde o procesor s jádrem *ARM Cortex-M3*, který je provozován s jeho maximálním taktům 72 MHz. Nevýhodou tohoto procesoru je nedostupnost jednotky pro práci s čísly s plovoucí desetinnou čárkou *FPU* (Floating Point Unit). Všechny algoritmy prováděné na procesoru tak musí být převedeny do podoby, která pracuje s čísly s pevnou desetinnou čárkou. Je tu sice možnost použít emulovanou podporu desetinné čárky, ta je ale výrazně pomalejší a pro většinu řešených problémů se nehodí. Další chybějící blok je DMA (Direct Memory Access). Tento blok umožňuje přenos dat mezi pamětí a některou z periférií a nebo obráceně. Druhou možností použití DMA je pro kopírování dat z jedné části paměti do druhé. Velkou výhodou je, že DMA pracuje bez aktivní účasti jádra procesoru, které se může věnovat jiným úkolům.

8.2 Komunikační možnosti

Moduly momentálně komunikují pomocí sběrnice RS485 [9] a chovají se výhradně jako *Slave*, tedy pouze přijímají povely a odpovídají na dotazy od nadřazeného systému. To dostačuje pro centralizované řízení, ale bohužel už ne pro řízení distribuované. Další nevýhodou je, že použitá sběrnice definuje pouze nejnižší úroveň komunikace a zbytek protokolu je implementován

Kapitola 9

Závěr

V rámci této práce byl řídicí systém převeden ze stolního počítače na Raspberry Pi při zachování grafických schémat v prostředí MATLABu. Byla vytvořena knihovna bloků do Simulinku tvořící abstrakci jednotlivých hardwarových částí (moduly, měření polohy, kamera). Pro zpracování dat z kamery připojené k Raspberry Pi byl napsán program v jazyce Python, který se stará o vyhledávání kuličky v obraze a předává její pozici do MATLABu.

V druhé části práce byla realizována nová rozšířená sestava vylepšených modulů, která umožní větší experimenty. Díky nově implementovanému proudovému regulátoru je možné řídit proud s rychlejší odezvou (za jistých podmínek). To by mělo zlepšit chování platformy při různých experimentech.

Souběžně s ostatními úkoly byla výrazně rozšířena aplikace jMagman, která zjednodušuje a zpříjemňuje práci s platformou. Její jednotlivé části vznikaly dle aktuálních potřeb a požadavků. V současné době lze stejně dobře využít platformu jak z grafické aplikace jMagMan, tak z prostředí MATLABu, kde je ale potřeba psát jednotlivé příkazy, nebo si napsat skript.

V další části bylo provedeno měření a simulace magnetického pole okolo platformy pro účely odhadu polohy kuličky z magnetického pole a také vzájemné vazby mezi cívkami platformy vyjádřené vzájemnou indukčností. Byl vytvořen simulační model v prostředí aplikace COMSOL, který podle srovnání s měřením dobře popisuje chování platformy.

Na tuto část navázal pokus o prozkoumání závislosti vlivu kuličky na magnetické pole platformy. Tento vliv se ukazuje jako měřitelný (podobný vliv ukazuje i simulace), ale reálné podmínky potřebné pro takové měření nejsou slučitelné se standardním použitím platformy (dlouhá doba měření, několik různých měření, nutná výměna dat mezi moduly a měřícím systémem, ovlivnění řízení). Obdobně dopadl i pokus o odhad polohy pomocí vzájemné indukčnosti. V tomto případě jsou ale požadavky kladeny dokonce na změnu magnetického pole.

Následující část se věnuje přípravku pro mikromanipulaci, který byl dokončen (3D tisk dílů, osazení cívkami, připojení k elektronice). A byl na něm proveden jednoduchý experiment, který ukázal, že je 2D manipulace miniaturních částíček možná. Vzhledem k tomuto závěru stojí za to pokračovat

v práci s tímto přípravkem a pokusit se dosáhnout zajímavějších výsledků.

Poslední část se krátce zabývá popisem problémů aktuálního konceptu modulů a vyjmenovává hlavní části, o které by měl být nový koncept doplněn. Nový koncept je ještě potřeba detailněji rozpracovat podle aktuálních a budoucích požadavků na platformu.

V nejbližší době by mělo být hlavním cílem projektu využít nových možností, které přineslo rozšíření platformy (hlavně větších rozměrů). Toto rozšíření přineslo zvětšení stupně volnosti platformy a mělo by umožnit nezávislou manipulaci pomocí více objektů zároveň (samozřejmě při dodržení rozestupu mezi nimi).



Literatura

- [1] CiA. *CiA 102 version 3.0.0 Physical layer for industrial applications*. 2010. URL: <https://www.can-cia.org/standardization/specifications/>.
- [2] Martin Gurtner a Jiří Zemánek. “Ball in double hoop: demonstration model for numerical optimal control”. In: *IFAC Proceedings Volumes* (2017).
- [3] Texas Instruments. *INA21x Voltage Output, Low- or High-Side Measurement, Bidirectional, Zero-Drift Series, Current-Shunt Monitors*. 2017. URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina214.pdf>.
- [4] Texas Instruments. *SN65HVD7x 3.3-V Supply RS-485 With IEC ESD Protection*. 2016. URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn65hvd78.pdf>.
- [5] Meanwell. *750W Single Output Power Supply*. 2013. URL: <http://www.czech-meanwell.cz/fotky10575/fotov/RSP-750-spec.pdf>.
- [6] NXP. *32-bit ARM Cortex-M3 microcontroller; up to 32 kB flash and 8 kB SRAM; USB device*. 2012. URL: http://www.nxp.com/documents/data_sheet/LPC1311_13_42_43.pdf.
- [7] Filip Richter. “Úprava instrumentace pro magnetickou platformu Magman”. 2014. URL: https://support.dce.felk.cvut.cz/mediawiki/images/2/23/Bp_2014_richter_filip.pdf.
- [8] Aram Simonian. “Feedback control for planar parallel magnetic manipulation”. Dipl. ČVUT FEL, 2014.
- [9] International Organization for Standardization. *INTERNATIONAL STANDARD ISO/IEC 8482*. 1993. URL: https://prod.nais.nasa.gov/eps/eps_data/133352-SOL-001-008.pdf.
- [10] Petr Svoboda. “Řízení modulů magnetické platformy MagMan, komunikační protokol Elvis”. 2012.
- [11] Linear Technology. *LT1999: High Voltage, Bidirectional Current Sense Amplifier*. 2010. URL: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/1999fd.pdf>.



Příloha A

Obsah přiloženého CD

Přiložené CD obsahuje:

1. Tuto práci ve formátu PDF
2. Aplikaci pro lokalizaci kuličky v obraze
3. Modely a zdrojové kódy pro MATLAB včetně naměřených dat
4. Dokumentaci k platformě MagMan, která není dostupná online

Některé přiložené soubory pochází z dokumentace k platformě MagMan.