

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Diplomová práce

ELEKTROMAGNETICKÝ SYSTÉM PRO
POLOHOVÁNÍ MAGNETICKÝCH TĚLES

Jiří KUTHAN

2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří KUTHAN**
Osobní číslo: **E15N0022P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Elektromagnetický systém pro polohování magnetických těles**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

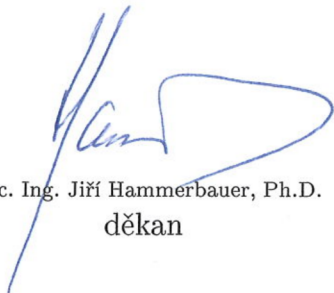
1. Popište problematiku prostorového polohování magnetických těles pomocí elektromagnetického pole.
2. Proveďte rešerši současných systémů založených na této technice a popište možnosti jejich využití.
3. Vytvořte základní návrh systému pro polohování miniaturních magnetických těles.
4. Formulujte matematický model popisující navržený systém a na základě jeho řešení proveďte simulaci jeho funkce.
5. Ověřte funkčnost navrženého systému na jeho prototypu.

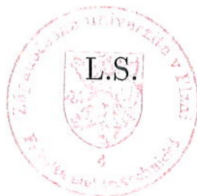
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:


1. **HUSÁK, Miroslav. Mikrosenzory a mikroaktuátory. Academia, 2008.**
2. **MAYER, Daniel. Aplikovaný elektromagnetismus. 2012.**
3. **KOLK, H. Characterization, modeling and control of magnetic microrobots. 2013.**
4. **ARORA, Nipun, et al. A planar electromagnetic actuator based on two layer coil assembly for micro applications. In: Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2014 IEEE/ASME International Conference on. IEEE, 2014. p. 174-179.**
5. **PELRINE, Ronald E., et al. Levitated micro-manipulator system. U.S. Patent No 8,593,016, 2013.**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. František Mach, Ph.D.**
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2016**
Termín odevzdání diplomové práce: **19. května 2017**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

ANOTACE A KLÍČOVÁ SLOVA

Předložená diplomová práce se zabývá elektromagnetickým systémem pro polohování magnetických těles. Systém sestává z miniaturních robotů tvořených permanentním magnetem a aktuátorem tvořeným soustavou planárních cívek. Toto téma je velmi aktuální a jeho rozvoj by mohl přinést značný pokrok, urychlení a hlavně miniaturizaci výrobních a zpracovatelských systémů.

Vlastní práce je rozdělena do pěti částí. První část práce je zaměřena na definici základních pojmů, motivaci práce a zhodnocení současného stavu poznání. Druhá část je zaměřena na samotný návrh aktuátoru a robota s využitím matematického modelování a simulací. Třetí část práce je zaměřena na stavbu experimentálních zařízení nazvaných MagSnail a MagStriver, na kterých bylo provedeno komplexní experimentální měření. Čtvrtá část práce se zabývá možným komerčním využitím těchto systémů a poslední část práce je zaměřena na shrnutí dosažených výsledků a nastínění směrů možného pokračování práce.

KLÍČOVÁ SLOVA

Polohování magnetických těles, miniaturní robot, aktuátor, permanentní magnet, simulace, Agros2D, microfactory

ANOTATION AND KEYWORDS

The submitted diploma thesis deals with the electromagnetic system for positioning of magnetic bodies. The system consists of miniature robots created by permanent magnets, and an actuator created by the system of planar coils. This topic is very contemporary and its development may bring considerable progress, accelerate, and mainly provide the further miniaturization of manufacturing and processing systems.

The thesis itself is divided into five parts. The first part of the thesis focuses on the definition of basic concepts, motivation of the work and evaluation of the current state of knowledge. The second part is focused on the design of the actuator and robot with the use of mathematics modeling and simulation. The third part deals with the construction of experimental devices called MagSnail and MagStriver on which the complex experimental measuring was conducted. The fourth part of the work is aimed at the possible commercial use of these systems and the last part is focused on the summary of achieved results and the outline of further directions for development.

KEYWORDS

Positioning of magnetic bodies, miniature robots, actuator, permanent magnet, simulation, Agros2D, microfactory

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych velmi rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Františku Machovi, Ph.D. za skvělé vedení, časté podněty a pomoc při jejím vypracování.

PROHLÁŠENÍ

Předkládám tímto k posouzení diplomovou práci, zpracovanou během mého studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, s použitím uvedené odborné literatury, a pramenů a že veškerý software, použitý při jejím řešení a zpracování, byl využit s respektováním všech jeho licenčních podmínek.

V Plzni, dne 18.5.2017

Jiří Kuthan

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

B	T	magnetická indukce
A	$\text{Wb} \cdot \text{m}^{-1}$	vektorový magnetický potenciál
J	$\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$	proudová hustota
μ	$\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$	permeabilita
γ	$\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$	elektrická vodivost
W_m	J	energie magnetického pole
v	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	rychlost
P	W	výkon
U	V	napětí
I	A	proud
F	N	síla
m	g	hmotnost
g	$\text{N} \cdot \text{kg}^{-1}$	gravitační konstanta
t	s	čas
s	m	dráha
NdFeB	-	Magnet ve složení neodym železo bor

OBSAH

i ÚVOD DO PROBLEMATIKY	2
I.1 DEFINICE ZÁKLADNÍCH POJMŮ	3
I.2 VYMEZENÍ ŘEŠENÉ OBLASTI	5
I.3 MOTIVACE PRÁCE	6
I.4 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ	8
I.4.1 Planární systém polohování	9
I.4.2 Třidimenzionální systém polohování	11
I.4.3 Ostatní systémy pohybu pomocí elektromagnetického pole	13
ii NÁVRH MIKROAKTUÁTORU	16
II.1 PROVEDENÍ CÍVEK	17
II.1.1 Obdélníkové provedení cívek	17
II.1.2 Kruhové provedení cívek	19
II.1.3 Rozložené provedení cívky	19
II.2 SIMULACE OBOU CÍVEK	21
II.2.1 Formulace modelů cívek	21
II.2.2 Výsledky simulací modelu	23
II.3 PROVEDENÍ MIKROROBOTŮ	27
II.3.1 Monomagnet	27
II.3.2 Vícemagnet	28
II.4 SIMULACE POHYBU ROBOTA	31
II.4.1 Formulace matematického modelu	32

Obsah

II.4.2 Výsledky simulace dynamiky	33
iii EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ	36
III.1MAGSNAIL	37
III.1.1Provedení a výroba	37
III.1.2Algoritmy řízení	38
III.1.3Ověření funkčnosti	39
III.1.4Spolupráce robotů	42
III.1.5Modifikace pro jeřáb	44
III.1.6Zhodnocení	46
III.2MAGSTRIVER	47
III.2.1Návrh a stavba	48
III.2.2Experimentální měření	50
III.2.3Zhodnocení	57
iv NÁVRH KOMERČNÍHO VYUŽITÍ	60
IV.1PLATFORMA MAGSTRIVER	61
IV.1.1Technické údaje platformy	61
IV.1.2Možné využití	63
v ZHODNOCENÍ A ZÁVĚR	65
V.1 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A SMĚRY POKRAČOVÁNÍ PRÁCE	66
V.1.1 Zhodnocení dosažených výsledků	66
V.1.2 Směry pokračování práce	67
vi PŘÍLOHA	74
VI.1MAGSNAIL	75
VI.1.1Zahřívání MagSnail	75
VI.2MAGSTRIVER	77

Obsah

VI.2.1 Zahřívání MagStriver	77
VI.2.2 Energetická náročnost	78

Část I

ÚVOD DO PROBLEMATIKY

i.1

DEFINICE ZÁKLADNÍCH POJMŮ

POJEM mikroaktuátor má historii svého vzniku v mikroinženýrství. Samotné mikroinženýrství se rozvíjelo za účelem vytvořit nepoužívanější senzory (tlaku a zrychlení) v jednotkách mikrometrů. Mikrosenzory jsou využívány ve velké škále součástek, jako jsou například gyroskopy a převodníky elektrických veličin na jiné než elektrické. Mikroaktuátor je označení pro člen, který vykonává přesně opačnou funkci k mikrosenzoru. Převádí vstupní energii, která je nejčastěji elektrická, na mechanickou. V současné době jsou vyráběny mikroakční členy jako mikropumpy, mikropřepínače, mikromotory nebo mikromanipulátory [1].

Robot je definován jako stroj, pracující s určitou mírou samostatnosti, vykonávající předem určené úkoly předepsaným způsobem. Miniaturní robot je zmenšenina robota jako takového. Tato diplomová práce využívá miniaturního robota jako manipulátoru, který se bude pohybovat ve dvou stupních volnosti [2].

Dalším základním pojmem práce je kolektivní robotika. Kolektivní robotika je založena na schopnosti skupiny najít větší množství, nebo kvalitnější řešení určitého problému, než mohou docílit jednotliví členové. Kolektivní robotika se velmi často inspiruje v přírodě, konkrétně u sociálního hmyzu, kde mezi nejznámější patří mravenci, termiti, včely a vosy [3].

DEFINICE ZÁKLADNÍCH POJMŮ

Pojem mikrofaktory lze jednoduše vysvětlit jako zmenšeninu továrny. Jedná se o velmi malý výrobní prostor, který je komplexně vybaven a dokáže tak zastoupit velké výrobní prostory. Mezi nesporné výhody patří šetření různých zdrojů, mezi které patří hlavně v dnešní době opomíjený prostor, dále energie, materiál a čas [4] [5]. Pro ukázkou níže zobrazená fotografie Borských polí v roce 2003 a 2017 viz obr. 1 [6].



Obr. 1: Letecká fotografie průmyslové zóny Borská pole: A) v roce 2003 B) v roce 2017 [6]

i.2

VYMEZENÍ ŘEŠENÉ OBLASTI

TÉMATEM práce je návrh polohovacího systému pro miniaturního robota. Samotný polohovací systém je tvořen mikroaktuátorem, který sestává z několika cívek. Ty jsou velmi podobné rovinným cívkám na plošných spojích. Miniaturní robot tvoří permanentní magnet nebo jejich spojení. Polohovány jsou pomocí elektromagnetického pole, které je generováno cívkami. Miniaturní roboti se pohybují se dvěma stupni volnosti. Práce se tedy zabývá kompletním technickým provedením polohovacího systému.

i.3

MOTIVACE PRÁCE

Hlavní motivací práce je vidina možnosti podstatného zmenšení výrobních prostor a díky tomu i záchrana životního prostředí pro nastávající generace. V dnešní době se všude okolo nás staví obrovské výrobní haly, které jsou naplněny velkými robotickými linkami. Právě tyto výrobní linky by mohly být rapidně zmenšeny a také urychleny díky elektromagnetickému systému pro polohování magnetických těles.

Polohování magnetických těles pomocí elektromagnetického pole má v současné době velmi silný potenciál, který může být použit v nejrůznějších úlohách. Díky miniaturizaci je možné využití například v armádních a vesmírných technologiích, lékařství, farmacii i průmyslu. Tělesa ovládaná elektromagnetickým polem se mohou pohybovat velmi rychle a zároveň přesně. Tato skutečnost se dá velmi dobře využít při komponentní výrobě. Nespornou výhodou je, že přístroje dokáží předčit lidskou zručnost a zvýšit produktivitu výroby. Velký potenciál využívání polohování magnetických těles je při pick-and-place výrobě, kde díky již zmíněným výhodám může dojít k podstatnému zmenšení, zrychlení a zefektivnění výroby [1] [5] [7].

Další motivací práce je možnost pracovat na větším projektu, do kterého jsou zapojeni další tři studenti. Celkové složení jednotlivých prací by mohlo vyústit

ve velmi ucelený systém, který by bylo možné použít jako microfactory. Jedná se o práce dvou studentů navazujícího studia a jednoho studenta bakalářského studia. Práce se zabývají úchopovými systémy a paralelním polohováním miniaturních robotů. Autorem diplomové práce zaměřené na úchopový systém využívající magnetické kapaliny je student Bc. Vojtěch Skřivan [8]. Autorem diplomové práce zkoumající paralelní polohování miniaturních robotů pomocí magnetického pole je student Bc. Tomáš Šašek [9]. Autorem bakalářské práce zabývající se úchopovým systémem využívajícím elektroadhezi je Jan Fessler [10].

i.4

SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

V současné době je jedním z hlavních směrů vývoje miniaturizace ve většině směrů techniky. Miniaturizace se v elektronice začala hojně rozvíjet v polovině 50. let minulého století se vznikem polovodičové elektroniky. Od té doby prodělala elektronika bouřlivý vývoj, a to hlavně za pomoci tranzistorů. Díky celému rozvoji se rozměry polovodičových struktur dostaly až na hranice kvantového světa. Jako přirovnání rychlosti vývoje elektroniky se dá využít srovnání s automobilovým průmyslem. Dnes by auta jezdila rychlostí až 16000 km/h se spotřebou 0,2 l/100 km a pořizovací cena by byla 3,6 Kč [1].

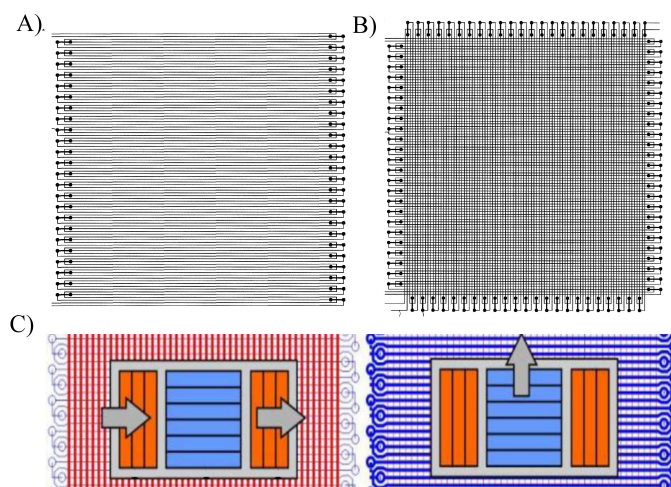
Miniaturizace zmenšila roboty na velikosti v řádu mikrometrů, což s sebou nese značná úskalí. Hlavním problémem je samotný pohyb respektive ovládání miniaturního robota, protože je jeho velikost neumožňuje nést žádné baterie, natož motory. Toto je jeden z hlavních důvodů proč je vhodné, využít aktuátorů k vytvoření externího magnetického pole, které poslouží k polohování robotů. Díky tomu nemusí robot nést veškeré příslušenství. [11].

i.4.1 PLANÁRNÍ SYSTÉM POLOHOVÁNÍ

I.4.1 PLANÁRNÍ SYSTÉM POLOHOVÁNÍ

Jedním z nejvíce prozkoumaných systémů pro polohování magnetických těles je planární systém polohování. Systém polohování je založen na vytvoření proměnlivého magnetického pole pomocí cívky, která je rovinná (viz. obr. 2 A). Díky složení více vrstev rovinných cívek je dosaženo druhého stupně volnosti (viz. obr. 2 B). Cívky mohou být tvořeny pomocí tištěných substrátů [12].

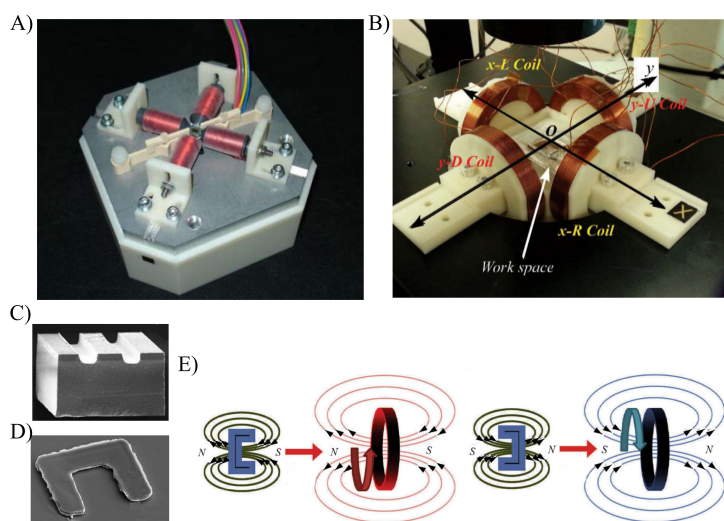
Výše uvedený systém je využíván v několika různých obdobích. Roboti mohou být tvořeny kombinací magnetů o různých tvarech a velikostech (viz. obr. 2 C) [7]. V uvedeném systému je možné docílit také levitace magnetických robotů, která je dosažena díky tenké vrstvě diamagnetického materiálu. Tloušťka diamagnetického materiálu je 0,5 mm [13]. Samotný pohyb robota je vyvolán rychlým spínáním jednotlivých cívek. Systém může být použit jako manipulátor v různých odvětvích, například při výrobě.



Obr. 2: Ilustrace planárních systémů polohování A) cívky sloužící k polohování ve směru x [12]; B) složení čtyř cívek sloužících k polohování x, y [12]; C) ukázka kombinace několika magnetů [7]

i.4.1 PLANÁRNÍ SYSTÉM POLOHOVÁNÍ

Další systém planárního polohování pomocí elektromagnetického pole využívá zcela jiný princip. Systém je pojmenován MagPier využívající kombinaci elektromagnetického pole a piezoelektrického jevu. Mikrorobot je polohován pomocí čtyř cívek, které jsou o 90° prostorově pootočený (viz. obr. 3 A). Díky spínání jednotlivých cívek je mikrorobot posouván. Dále je v tomto systému využíváno piezoelektrického jevu, který je vyvolán díky vysokonapěťové elektrodě, na kterou je připojeno vysoké napětí 300 V o frekvenci 100 Hz. Mikrorobot je tvořen feromagnetickým materiálem a piezoelektrickým materiálem (viz. obr. 3 C). Díky piezoelektrickému jevu mikrorobot poskakuje, silně ztrácí adhezi a klouže po podložce s téměř nulovým třením. MagPier systém vyhrál v roce 2011 sprint na vzdálnost 2 mm pořádanou během IEEE International Conference on robotics and Automation (ICEM 2011) [14].



Obr. 3: Systémy planárního polohování A) fotografie systému čtyř cívek MagPier [14]; B) prostorové rozložení cívek [15]; C) fotografie robota použitého v systému MagPier [14]; D) fotografie C-robotu [15]; E) ukázka možné orientace robota tvaru C [15]

I.4.2 TŘÍDIMENZIONÁLNÍ SYSTÉM POLOHOVÁNÍ

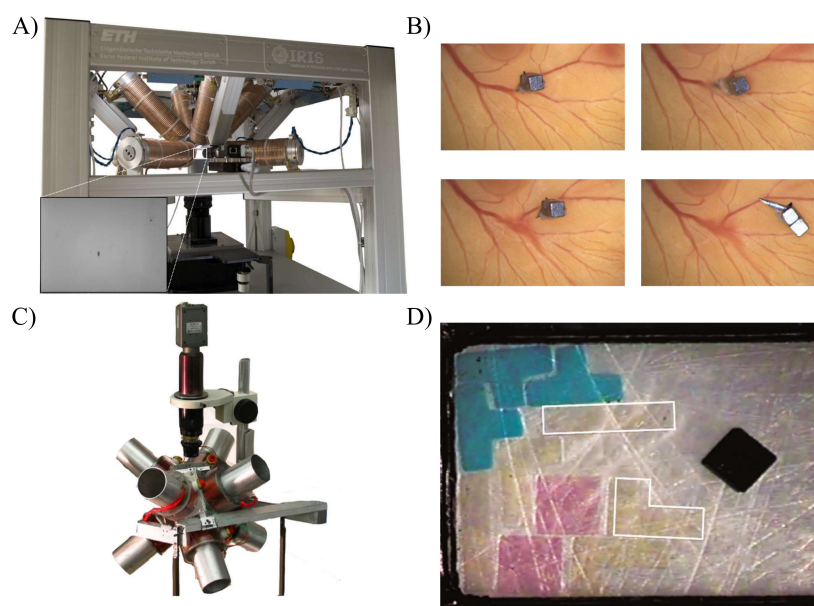
Poslední zmíněný systém planárního polohování využívá k polohování mikrorobotů také kombinaci čtyř cívek (viz. obr. 3 B). Cívky jsou o 90° vzájemně pootočený. Díky možnosti spínání společně dvou cívek je možno polohovat s robotem ve směrech po 45°. Hlavní rozdíl tohoto systému je samotný robot. Robot je vytvořen ve tvaru C (viz. obr. 3 C) a sestává z několika vrstev, kde majoritní podíl má sklo z důvodu nízkého tření po podložce. Další důležitou složkou robota je vrstva z niklu. Nikl může být u každého robota v jiné tloušťce a tím pádem může být s každým robotem pohybováno jinak. Díky tvaru robota do písmene C je možné pomocí postupného spínání cívek a otáčení polarity spínaných cívek dojít k otáčení robota kolem své osy (viz. obr. 3 E) [15].

I.4.2 TŘÍDIMENZIONÁLNÍ SYSTÉM POLOHOVÁNÍ

Systém OctoMag je jiný systém polohování těles pomocí magnetického pole. OctoMag využívá cívky k bezdrátovému řízení mikrorobota určeného pro oční chirurgii. Polohovací systém tvořící magnetické pole sestává z osmi cívek s feromagnetickým jádrem (viz. obr. 4 A). Tento systém je schopen generovat magnetické pole ve třech směrech a je omezen do jedné polokoule, a to z důvodu snadného přístupu lékaře a pacienta. I přes tuto nevýhodu dokáže systém izotopicky vytvořit síly 1-40 μN . Tyto vlastnosti jsou docíleny díky použitím měkkých magnetických jader cívek, které zvyšují až dvacetinásobně sílu magnetického pole oproti cívkám se vzduchovým jádrem. Využití cívek s měkkým magnetickým jádrem bohužel značně komplikuje interakci mezi cívkami. Systém dokáže pracovat s pěti stupni volnosti. Pracovní prostor OctoMagu je omezen na velikost 4 cm^3 , což je dostatečné k operacím očí. Robot je tvořen permanentním magnetem na němž je připevněn skalpel (viz. obr. 4 B) [11] [16].

i.4.2 TŘÍDIMENZIONÁLNÍ SYSTÉM POLOHOVÁNÍ

Velice podobný systém polohování jako OctoMag je složen z osmi cívek, které jsou oproti sobě prostorově posunuty. Na rozdíl od systému OctoMag ovšem cívky obklopují celý pracovní prostor (viz. obr. 4 C). Tento systém využívá jako robota permanentní magnety, konkrétně NdFeB magnety (viz. obr. 4 D). Robot má rozměry $750 \mu\text{m} \times 750 \mu\text{m} \times 225 \mu\text{m}$. Hlavní uplatnění tohoto systému je v oblasti skládání hydrogelů. Systém se pokouší nahradit biotisk, díky kterému byla vytvořena například mikrobaterie [17].



Obr. 4: Systémy třídimenzionálního polohování A) systém OctoMag [16]; B) robot v podobě skalpelu připevněném na permanentním magnetu systému OctoMag [16]; C) polohovací systém tvořený osmi cívkami [17]; D) fotografie robota používaného systémem osmi cívek [17]

Další z možností polohování magnetických mikrorobotů je založena na proměnlivém magnetickém poli, které je tvořeno několika permanentními magnety připevněných na motory (viz. obr. 5 B). Motorů s permanentním magnetem je využíváno osm (viz. obr. 5 A). Systém dokáže vytvořit jakoukoliv hodnotu mag-

I.4.3 OSTATNÍ SYSTÉMY POHYBU POMOCÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE

netické indukce nebo jejího gradientu včetně hodnoty nula. Výhodou využití permanentních magnetů k vytvoření magnetického pole je, že nedochází k žádnému zahřívání. Magnet, kterým chceme pohybovat je vložen do vysoce viskózní kapaliny. Jeho pohyb tedy není omezen pouze na planární úlohu. Lze s ním pohybovat se třemi stupni volnosti. Vyzkoušený koncept založený na tomto principu polohování dokáže pracovat s průměrnou přesností posunu $39 \mu\text{m}$. Tento systém polohování má velmi široké možnosti uplatnění hlavně v medicíně, kdy se magnet bez větších problémů zvládne pohybovat v proudu krve. Výhodou je i jeho velikost oproti systému s cívkami [18] [19].

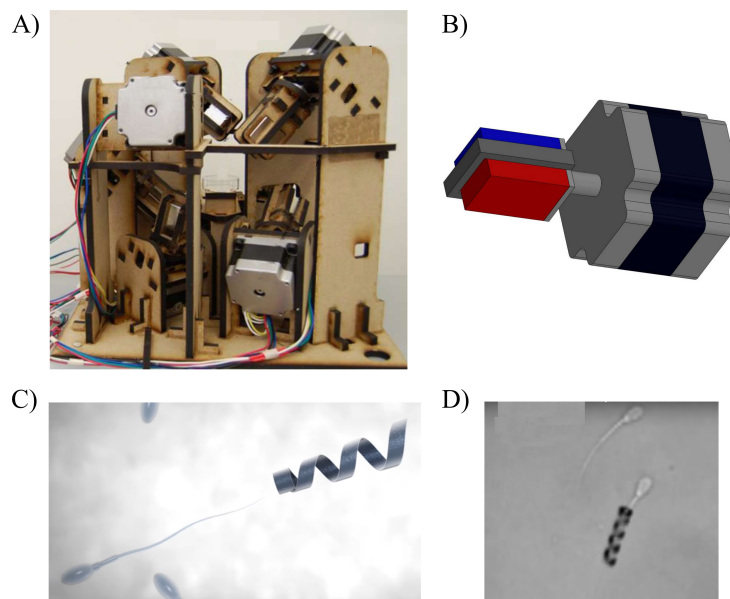
Mezi další polohovací systém využívající magnetické pole patří Spermobot. Spermobot má tvar spirály, který se pomocí rotačního magnetického pole otáčí kolem své osy a pohybuje se směrem vpřed. Spermobot slouží jako pohon pro spermie, které nejsou schopny samostatného pohybu (viz. obr. 5 C). Velikost spermobotu je $60 \mu\text{m}$ a díky své velikosti dokáže nabrat spermii a dovézt jí kam je potřeba. Spermobot byl již testován v Petriho misce. Tento vývoj znamená velký průlom nejen v oblasti reprodukce [20] [21].

I.4.3 OSTATNÍ SYSTÉMY POHYBU POMOCÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE

Předposlední systém, využívající magnetické pole k pohybu by mohl být průlomový v celé problematice. Samotný průlom systému spočívá v myšlence pohybovat několika roboty nezávisle na sobě. Všechny systémy popisované v předchozích kapitolách jsou schopné pohybovat buď jedním robotem, nebo několika roboty, které se musí pohybovat stejně nebo velice podobně. Důvodem je homogenní magnetické pole tvořené k jejich pohybu.

Robot je vložen do středu cívek (viz. obr. 6 A). Tento systém využívá magnetické pole tak, že díky složení tří párů cívek pootočených ve třech osách (viz.

i.4.3 OSTATNÍ SYSTÉMY POHYBU POMOCÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE

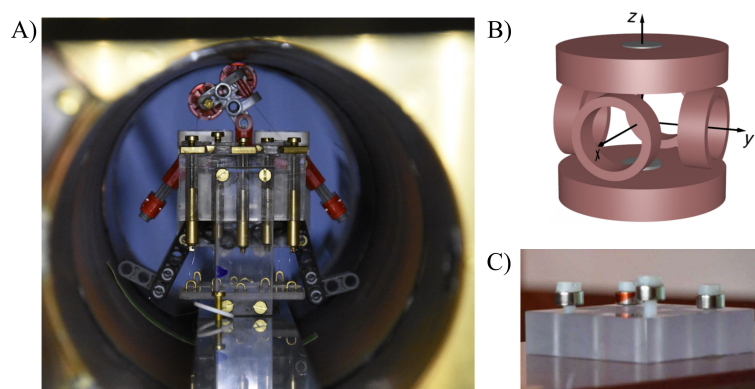


Obr. 5: Systémy třídízenzionálního polohování A) soustava permanentních magnetů tvořící pohybový systém [19]; B) permanentní magnet upevněný na motor [19]; C) grafické znázornění Spermibota [20]; D) fotografie Spermibota při experimentu [20]

obr. 6 B) je možné vytvořit v určitém bodě prostoru nulové magnetické pole. Toho nelze využít k pohybu, ale naopak k uzamčení robotů mimo tento prostor. Přidáním slabého točivého pole do systému je tak možné pohybovat předměty pouze v oblasti s nulovým magnetickým polem.

Při experimentálním ověření principu byly využity šrouby (viz. obr. 6 C). Šrouby byly utahovány nebo povolovány pomocí externího točivého magnetického pole. Kombinací externího magnetického pole a točivého magnetického pole je možné docílit právě takové magnetické síly, která bude otáčet právě jedním šroubem. Při experimentu bylo docíleno možnosti otáčet šrouby vzdálené od sebe pouze 3 mm [22].

i.4.3 OSTATNÍ SYSTÉMY POHYBU POMOCÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE



Obr. 6: Systém paralelního polohování A) fotografie robota z experimentu [22]; B) prostorové rozložení cívek [22]; C) fotografie plastových šroubů s permanentními magnety [22]

Poslední zmíněný systém je založen také na úplně odlišném principu polohování než všechny předchozí. Systém se nezabývá polohováním jako takovým, ale možností pohybu jednotlivých částí oproti sobě. Celý systém je složen z šesti cívek, kde jsou položeny dvě horizontálně a čtyři vertikálně. Horizontální cívky slouží ke globálnímu pohybu a vertikální k lokální koordinaci mikrorobotů. Vertikální cívky jsou dvě, protože vnější dvě cívky mají velikou indukci a jsou sepnuty nebo vypnuty. Zatím co vnitřní dvě cívky mají menší indukci a slouží jako pulzační. Celá myšlenka je založena na vzájemné interakci mikrorobotů o velikosti $750 \mu\text{m}$, které jsou tvořeny z různých materiálů. Vybrané materiály jsou Fe, alnico a NdFeB. Tyto materiály jsou použity z důvodu extrémně odlišné koercitivní síly, která je důležitým faktorem při přemagnetování materiálu. Díky této kombinaci materiálů a cívek dokáže systém vzájemně pohybovat mikroroboty [23].

Ostatní metody polohování mikrorobotů jsou v dnešní době zkoumány. Jedná se například o akustické [24], optické [25], chemické [26], biologické [27] a v neposlední řadě elektrické [28].

Část II

NÁVRH MIKROAKTUÁTORU

ii.1

PROVEDENÍ CÍVEK

TATO část práce se zabývá různým způsobem provedení zapojení cívek. Kapitola je rozdělena na dvě podkapitoly, které popisují odlišné provedení cívek. Již při návrhu bylo zjištěno mnoho úskalí, a proto musel být velmi často celý změněn. V první podkapitole je zkoumáno obdélníkové provedení. Druhá podkapitola se věnuje kruhovému, či spirálovému provedení. První myšlenka byla vytvořit polohovací desku s velkým množstvím malých cívek, které by byly rychle po sobě spínány. Tato myšlenka musela být ale opuštěna z důvodu potřeby velkého množství spínacích prvků.

II.1.1 OBDÉLNÍKOVÉ PROVEDENÍ CÍVEK

U obdélníkového provedení se měnilo několik parametrů, a to způsob zapojení, počet závitů, velikost jednotlivých vodičů a velikost izolační vzdálenosti mezi vodiči. Způsob zapojení (viz obr. 7) je rozdělen na antisymetrický¹ a symetrický², tyto způsoby zapojení respektují směr proudu. Jako výchozí model návrhu byla zvolena cívka s antisymetrickým způsobem zapojení, šířka vodičů 0,3 mm o izo-

¹ V obr. 7 je antisymetrický způsob zapojení nastíněn vlevo.

² V obr. 7 je symetrický způsob zapojení nastíněn vpravo.

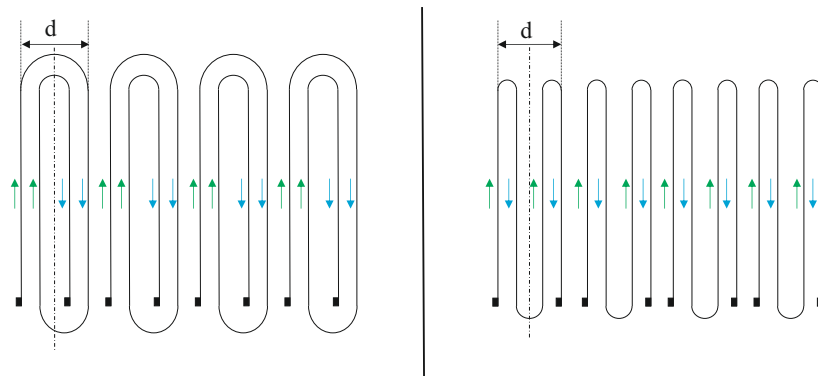
ii.1.1 OBDÉLNÍKOVÉ PROVEDENÍ CÍVEK

lační vzdálenosti 5,5 mm a počtem závitů 2. Následně byly rozměry a počty závitů měněny, jak je vidno z tab. 1. V tabulce je také uveden symetrický způsob zapojení.

Tab. 1: Tabulka s parametry simulovaných obdélníkových cívek

cívka	zapojení	závity	vodič (mm)	izolační mezera (mm)	vzdálenost od středu (mm)
a	antisymetrické	2	0,3	0,55	0,275
b	symetrické	2	0,3	0,55	0,275
c	antisymetrické	2	0,3	0,55	0,5
d	symetrické	2	0,3	0,55	0,5
e	antisymetrické	1	0,3	-	0,275
f	antisymetrické	3	0,2	0,275	0,275

Jak již bylo zmíněno v kapitole ii.1, z důvodu velikého množství spínacích prvků bylo nutné tento směr návrhu opustit.



Obr. 7: Grafické zobrazení obdélníkových cívek, vlevo antisymetrické a vpravo symetrické zapojení

ii.1.2 KRUHOVÉ PŘÍKONENÍ CÍVEK

II.1.2 KRUHOVÉ PŘÍKONENÍ CÍVEK

Další posuzovaný způsob provedení cívek je kruhový. Způsob zapojení cívek byl rozdělen na antisymetrický³ a symetrický⁴. Při návrhu symetrického či antisymetrického zapojení cívek se postupovalo stejnými kroky, jako při návrhu obdélkových cívek. Postupně se měnily parametry cívek a jejich zapojení viz tab. 2. Tento systém polohování by bohužel při stejné velikosti pracovního pole, jako u obdélkového provedení znamenal ještě větší náročnost na systém spínacích prvků.

Tab. 2: Tabulka s parametry simulovaných kruhových cívek

cívka	zapojení	závity	vodič (mm)	izolační mezera (mm)	vzdálenost od středu (mm)
a	antisymetrické	2	0,3	0,55	0,275
b	symetrické	2	0,3	0,55	0,275
c	antisymetrické	2	0,3	0,55	0,5
d	symetrické	2	0,3	0,55	0,5
e	antisymetrické	1	0,3	-	0,275
f	antisymetrické	3	0,2	0,275	0,275

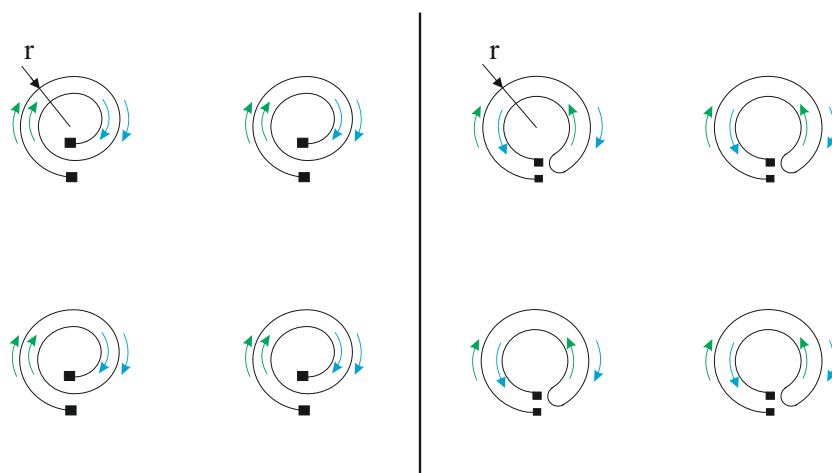
II.1.3 ROZLOŽENÉ PŘÍKONENÍ CÍVKY

K poslednímu návrhu polohovacího systému vedla dlouhá cesta simulací a zvažování obtížnosti spínání. Hlavním kritériem se nakonec stala náročnost spínání jednotlivých cívek, která byla finálním systémem cívek značně zjednodušena nejprve na osm spínacích prvků a poté dokonce pouze na čtyři spínací prvky. Finální

³ V obr. 8 je antisymetrický způsob zapojení nastíněn na obrázku vlevo.

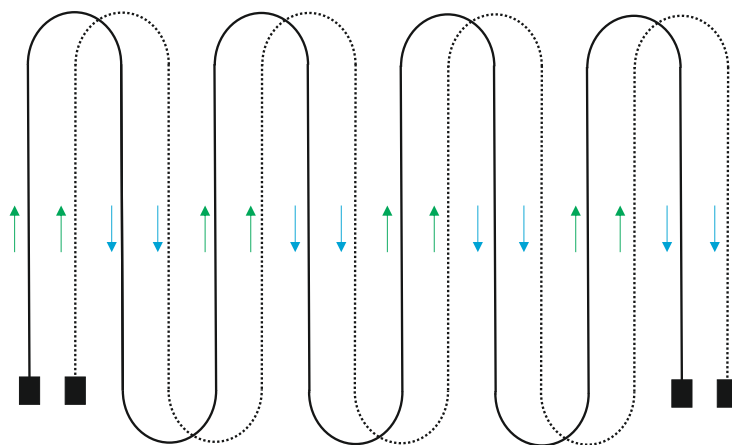
⁴ V obr. 8 je symetrický způsob zapojení nastíněn na obrázku vlevo.

ii.1.3 ROZLOŽENÉ PŘEVODNÍKOVÉ CÍVKY



Obr. 8: Grafické zobrazení kruhových cívek

návrh sestává ze dvou cívek, které jsou vzájemně prostorově posunuty. Díky spínání, které musí obracet i polaritu jednotlivých vodičů, je možné vytvořit takové magnetické pole, které rozpohybuje permanentní magnety požadovaným směrem. Návrh cívek je znázorněn na obr. 9.



Obr. 9: Grafické zobrazení rozloženého provedení cívek

ii.2

SIMULACE OBOU CÍVEK

SIMULACE byla provedena za účelem zjištění optimální geometrie cívky a jejího zapojení. Simulovány byly návrhy cívek uváděné v kapitole ii.1 a byly provedeny v programu Agros2D. Pomocí simulace byly zjišťovány především hodnoty magnetické indukce, a to ve vzdálenosti 0,2 mm od horní hrany cívky.

II.2.1 FORMULACE MODELŮ CÍVEK

Simulace cívek byla řešena pomocí matematického modelu, který lze popsat partiální diferenciální rovnicí. Ta určuje rozložení magnetického pole a lze ji napsat ve tvaru

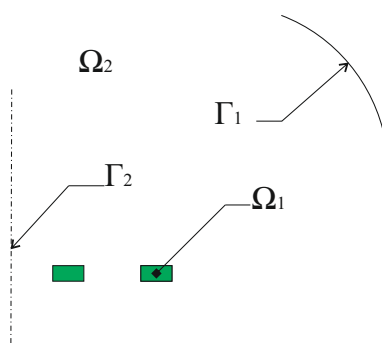
$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \cdot (\operatorname{rot} \mathbf{A} - \mathbf{B}_r) \right) - \gamma \mathbf{v} \times \operatorname{rot} \mathbf{A} + \gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = \mathbf{J}_{\text{ext}}, \quad (1)$$

kde μ značí permeabilitu, \mathbf{A} je magnetický vektorový potenciál, \mathbf{B}_r remanentní indukce, γ elektrická vodivost, \mathbf{v} je rychlost a \mathbf{J}_{ext} je externí proudová hustota. Vzhledem k nízké rychlosti i časové změně \mathbf{A} je druhý a třetí člen rovnice za-

nedbán. Cívky byly modelovány bez permanentního magnetu, $\mathbf{B}_r = 0$, proto lze rovnici přepsat do tvaru

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \cdot \operatorname{rot} \mathbf{A} \right) = \mathbf{J}_{\text{ext}} . \quad (2)$$

Dále je nutné určit definiční oblast modelu, která je znázorněna v obr.10. Definiční oblast sestává z jednotlivých vodičů cívky Ω_1 a vzduchu Ω_2 . Vzduch je ohraničen fiktivní hranicí Γ_1 a osou symetrie Γ_2 , kde pro obě hranice platí Dirichletova okrajová podmínka $\mathbf{A} = \mathbf{0}$. Modely kruhových a obdélníkových cívek se liší pouze v systému souřadnic. Pro obdélníkové cívky je použit kartézský systém souřadnic s nulovým magnetickým potenciálem na ose symetrie a pro kruhové cívky osově symetrický systém souřadnic, kde jsou opět na hranicích modelu použity Dirichletovy okrajové podmínky $\mathbf{A} = \mathbf{0}$.



Obr. 10: Definiční oblast modelu magnetického pole

Pro konvergenci vzdálenosti fiktivní okrajové podmínky byla zvolena cívka s největším počtem závitů z důvodu největší prostorové náročnosti. Konvergence byla provedena na vzájemné závislosti poloměru okrajové podmínky a velikosti energie W_m . Jako dostatečná vzdálenost okrajové podmínky byla zvolena vzdálenost 4,56 mm. Dalším postupem konvergence bylo zvolení dostatečného zjemnění sítě a řádu polynomu. Výsledky konvergence jsou zobrazeny v tab. 3. Jako

ii.2.2 VÝSLEDKY SIMULACÍ MODELU

dostatečné bylo zvoleno zjemnění sítě 2 a řád polynomu 3. Konvergence výsledků simulace byla provedena pro domácí počítač ASUS s procesorem Intel Core i5-3230M o frekvenci 2,6 GHz a o velikosti paměti 16 GB s nainstalovaným operačním systémem Windows 10 64 bit.

Tab. 3: Konvergence řešení modelu

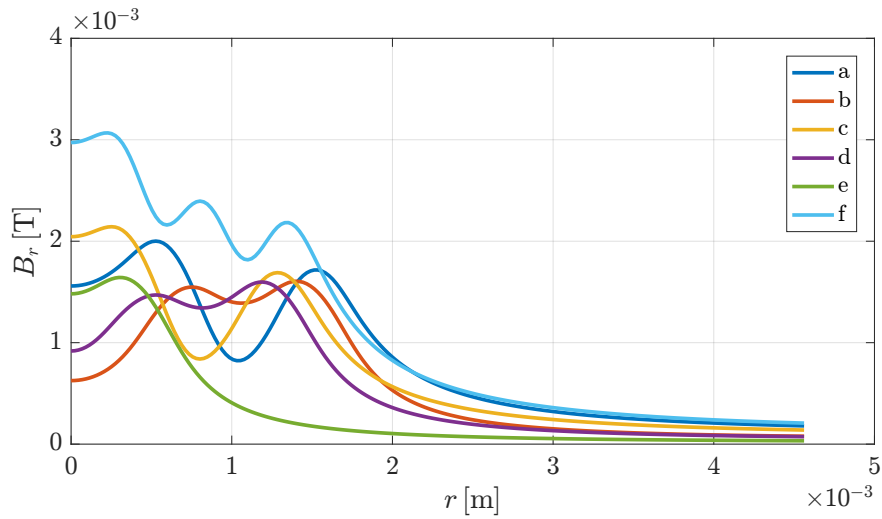
zjemnění sítě	řád polynomu	W_m (J)	zjemnění sítě	řád polynomu	W_m (J)
0	1	1,694e-6	1	1	1,797e-6
1	2	1,838e-6	1	3	1,838e-6
1	4	1,827e-6	2	1	1,838e-6
2	2	1,838e-6	2	3	1,835e-6
2	4	1,838e-6	3	1	1,838e-6
3	2	1,838e-6	3	3	1,838e-6
3	4	1,838e-6			

II.2.2 VÝSLEDKY SIMULACÍ MODELU

Pro simulaci byly zvoleny materiálové konstanty pro vzduch, měď $\mu_r = 1$ a proud pro cívku byl $I = 2$ A. Z důvodu adekvátnosti simulace na již vzniklé platformě MagSnail viz kapitola iii.1. Simulace byly prováděny z důvodu zjištění rozložení magnetické indukce v okolí cívek. Magnetická indukce byla měřena ve vzdálenosti 0,2 mm od horní hrany cívky, pro respektování tloušťky desky u platformy MagSnail viz kapitola iii.1. Simulace všech druhů zapojení a rozměrů jsou zobrazeny v grafech obr. 11 a obr. 12. Z grafů je patrné, že nejlépe ze všech simulací vycházejí cívky se třemi závity, tedy cívka f, a to jak u obdélníkového, tak i kruhového provedení. Výsledky ovšem vycházely v řádech mT u všech provedení cívek. Dále díky složitosti mechanického zpracování (kontaktování) jednotlivých cívek

ii.2.2 VÝSLEDKY SIMULACÍ MODELU

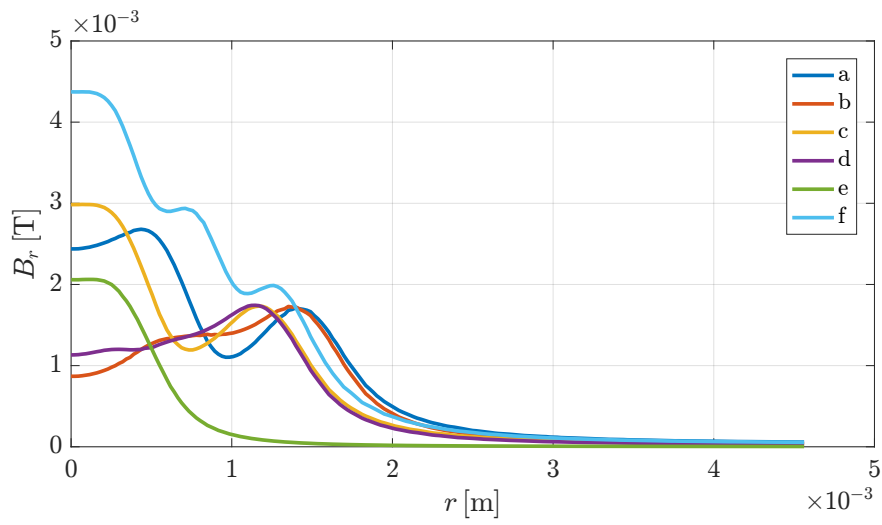
a velmi složitého spínacího systému byly kruhové i obdélníkové cívky zamítnuty. Systém spínání bude detailněji popsán v podkapitole iii.1.2.



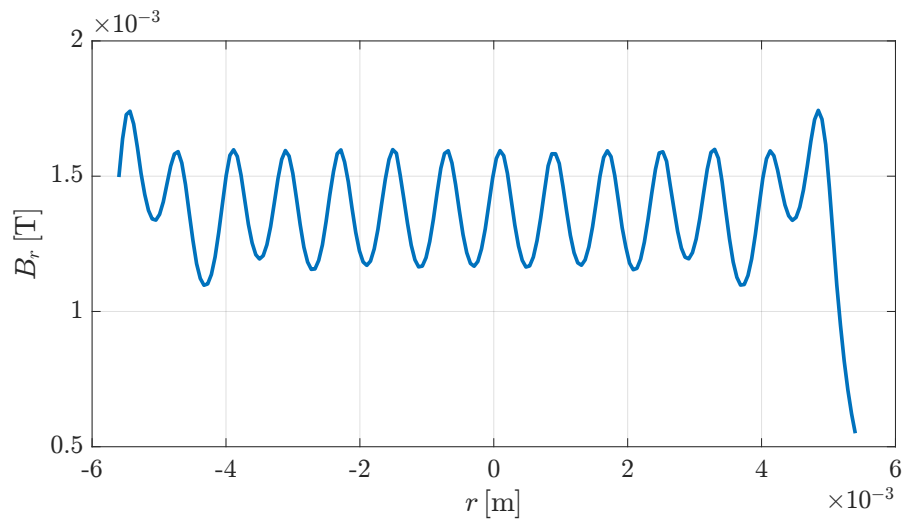
Obr. 11: Rozložení magnetické indukce: obdélníkové zapojení (parametry jsou zmíněny v tab. 1)

Simulace rozloženého provedení cívky byla provedena totožně jako simulace obdélníkových, či kruhových cívek. Výsledky simulace jsou zobrazeny v grafu obr. 13, ze kterého je patrné zvětšení magnetické indukce na okrajích cívky.

ii.2.2 VÝSLEDKY SIMULACÍ MODELU

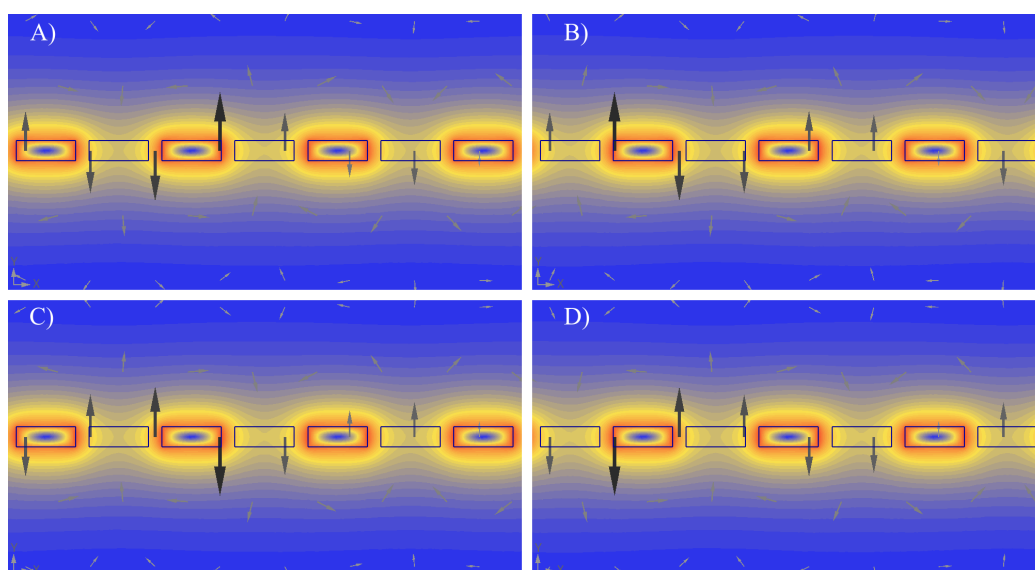


Obr. 12: Rozložení magnetické indukce: kruhové zapojení (parametry jsou zmíněny v tab. 2)



Obr. 13: Rozložení magnetické indukce rozloženého provedení

ii.2.2 VÝSLEDKY SIMULACÍ MODELU



Obr. 14: Zobrazení magnetické indukce v simulaci u rozloženého provedení, posloupnost spínání a polarita proudů je blíže vysvětlena v podkapitole iii.1.2

ii.3

PROVEDENÍ MIKROROBOTŮ

JAKO robot byl zvolen permanentní magnet, a to konkrétně ze slitiny neodym železo bor. První robot, který byl zkušěn na platformě MagSnail, byl kruhového tvaru o průměru 3 mm a výšce 2 mm (viz kapitola iii.1).

II.3.1 MONOMAGNET

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, první robot byl tvořen pouze jedním magnetem a sloužil jen k ověření funkčnosti. Dále byly magnety simulovány v programu Agros2D, kde byly zjištěny hodnoty magnetické indukce v okolí magnetu. U čtyř magnetů byla hodnota třikrát experimentálně změřena. Simulace a experimentální měření vyšlo se shodou. Experimentálně byly hodnoty zprůměrovány u magnetu 3 x 2 mm na 0,292 T a u magnetu 3 x 1 mm byly hodnoty 0,378 T. Ze simulace vyšly hodnoty pro magnet 3 x 2 mm 0,317 T a pro magnet 3 x 1 mm 0,266 T. Ze simulované indukce byla následně počítána síla, která vzájemně působí na magnety. Tato síla byla počítána z důvodu možného vzájemného

ii.3.2 VÍCEMAGNET

ovlivňování magnetů. Výpočet byl proveden pro dvě velikosti magnetů, a to pro 3 x 1 mm a 3 x 2 mm. Pro výpočet vzájemné síly byl použit vzorec

$$F(x) = \frac{\pi \cdot \mu_0}{4} \cdot M^2 \cdot R^4 \left(\frac{1}{x^2} + \frac{1}{(x+2h)^2} - \frac{2}{(x+h)^2} \right), \quad (3)$$

kde μ_0 značí permeabilitu vakua, M je magnetizace, R je poloměr magnetu, x je vzájemná vzdálenost magnetů a h je výška magnetu.

Magnetizace M se vypočítá pomocí vzorce

$$M = \frac{2 \cdot B_0}{\mu_0}, \quad (4)$$

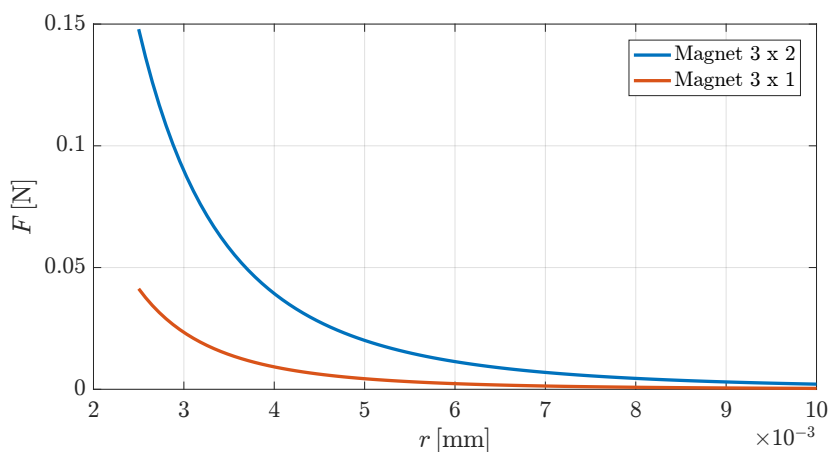
kde μ_0 je permeabilita vakua a B_0 je magnetická indukce.

Výsledky výpočtu závislosti síly na vzdálenosti magnetů jsou vyobrazeny v grafu (viz. obr. 15). Z průběhu je patrné, že síla působící mezi dvěma magnety rapidně vzrůstá v závislosti na vzájemné vzdálenosti. Porovnáním dvou vypočtených variant je dále patrné, že při zvětšení magnetu se vzájemná síla zvýší mnohonásobně. Z tohoto důvodu je nevhodné využívat větším magnetů při požadavku zvětšení síly mezi robotem a aktuátorem.

II.3.2 VÍCEMAGNET

Z důvodu lepšího upevnění různých úchytů na magnety bylo potřeba robota stabilizovat. Využití větších magnetů bylo zamítnuto vzhledem ke zvýšení třecí síly a většího vzájemného ovlivňování magnetů. Proto bylo rozhodnuto, že zvýšení stability bude nejlepší docílit spojením několika magnetů dohromady. Spojení magnetů bylo provedeno pomocí vytištěného robota na 3D tiskárně do kterého byly následně vlepeny permanentní magnety. Návrh robotů pro čtyři a devět magnetů lze vidět na obr. 16. Hlavním kritériem pro výrobu robota byla rozteč

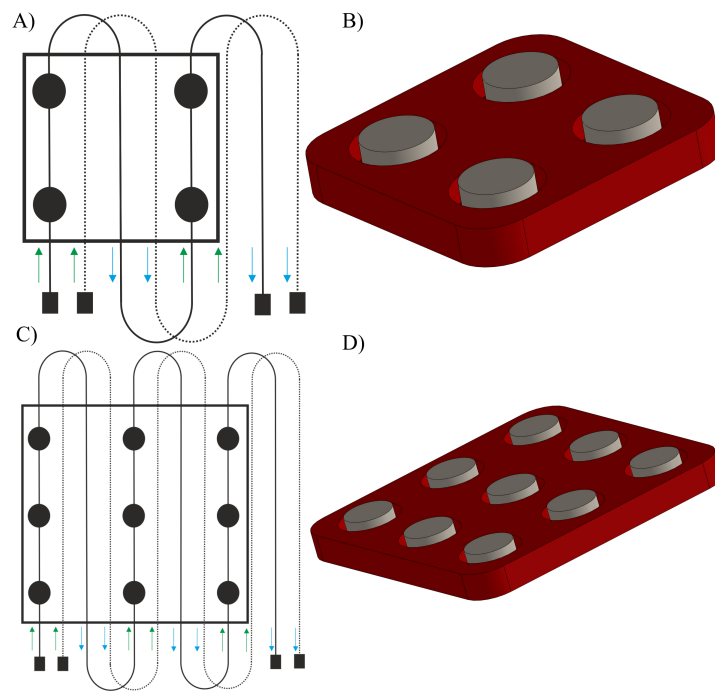
ii.3.2 VÍCEMAGNET



Obr. 15: Graf síly působící mezi dvěma magnety v závislosti na jejich vzájemné vzdálenosti

mezi vodiči cívky. Z důvodu dodržení umístění magnetu nad vodičem se stejnou orientací proudu musela být rozteč u robota ze čtyř magnetů přesně přes pět vodičů cívky viz obr. 16 A) a u robota vyrobeného z devíti magnetů přes devět vodičů cívky viz obr. 16 C). Na robota lze tak následně umísťovat různé úchopové systémy, kterými se zabývají práce studentů Bc. Vojtěcha Skřivana a Jana Fessla [8] [10]. Výsledná kombinace robota a magnetické kapaliny je vyobrazena na obr. 21.

ii.3.2 VÍCEMAGNET



Obr. 16: A) vzdálenost mezi magnety u provedení čtyř magnetů, B) návrh robota se čtyřmi magnety, C) vzdálenost mezi magnety u provedení devíti magnetů, D) návrh robota s devíti magnety

ii.4

SIMULACE POHYBU ROBOTA

SIMULACE robota byla provedena pro lepší analýzu pohybu. Pomocí simulace byla přibližně zjištěna síla a její průběh působící na robota. Jako vstupní data pro simulaci byly využity naměřené hodnoty z platformy MagSnail, která bude detailněji popsána v následující části práce viz kapitola iii.1.

Vstupní data byla získána pomocí vysokorychlostní kamery Basler acA2000-340km, která detailně snímala pohyb robota. Kamera byla nastavena na rychlost snímání 250 snímků za sekundu. Díky detailnímu snímání pohybu se zápisy času bylo možné získat celkový čas a trajektorii pohybu robota. Obraz z kamery je zobrazen v obr. 20.

Samotná simulace byla provedena v programu Matlab, kde byla pro výpočet využita Eulerova metoda.

II.4.1 FORMULACE MATEMATICKÉHO MODELU

Matematický model byl modelován jako jednodimenzionální úloha a vychází z pohybové rovnice, kterou můžeme napsat ve tvaru

$$m \frac{d^2s}{dt^2} = F, \quad (5)$$

kde m je hmotnost, s je dráha, t je čas a F je síla. Díky možnosti redukce řádu rovnice je možné rovnici přepsat pomocí dvou rovnic prvního řádu, a to

$$m \frac{dv}{dt} = F, \quad v = \frac{ds}{dt}, \quad (6)$$

kde v je rychlost.

Výsledná síla potřebná k posunutí robota byla vypočítána jako vektorový součet třecí síly a síly vyvolané pomocí magnetického pole, tedy

$$F = F_{mx} + F_{my} + F_t, \quad (7)$$

kde vektorové složení sil F_{mx} a F_{my} je síla vyvolaná magnetickým polem cívky a F_t je třecí síla. Třecí síla může nabývat záporných hodnot a působit tak proti síle magnetického pole. Třecí síla byla vypočítána pomocí vztahu

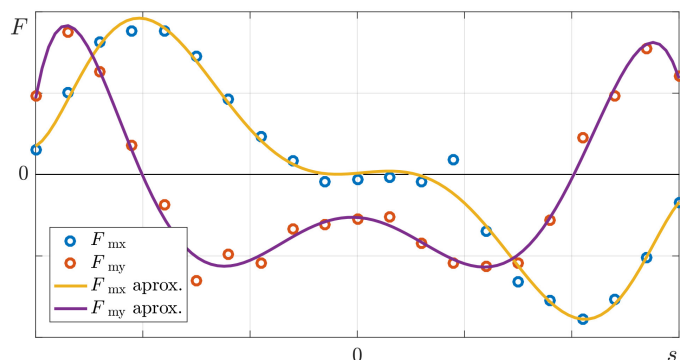
$$F_t = k \cdot m \cdot g, \quad (8)$$

kde k je koeficient smykového tření a g je gravitační konstanta.

Z důvodu závislosti velikosti a směru sil na poloze robota bylo nutné rovnice upravit. Robot je vodičem odpuzován. Průběhy sil byly zjištěny pomocí simulace magnetického pole a magnetu. Výsledky byly proloženy polynomem sedmého řádu a jsou zobrazeny na obr. 17. Z obrázku je patrné, že síly působící na mag-

ii.4.2 VÝSLEDKY SIMULACE DYNAMIKY

net jsou nelineární. Třecí síla je ovlivněna nadlehčením a následným přitažením robota. Průběhy sil byly z důvodu zjednodušení linearizovány viz obr. 18.



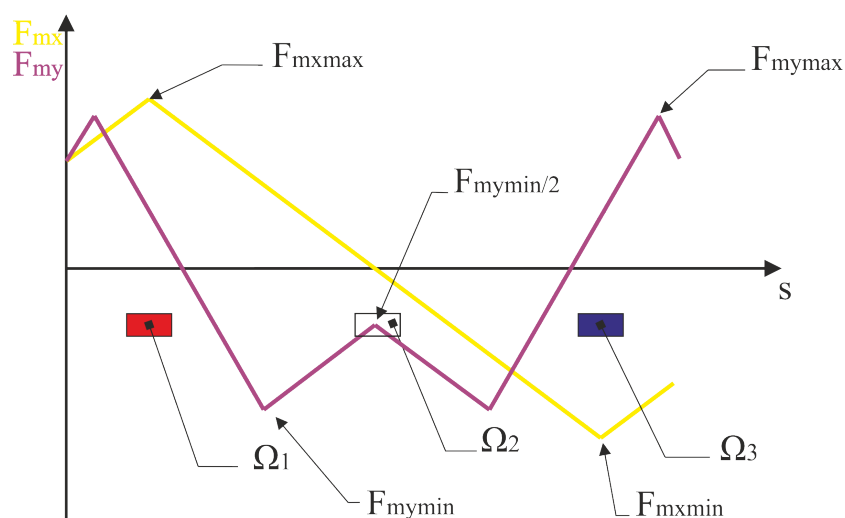
Obr. 17: Simulace sil působících na robota. F_{mx} je síla působící v ose x (způsobuje pohyb robota), F_{my} síla působící na robota v ose y (ovlivňuje tření). Zkratka aprox. znamená aproximování výsledků sedmým stupněm.

II.4.2 VÝSLEDKY SIMULACE DYNAMIKY

Výsledky simulace jsou vyobrazeny v grafu na obr. 19. V grafu jsou znázorněny polohy robota v závislosti na čase bodově a simulace modře. Experimentální měření bylo zpracováno pomocí algoritmu, který umožňuje detekovat pohyb objektů na fotografiích pořízených vysokorychlostní kamerou. Algoritmus nejprve provede konvoluci maskou Prewittové, poté postupně od sebe graficky odečítá dvě po sobě jdoucí fotografie. Tímto odečtením získá hrany, které následně použije k určení polohy a posunu robota. Detailněji popsána analýza pohybu objektů je v semestrální práci studenta Bc. Tomáše Bauera [29].

Výsledky experimentu, které byly zpracovány v semestrální práci vykazují značnou shodu s provedenou simulací. Při simulaci byly použity tyto velikosti

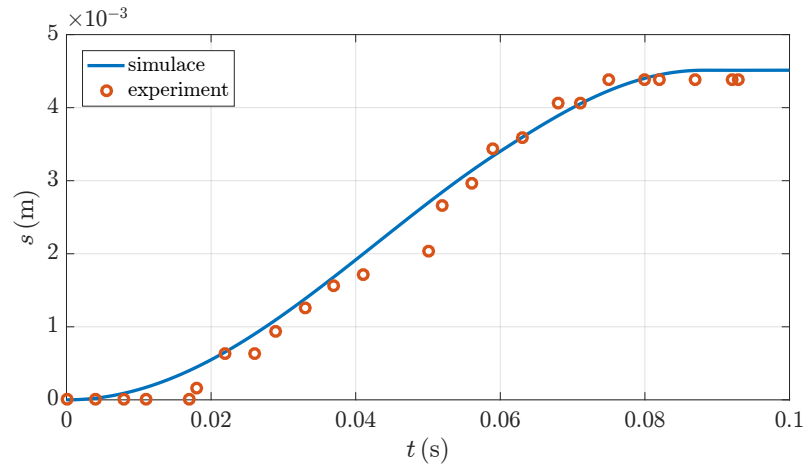
ii.4.2 VÝSLEDKY SIMULACE DYNAMIKY



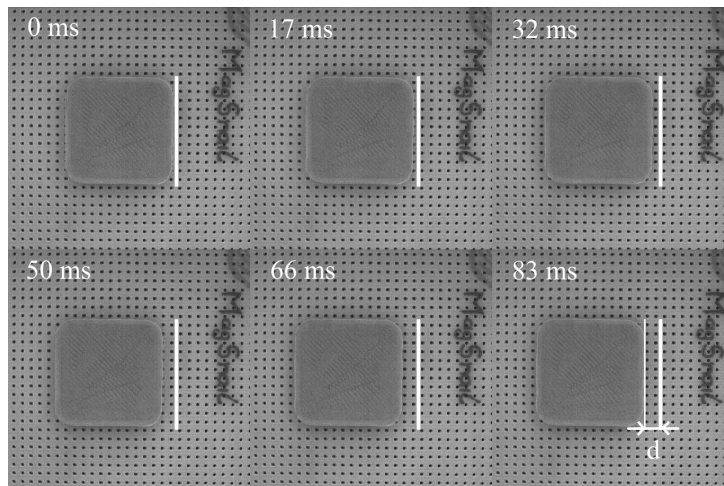
Obr. 18: Průběhy sil působících na robota, kde Ω_1 je kladně napájený vodič, Ω_2 je vodič bez napájení, Ω_3 je záporně napájený vodič, F_{mx} je x . složka síly působící pohyb robota, F_{my} je třecí síla respektující nadzvedávání a přitlačování robota magnetickým polem cívek, F_{mxmax} je maximální hodnota síly působící na magnet od cívky, F_{mymax} je maximální třecí síla F_{mymin} je minimální třecí síla

sil: $F_{mmax} = 26$ mN, $F_{tmax} = 9$ mN, $F_{tmin} = -4.5$ mN. Nejvyšší dosažená rychlost robota se pohybuje okolo 50 mm/s, robot dosahuje velmi vysokého zrychlení při přeskoku. Na vysokorychlostní kameře bylo patrné i lehké kmitání robota, které ovšem nebylo měřitelné. Robot se ustálí v čase 0,08 s.

ii.4.2 VÝSLEDKY SIMULACE DYNAMIKY



Obr. 19: Výsledky simulace robota



Obr. 20: Fotografie z vysokorychlostní kamery

Část III

EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ

iii.1

MAGSNAIL

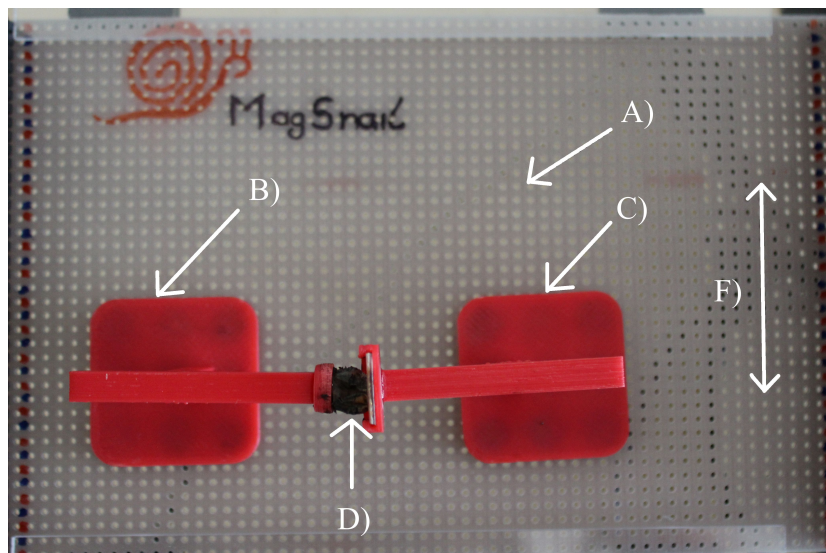
PROVEDENÍ první platformy pojmenované MagSnail, v překladu magnetický šnek, sloužilo hlavně k ověření základní funkčnosti. Šnek v názvu je obsažen jak z důvodu rychlosti robota, tak kvůli způsobu jeho pohybu, který je inspirován pohybem šneka. Tento způsob pohybu využívají červi. Šnek svalnatou nohou vytváří vlnitý pohyb. My se tuto prostorovou vlnu snažíme napodobit postupným spínáním cívek a postupně tak posouvat magnetické pole.

III.1.1 PROVEDENÍ A VÝROBA

Výroba této platformy nebyla komplikovaná. Jedná se o univerzální desku plošných spojů, která je po obou koncích pospojována právě tak, aby vznikly dvě prostorově posunuté cívky viz obr. 9. Hodnoty odporů jednotlivých cívek činí $6\ \Omega$ a $6,2\ \Omega$. Šířka vodiče je 2 mm a šířka izolační mezery činní 0,5 mm. Celkový počet vodičů je čtyřicet. Z důvodu zapojení pouze dvou cívek byl možný pohyb s jedním stupněm volnosti. Celý systém MagSnail je zobrazen na obr. 21. Nezbytnou součástí systému je spínací část, která je tvořena relé. Konkrétně se jedná o Arduino relé modul s osmi kanály s optickým oddělením. Jako řídicí jednotka

iii.1.2 ALGORITMY ŘÍZENÍ

slouží Arduino UNO. Celý systém MagSnail je upevněn pomocí hliníkových profilů a propojek.



Obr. 21: Platforma MagSnail s roboty vybavené magnetickým úchopovým systémem, kde A) pracovní plocha, B) robot s permanentním magnetem, C) robot s magnetickou kapalinou, D) úchopový systém, F) směr pohybu

III.1.2 ALGORITMY ŘÍZENÍ

Zásadní otázkou bylo zjištění nejlepšího spínání cívek, aby docházelo k nejmenší chybovosti¹ robota. Byl použit laboratorní zdroj stabilizovaného napětí. Nabízelo se několik metod spínání. První možností bylo spínat jednu cívku a následně druhou. Poté první cívku s obrácenou polaritou a pak druhou s obrácenou polaritou. Spínání je pro lepší přehlednost graficky zobrazeno na několika obrázcích viz obr. 22. Z obr. 22 je patrné, že sepnuté cívky tlačí robota na cívku, která není sepnutá. Vždy bylo nutné nechat cívku sepnutou po přesně stanovenou dobu

¹ Chybovostí byla myšlena jakákoliv odchylka od předepsané cílové pozice robota.

iii.1.3 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI

(delay). Časové rozložení spínání je zobrazeno v obr. 23. Systém MagSnail byl spínán v rychlostech 200, 100 a 50 ms. Díky známé hodnotě delay bylo možné vypočítat průměrnou rychlost pohybu robota.

Další možností bylo spínat obě dvě cívky společně a jen měnit polaritu. Experimentálně bylo ověřeno, že nejlepší možností spínání je první varianta, tedy spínat vždy jen jednu cívku.

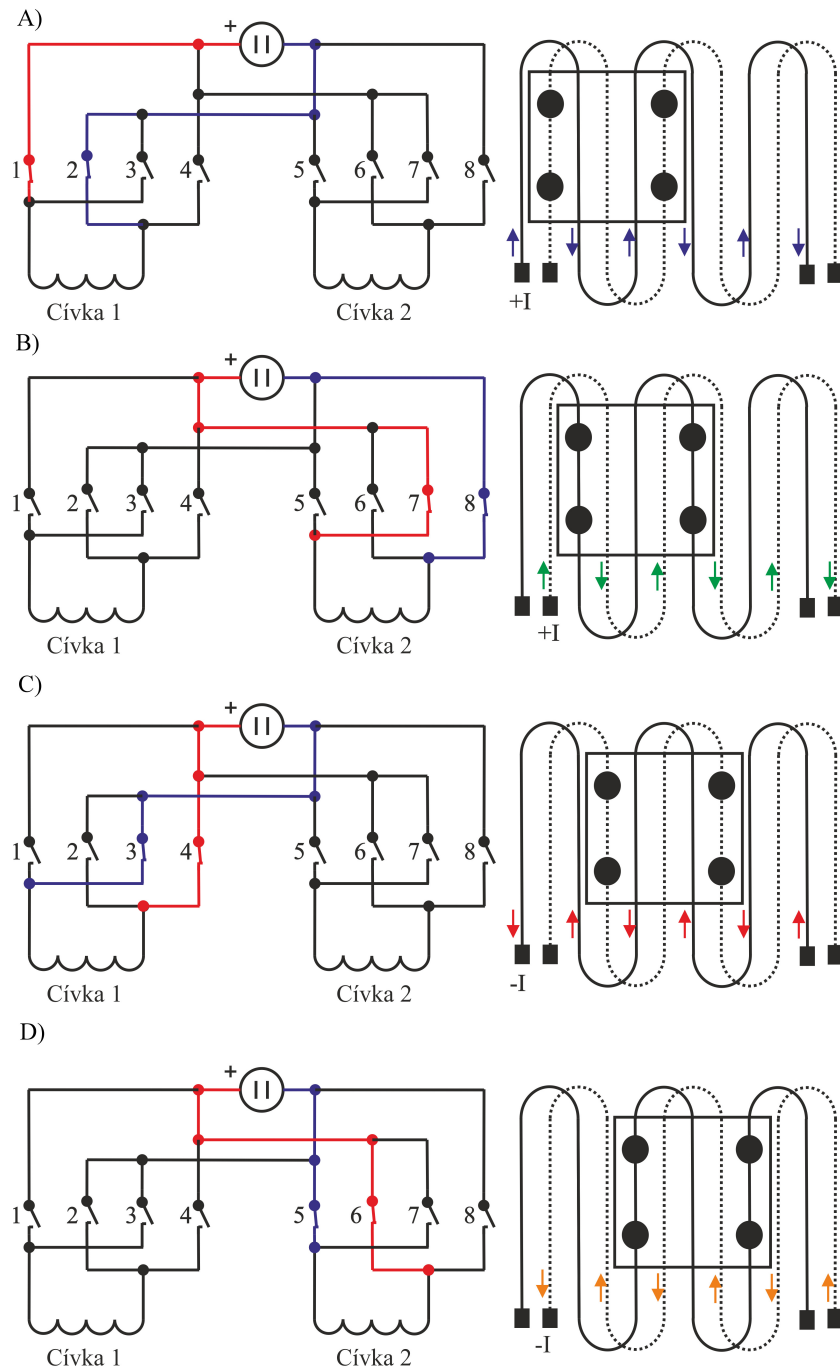
III.1.3 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI

Platforma MagSnail vznikla hlavně za účelem ověření funkčnosti celé myšlenky pohybu robota. Samotný pohyb robota byl stabilní při napětí 10 V, při protékajícím proudu 2 A. Při zmíněném výkonu docházelo k silnému zahřívání platformy již po krátké době probíhajících pokusů. Nejnižší potřebný proud potřebný ke kmitání robota kolem příslušného vodiče cívky byl minimálně 1 A (nejednalo se o posun ale pouze lehké záchvěvy).

Na platformě MagSnail byly zkoušeny roboti se čtyřmi magnety ve velikostech 20 x 20 mm a 30 x 30 mm, dále roboti s devíti magnety o velikosti 30 x 30 mm viz obr. 24. Jako nejméně stabilní robot byl vyhodnocen velký robot se čtyřmi magnety, který byl vyřazen z testování. Nejstabilnější robot byl robot s devíti magnety. Velmi dobře při testování vyšel i malý robot se čtyřmi magnety. Tento robot váží 2,56 g a uveze břemeno o hmotnosti 3,8 g, což je téměř 150 % své vlastní hmotnosti. Robot tvořený devíti magnety váží 5,62 g a uveze 4,79 g to odpovídá téměř 87 % své hmotnosti.

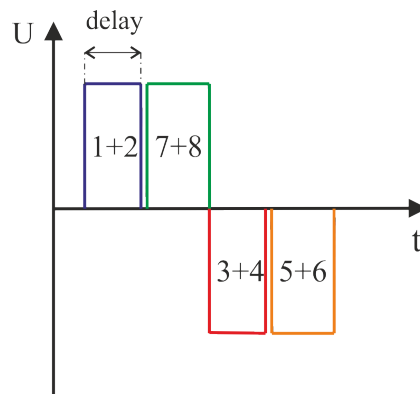
Experimentální měření probíhalo pomocí vysokorychlostní kamery. Z následných obrázků byla vypočítána rychlost pohybu, která činila 50 mm/s. Dalším zjištěným jevem bylo přibližování se robotů k okrajům pracovní plochy, kde byly připojeny kontakty. Tento jev lze vysvětlit tím, že kontakty jsou z magnetického

iii.1.3 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI

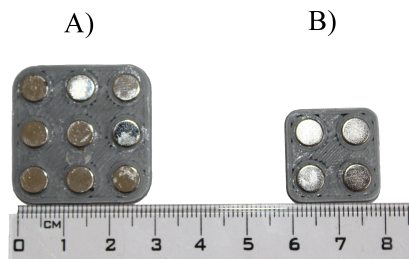


Obr. 22: Grafické zobrazení spínání osmi spínacích prvků a posunu robota při jednotlivých sepnutí: A) první fáze: sepnutí první cívky, B) druhá fáze: sepnutí druhé cívky, C) třetí fáze: sepnutí první cívky inverzně, D) čtvrtá fáze: sepnutí druhé cívky inverzně

iii.1.3 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI



Obr. 23: Ilustrace časového průběhu napětí při spínání jednotlivých cívek a čísla sepnutých spínačů

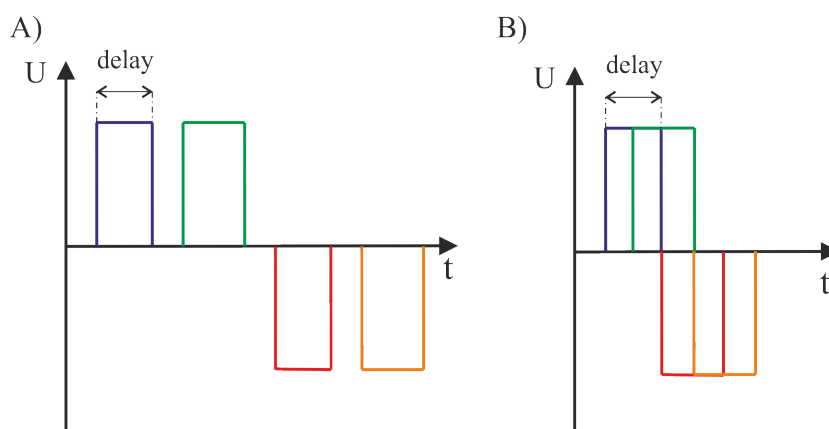


Obr. 24: A) robot s devíti magnety, B) robot se čtyřmi magnety

materiálu a magnety jsou k nim tedy přitahovány. Dalším zjištěným faktem bylo překmitávání robota. Robot svojí přesně stanovenou pozici nejprve přešel a následně se na ni vrátil, docházelo tedy ke krátkému překmitávání. Ten je způsoben setrvačností robota. Eliminace tohoto jevu by mohla být docílena díky optimalizované rychlosti spínání, a tím využití setrvačnosti k doklouzání robota na stanovenou pozici viz obr. 25 A). Další možností je překrytí pulzů a následné zabránění skokových přesunů viz obr. 25 B).

Při ověření funkčnosti byl kladen důraz také na zahřívání platformy. Bylo tedy provedeno měření pomocí termokamery Fluke TI-55FT. Měření probíhalo při rychlosti spínání 50 ms. Snímky byly pořizovány v minutových intervalech po

iii.1.4 SPOLUPRÁCE ROBOTŮ



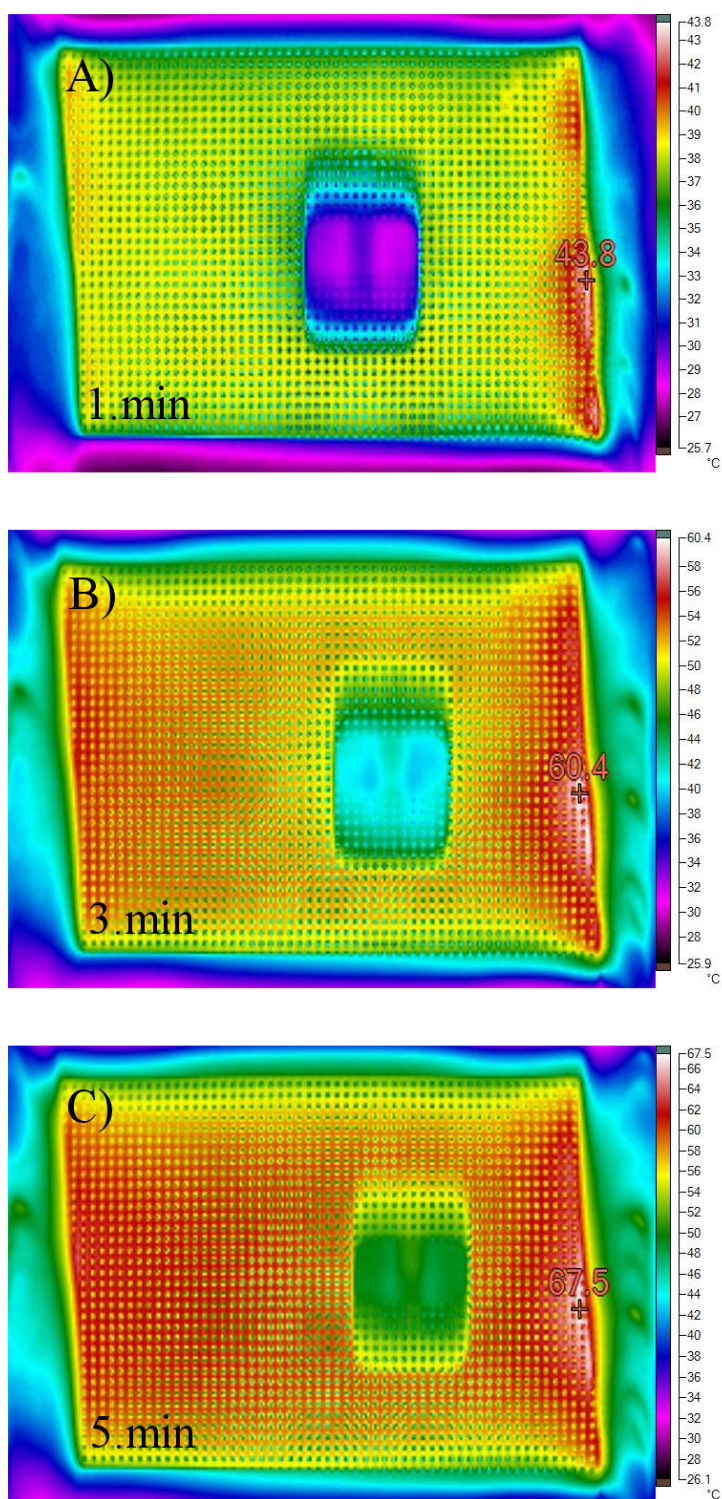
Obr. 25: A) návrh zamezení kmitání pomocí spínání a setrvačnosti B) návrh zamezení kmitání robota díky spojitému pohybu

dobu pěti minut. Snímky jsou vyobrazeny v obr. 26 A), 26 B), 26 C), 44 A), 45 B) a 45 C). Obr. 26 A) byl zaznamenán minutu po spuštění a teplota v nejteplejším bodě dosáhla $43,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, ve třetí minutě (obr. 26 B)) došlo k nárůstu teploty nejteplejšího bodu na $60,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Poslední snímek (obr. 26 C)) dosahoval teploty v nejteplejším bodě až $67,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Teploty před začátkem měření, ve třetí a čtvrté minutě dosahovaly teplot $25,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $54\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $64,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (viz příloha obr. 44 A), 45 B) a 45 C).

III.1.4 SPOLUPRÁCE ROBOTŮ

Jak již bylo zmíněno v kapitole i.4, velmi důležitým faktorem byla spolupráce robotů. Na platformě MagSnail byl řešen hlavně úchopový systém, který byl tvořen pomocí vzájemného působení váčků naplněných magnetickou kapalinou a permanentního magnetu. Při spolupráci nebylo řešeno samotné uchopení předmětu, protože platforma MagSnail k tomuto účelu nebyla přizpůsobena ani navržena. Deska plošného spoje zapojená jako MagSnail generuje na celém svém povrchu stejné elektromagnetické pole, a proto se všichni roboti na platformě musí pohy-

iii.1.4 SPOLUPRÁCE ROBOTŮ

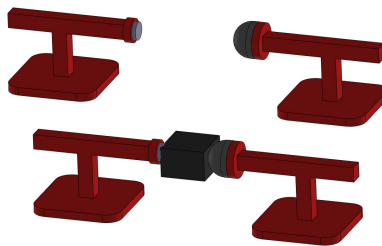


Obr. 26: Ohřev platformy MagSnail pořízený termokamerou: A) fotografie rozložení teploty v první minutě, B) fotografie rozložení teploty ve třetí minutě, C) fotografie rozložení teploty v páté minutě

iii.1.5 MODIFIKACE PRO JEŘÁB

bovat stejným směrem a rychlostí. Pro možnost úchopu by musely být využity dvě desky univerzálních plošných spojů a musel by mezi nimi být vytvořen úchopový prostor. Jelikož platforma sloužila hlavně pro ověření funkčnosti, nebylo s takovou možností počítáno.

Pro spolupráci byl vybrán robot s devíti magnety, který vykazoval nejmenší chybovost. Na robota byl umístěn nosič magnetické kapaliny a ve stejné výšce byl na druhém robotovi umístěn permanentní magnet. Magnetická kapalina ve váčku velmi dobře plnila roli úchopového systému, přenášený materiál pevně obepnula, aniž by došlo k poškození materiálu jak ukazuje obr. 27. Celá výroba magnetického váčku je detailně popsána v diplomové práci studenta Bc. Vojtěcha Skřivana [8].



Obr. 27: Grafické zobrazení spolupráce robotů s magnetickým úchopovým systémem

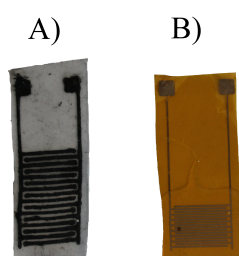
III.1.5 MODIFIKACE PRO JEŘÁB

Tato kapitola vznikla téměř díky náhodě. Při pokusech probíhajících za účelem spolupráce robotů (viz podkapitola iii.1.4) bylo zjištěno, že pomocí magnetické kapaliny jsme schopni udržet roboty i na opačné straně platformy. Proto byla magnetická kapalina využita jako přídržný systém pro robota, který nebyl položen na desce, nýbrž visel pod platformou viz obr. 29. Tato kombinace magne-

iii.1.5 MODIFIKACE PRO JEŘÁB

tické kapaliny a robota by mohla být velkým přínosem v dalších oblastech jeho využitelnosti. V kombinaci s další platformou by mohlo jít o velice komplexní pohybový a úchopový systém.

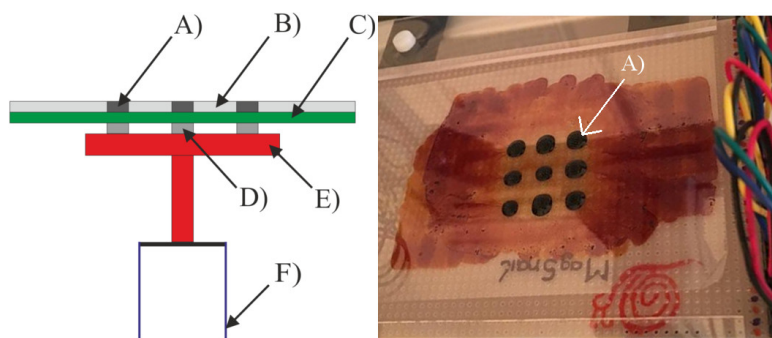
Hlavní výhodou takto vytvořeného jeřábu by byl fakt, že je na něj možné upevnit další úchopový systém, kterým se zabývá bakalářská práce studenta Jana Fessla [10]. Tento úchopový systém se zabývá elektroadhezí a výrobou flexibilních elektrod (obr. 28), které jsou velmi lehké a dokáží unést několikanásobek své vlastní váhy.



Obr. 28: A) elastická elektroda vyrobená pomocí uhlíkového prášku a silikonu B) flexibilní elektroda vyrobená pomocí technologie Aerosol Jet Printing

Již při prvním testování této modifikace bylo zjištěno několik úskalí. Při malém množství magnetické kapaliny robot během pohybu velmi často padal a neunesl vlastní váhu. Naopak při velkém množství kapaliny byla elektromagnetická síla vytvořená cívkami tak malá, že nedokázala překonat přitažlivou sílu kapaliny s permanentním magnetem a robotem pohnout. Východiskem z tohoto problému by mohlo být malé čerpadlo, které by odčerpalo, či přičerpalo předem přesně stanovené množství kapaliny pro stabilizaci, nebo možný pohyb robota.

iii.1.6 ZHODNOCENÍ



Obr. 29: Grafické znázornění modifikace pro jeřáb vlevo a fotografie vpravo kde, A) je nahromaděná magnetická kapalina, B) je zbytková magnetická kapalina, C) je platforma MagSnail, D) jsou magnety, E) je robot a F) jsou elektrody

III.1.6 ZHODNOCENÍ

Prvním prototypem vyrobeným pro potvrzení teoretických předpokladů se dostatečně ověřila základní myšlenka, využít proměnné elektromagnetické pole k pohybu permanentních magnetů. Díky různým testům spínání byla zjištěna nejlepší posloupnost spínání cívek. Systém také poukázal na mnohé nedostatky a úskalí.

Po několikerém zkoušení a testování bylo zjištěno překmitávání robota při každém kroku. Dalším nedostatkem při menším proudu byla chybovost robota. Mnohdy docházelo k pootočení robota a tím k jeho nefunkčnosti. Dále bylo zjištěno, že robot se silně stahuje ke krajům, ve kterých byl magnetický materiál. Ze všech poznatků byly vyvozeny důsledky, které se využily při návrhu nového prototypu. Nový prototyp měl jako hlavní kritérium stanovenou velikost. Další kritérium pro výrobu nové platformy bylo udělat systém s možností polohování již ve dvou osách.

iii.2

MAGSTRIVER

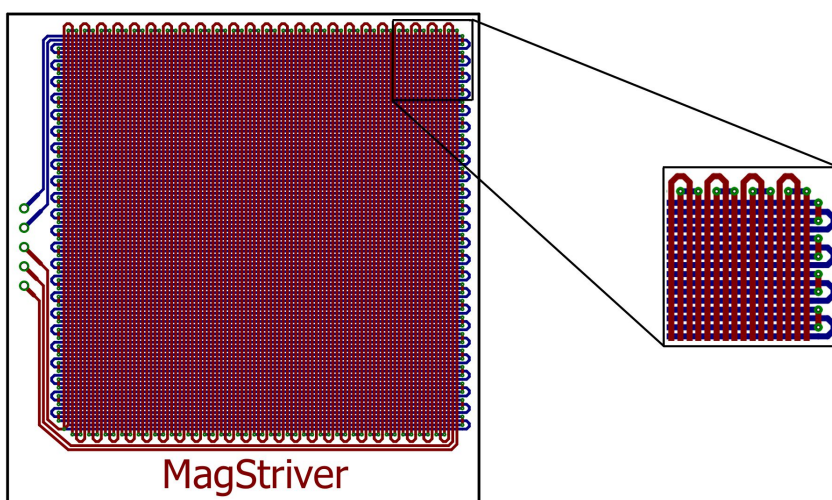
NOVÁ platforma pojmenovaná MagStriver vychází ze všech poznatků získaných z předchozí platformy MagSnail. Název MagStriver je z anglického slova striver, tedy dřič. Při návrhu bylo hlavní motivací celkové zmenšení platformy, zjemnění kroku, snížení chybovosti a to celé se pokusit dosáhnout s co nejmenšími proudy a napětím. Dále bylo myšleno na jednoduchost výroby s minimálními náklady. Návrh byl tvořen z vodičů o šířce 0,5 mm s izolační mezerou 0,25 mm viz obr. 30.

První návrh byl technologicky upraven pro výrobu frézováním bez možnosti prokovení otvorů a bylo technologicky obtížné vodiče ručně propájet viz obr. 31. Izolační mezery byly příliš malé a často docházelo k propájení izolační mezery a následnému zdlouhavému hledání zkratu.

Pro další postup ve výrobě bylo tedy nutné zvolit výrobní technologii umožňující prokovení otvorů. Díky prokoveným otvorům bylo jisté, že nedojde k nechtěným zkratům.

Robot byl vytvořen jako u platformy MagSnail pomocí profilu vytištěného na 3D tiskárně, který byl následně osazen magnety o velikosti 1 x 1 mm. Robot byl osazen jako u platformy MagSnail čtyřmi a devíti magnety. Celková velikost robota se čtyřmi magnety byla 5,5 x 5,5 mm a s devíti magnety 8,6 x 8,6 mm viz

iii.2.1 NÁVRH A STAVBA



Obr. 30: Návrh platformy MagStriver s detailním výřezem na propojení vodivých cest

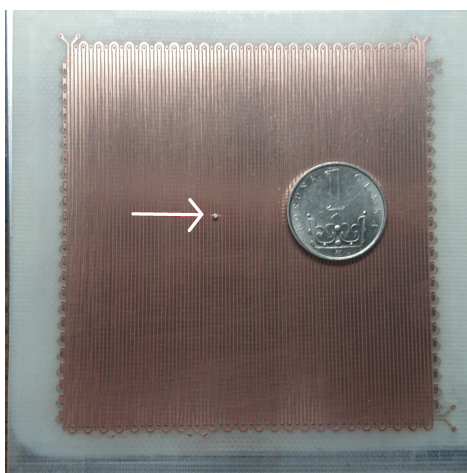
obr. 32. Robot osazený čtyřmi magnety byl tedy zmenšen o 72,5 % oproti robotu pro MagSnail.

III.2.1 NÁVRH A STAVBA

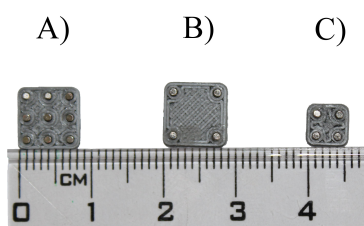
Pro první prototyp MagStriveru byla pro jednoduchost a finanční náročnost zvolena možnost vyrobit platformu z obyčejného materiálu ITEQ-158 pro výrobu plošných spojů. Platforma byla 1,5 mm tlustá s 18 μm mědi a překryta dvakrát nepájivou maskou. Při základním vyzkoušení platformy bylo zjištěno, že druhá vrstva desky je příliš vzdálena od robota a magnetické pole cívky je příliš slabé, aby robotem pohnulo.

Při návrhu druhého prototypu platformy MagStriver (viz obr. 33) se vycházelo ze zjištěných základních nedostatků první verze. Platforma byla ztenčena na 0,25 mm. Byla vylepšena připojitelnost platformy pomocí svorkovnice a do-

iii.2.1 NÁVRH A STAVBA



Obr. 31: První verze vyrobená na fréze ZČU, porovnání velikosti magnetu a jedné koruny české

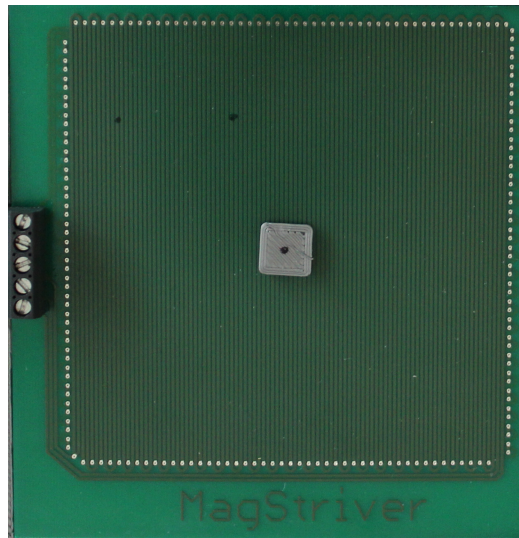


Obr. 32: A) velký robot osazený devíti magnety, B) velký robot osazený čtyřmi magnety, C) malý robot osazený čtyřmi magnety

šlo dokonce i ke snížení počtu potřebných přívodních vodičů, a to z osmi na pět. Ostatní parametry zůstaly nezměněny.

Stavba platformy MagStriver probíhala velice podobně jako u platformy MagSnail. Pro konstrukci byly použity hliníkové profily spojené pomocí železných propojek. K uchycení platformy byly vytištěny nové úchyty pomocí 3D tiskárny. Platforma byla ovládána stejně jako MagSnail, tedy pomocí mikrokontroléru Arduino Mega a pomocí relé, které tvoří spínače. Oproti MagSnailu ovšem došlo ke značnému snížení počtu spínacích prvků. Díky využití symetrického napájecího

iii.2.2 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ



Obr. 33: Druhá verze MagStriver vyrobená s prokovenými otvory, s položeným robotem osazeným devíti magnety

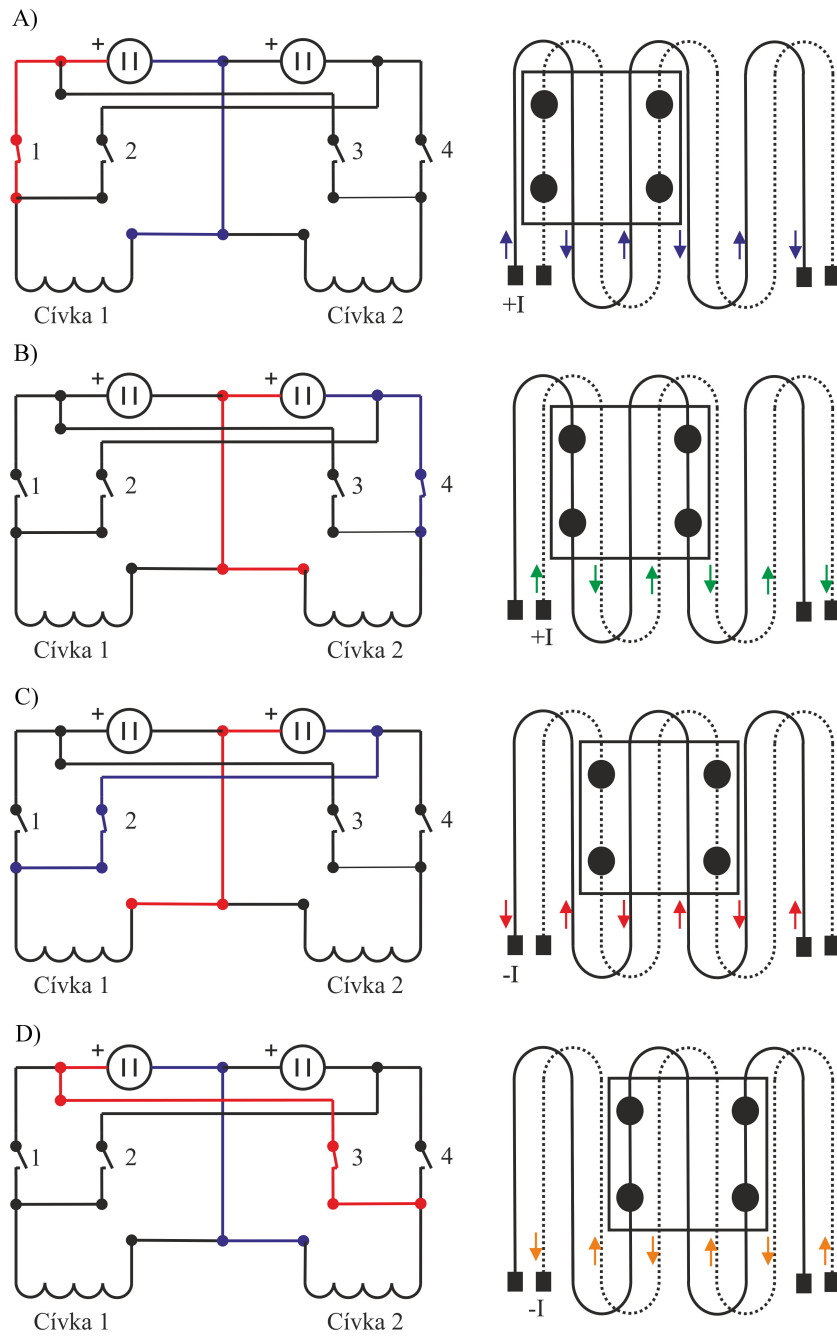
zdroje a propojení cívek se snížil počet z původních osmi spínacích prvků potřebných pro dvě cívky na osm spínacích prvků potřebných pro čtyři cívky, tedy na polovinu. Bylo tedy docíleno snížení celkových hardwarových nároků celého systému. Zapojení spínacích prvků je dobře patrné na obr. 34. MagStriver byl dále doplněn analogovým joystickem, který velmi zpříjemnil ovládání robota.

Ve finálním provedení stavby byl k platformě MagStriver přidán display, který ukazoval směr a rychlost jízdy robota. Poté byla vytištěna na 3D tiskárně krabíčka, do které byly osazeny veškeré řídicí a spínací prvky.

III.2.2 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

Tato podkapitola se zabývá různými experimentálními měřeními. Veškerá měření byla prováděna za stejných podmínek. Měření probíhalo s různými parame-

iii.2.2 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ



Obr. 34: Grafické zobrazení spínání čtyř spínacích prvků a posunu robota při jednotlivých sepnutí, A) první fáze, B) druhá fáze, C) třetí fáze, D) čtvrtá fáze

try. Měnily se parametry rychlosti spínání cívek (25 ms, 50 ms a 100 ms) a velikost napětí (2 V, 2,5 V a 3 V).

Energetická náročnost systému MagStriver byla měřena pomocí elektronického osciloskopu, ze kterého byly postupně ukládány data pro různé hodnoty napětí. Hodnota napětí 2 V byla stanovena podle nejnižšího možného napětí, které stačilo k pohybu robota. Dále byl pomocí multimetru změřen odpor všech čtyř cívek. Cívky měly odpor na každé straně stejný, a to $4,1 \Omega$ a $4,3 \Omega$. Z Ohmova zákona byl následně vypočítán průběh proudu, který se pohyboval v rozmezí $0,6 \text{ A}$ při kladném proudu a $-0,6 \text{ A}$ při záporném proudu. Ze získaných hodnot byl dále dopočítán příkon, který činil průměrně $1,5 \text{ W}$. Výsledky jsou uvedeny v obr. 35. Z měření na osciloskopu jsou jasně patrné i časové průběhy napětí a proudů (obr. 35). Znázorněné měření probíhalo při rychlosti spínání 50 ms.

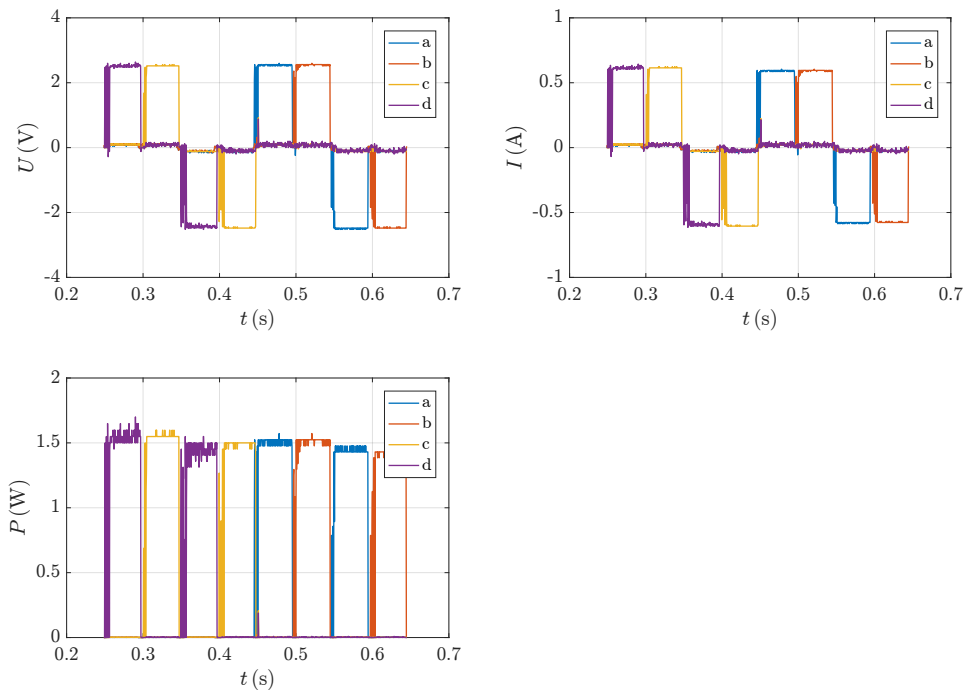
Z obr. 35 je zřejmá energetická náročnost cívek při napájení 2,5 V. Ostatní výsledky jsou zobrazeny v tab. 4. Další průběhy jsou uvedeny v příloze viz obr. 47 a 48.

Tab. 4: Energetická náročnost MagStriver

U (V)	I (A)	P (W)
± 2	$\pm 0,46$	0,95
$\pm 2,5$	$\pm 0,6$	1,5
± 3	$\pm 0,7$	2,1

Měření dynamiky pohybu robota probíhalo pomocí vysokorychlostní kamery, kde byl snímán a následně vyhodnocován pohyb robota. Měření probíhalo s různými rychlostmi spínání cívek. Rychlosti spínání byly voleny 25, 50 a 100 ms. Při měření dynamiky bylo zkoumáno překmitávání za různých podmínek. Podmínky se měnily pomocí velikosti napětí (2, 2,5 a 3 V), použitím vrchní či spodní cívky a rychlosti spínání. Pro zpracování dynamiky byl použit stejný algoritmus

iii.2.2 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

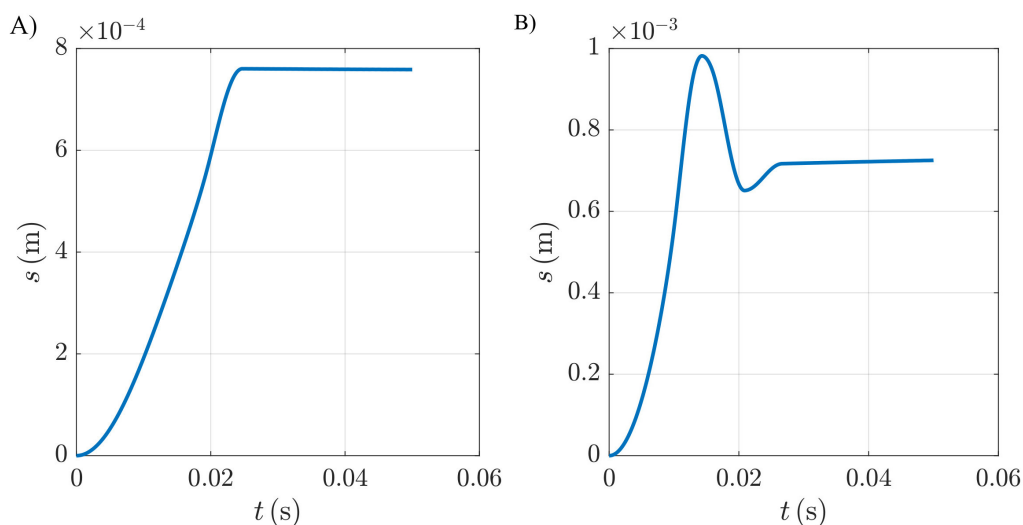


Obr. 35: Výsledky měření energetické náročnosti při rychlost spínání 50 ms a vstupním napětí 2,5 V, kde a, b, c, d značí jednotlivé cívky

jako v kapitole ii.4. V modelu se měnily dva atributy, a to třecí síla a síla působící od vodiče. Maximální síla působící v ose x byla stanovena na 1 mN bez překmitávání a na 1.5 mN s překmitáváním. Maximální třecí síla vyšla 0.6 mN a minimální třecí síla -0.3 mN. Třecí síly zůstaly stejné u simulace s překmitáváním i bez překmitávání. Síly musely mít přesný průběh (viz. obr. 18), aby model odpovídal reálnému systému. Výsledky simulace dynamiky jsou zobrazeny v obr. 36, kde je jasně patrný vliv síly působící od vodiče na překmitávání robota.

Chybovost polohování byla měřena pomocí vysokorychlostní kamery. Pro toto měření byl vytvořen algoritmus, který polohoval robota do čtverce. Velikost čtverce byla volena dle počtu kroků algoritmu, konkrétně 2, 6 a 12. Jeden krok byl definován jak cyklus sepnutí všech cívek, tedy 3 mm. Vždy byly měřeny tři kola,

iii.2.2 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ



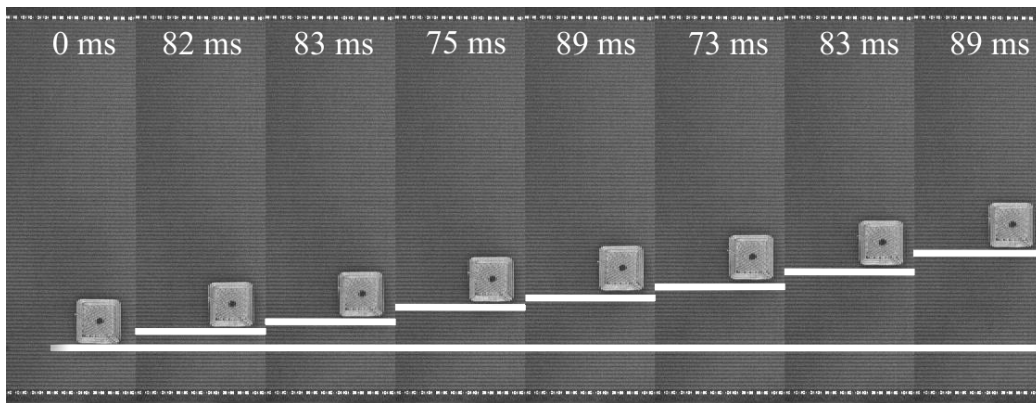
Obr. 36: Simulace pohybu robota A) bez překmitávání, B) s překmitáváním

kteří robot musel objet. Z důvodu porovnatelnosti výsledků měl robot vždy stejnou startovní pozici. Měření probíhalo jak již bylo zmíněno v kapitole iii.2.2 s různými vstupními parametry napětí a časů spínání cívek. Pro přesnějšího zpracování výsledků byl robot označen černou tečkou. Výsledky měření jsou uvedeny v obr. 38. V obrázcích jsou červeně zobrazeny konečné polohy robota, modře je označen robot, který uskočil před změnou směru (tedy před startem další cesty) a bílou čarou je pak znázorněna celá cesta.

Z obr. 38 A) a 38 B) je patrný vliv napětí na chybovost polohování. Při nižším napětí dochází při rychlosti spínání 50 ms k chybovosti robota. V obr. 38 C) a 38 D) je jasně viditelný vliv rychlejšího spínání cívek a napětí na chybovost polohování. Při vyšší rychlosti spínání cívek (25 ms) a ponechání nižšího napětí dochází k silné chybovosti robota. Pokud se při stejné rychlosti spínání zvýší napětí, dojde k razantní snížení chybovosti.

Dalším faktorem byla délka cesty, kterou měl robot urazit. Pokud byla cesta dlouhá pouze dva kroky byla chybovost polohování minimální. K důkladnějšímu rozboru byl vybrán cyklus o šesti krocích, kde docházelo již k měřitelným rozdí-

iii.2.2 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

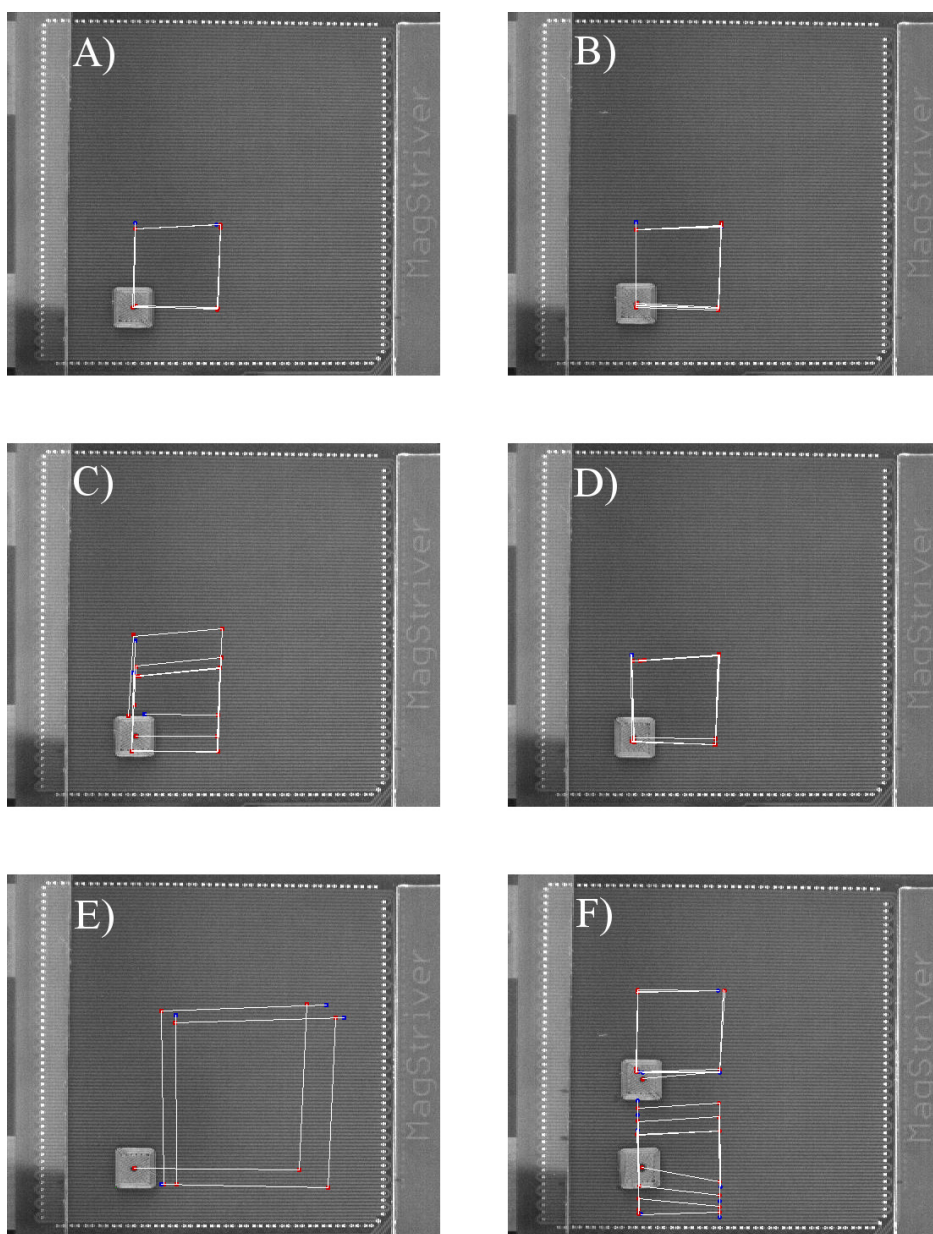


Obr. 37: Výsledky měření dynamiky při rychlosti spínání 25 ms a vstupním napětí 2,5 V

lům. Při nejdelším cyklu, který činil dvanáct kroků, docházelo k velmi znatelné chybovosti. Nejdelší cyklus je zobrazen v obr. 38 E), kde byla použita rychlost spínání 50 ms při napětí 2,5 V. Tato kombinace parametrů při délce cyklu 6 kroků nevykazovala znatelnou chybovost, ale při délce 12 kroků již byla chybovost velmi patrná. Posledním měřením chybovosti polohování bylo sledování vlivu blízkého robota. Zde docházelo ke vzájemnému ovlivňování robotů. Z výsledků (obr. 38 F)) je patrné silné ovlivňování robotů, které se ovšem po třech kolech ustálí.

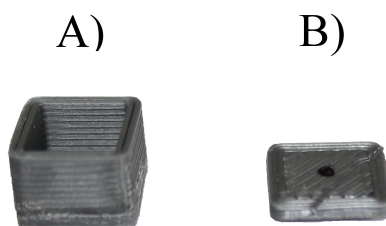
Nosnost robota, byla experimentálně měřena pomocí upraveného robota. Na něj byla přilepena vanička na kapalinu (obr. 39). Pro zjištění maximální nosnosti byla pak do vaničky přesně přidávána kapalina. Během měření byl pomocí joysticku použit pozvolný rozjezd. Díky postupnému rozjezdu bylo dosaženo výrazně lepších výsledků, než při rázovém sepnutí cívek. Velký vliv na nosnost měla vzdálenost cívky od robota, která činila při využití vzdálenější cívky 0,25 mm. Robot s devíti magnety, který byl vybrán pro měření nosnosti váží 0,12 g. Nosnost robota při využití vzdálenější cívky byla 0,41 g a při využití bližší cívky 0,8 g. Celková nosnost robota činí tedy téměř 400 % své hmotnosti v obou směrech a ve směru vyvolaném bližší cívkou téměř 800 % své hmotnosti.

iii.2.2 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ



Obr. 38: Výsledky měření chybovosti: A) počet kroků 6, rychlost spínání 50 ms, napětí 2,5 V, B) počet kroků 6, rychlost spínání 50 ms, napětí 3,0 V, C) počet kroků 6, rychlost spínání 25 ms, napětí 2,5 V, D) počet kroků 6, rychlost spínání 25 ms, napětí 3,0 V, E) počet kroků 12, rychlost spínání 50 ms, napětí 2,5 V, F) počet kroků 6, rychlost spínání 50 ms, napětí 2,5 V, 2 roboti

iii.2.3 ZHODNOCENÍ



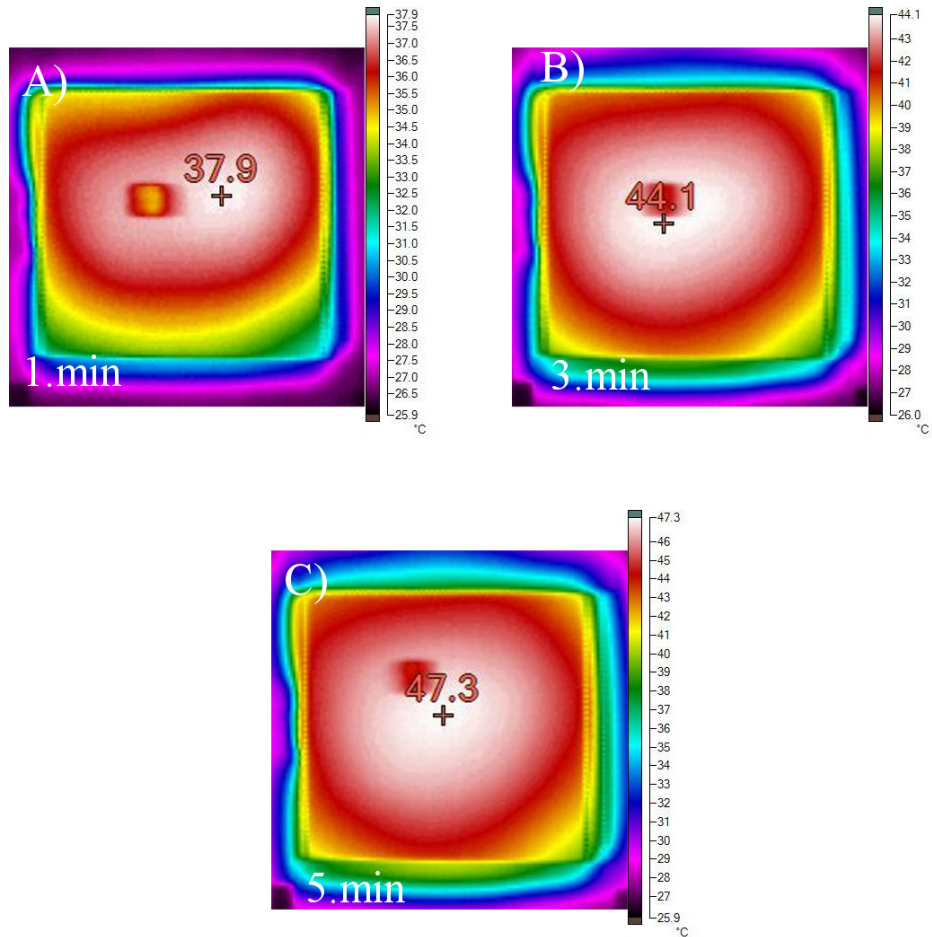
Obr. 39: A) robot s vaničkou na kapalinu B) robot bez vaničky

Posledním měřením bylo zahřívání platformy MagStriver. Použita byla termokamera Fluke TI-55FT jako u platformy MagSnail. Měření probíhalo celkem pět minut a platforma byla snímána v minutových intervalech. Měření probíhalo při rychlosti spínání 50 ms a pro lepší porovnatelnost s platformou MagSnail byla použita k polohování pouze jedna cívka. Výsledky měření jsou vyobrazeny v obr. 46 A), 40 A), 46 B), 40 B), 46 C) a 40 C). Na obr. 46 A) je teplota před začátkem měření, na obr. 40 A) je zaznamenána platforma v první minutě měření, kde teplota dosahuje 37,9 °C. Poslední snímek (obr. 40 C)) je zaznamenán po pěti minutách měření a teplota dosahuje maximální hodnoty 47,3 °C.

III.2.3 ZHODNOCENÍ

Platforma MagStriver byla velikým skokem od platformy MagSnail. Došlo k všeobecnému zmenšení platformy, šířka vodiče byla 0,5 mm a šířka izolační vzdálenosti 0,25 mm. Dále byla značně zredukována velikost robotů (obr. 41) z 30 mm na 8,6 mm (28,7 %) u robota osazeného devíti magnety. Krok robota byl úměrně snížen velikosti vodičů, tedy z 2,5 mm na 0,75 mm (30 %). Dále byla přidána druhá cívka, díky které bylo docíleno druhého stupně volnosti pohybu. Celkový počet spínačů byl osm a byl tedy zredukován na polovinu oproti předchozí platformě.

iii.2.3 ZHODNOCENÍ



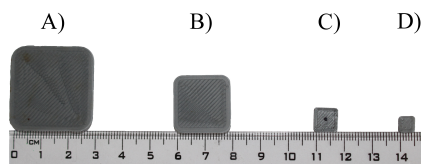
Obr. 40: Ohřev platformy MagStriver pořízený termokamerou: A) rozložení teploty před spuštěním platformy B) rozložení teploty v první minutě C) rozložení teploty ve třetí minutě D) rozložení teploty v páté minutě

iii.2.3 ZHODNOCENÍ

Bylo zjednodušeno i připojení samotné platformy, které bylo provedeno pěti vodiči.

Na platformě bylo provedeno několik experimentálních měření, které poukázaly na přednosti i nedostatky. Jeden z největších pokroků byl v oblasti nosnosti, kde se z 87 % u MagSnailu zvedla na 400 % u MagStriveru. Dále byla měřena dynamika, kde robot při větším napětí nebo při využití bližší cívky stále překmitával. Při měření chybovosti byly po optimalizaci napětí naměřeny dobré výsledky. Dalším atributem bylo zahřívání, které kleslo o 20 °C. Energetická náročnost se snížila z 20 W na 1,5 W.

Platforma MagStriver byla vylepšena joystickem pro lepší manuální ovládání. Byl přidán display, který ukazuje aktuální rychlost a směr pohybu. Celá platforma byla implementována do krabičky vytištěné 3D tiskárnou.



Obr. 41: Srovnání robotů: A) robot velký MagSnail, B) robot malý MagSnail, C) robot velký MagStriver, D) robot malý MagStriver

Část IV

NÁVRH KOMERČNÍHO VYUŽITÍ

iv.1

PLATFORMA MAGSTRIVER

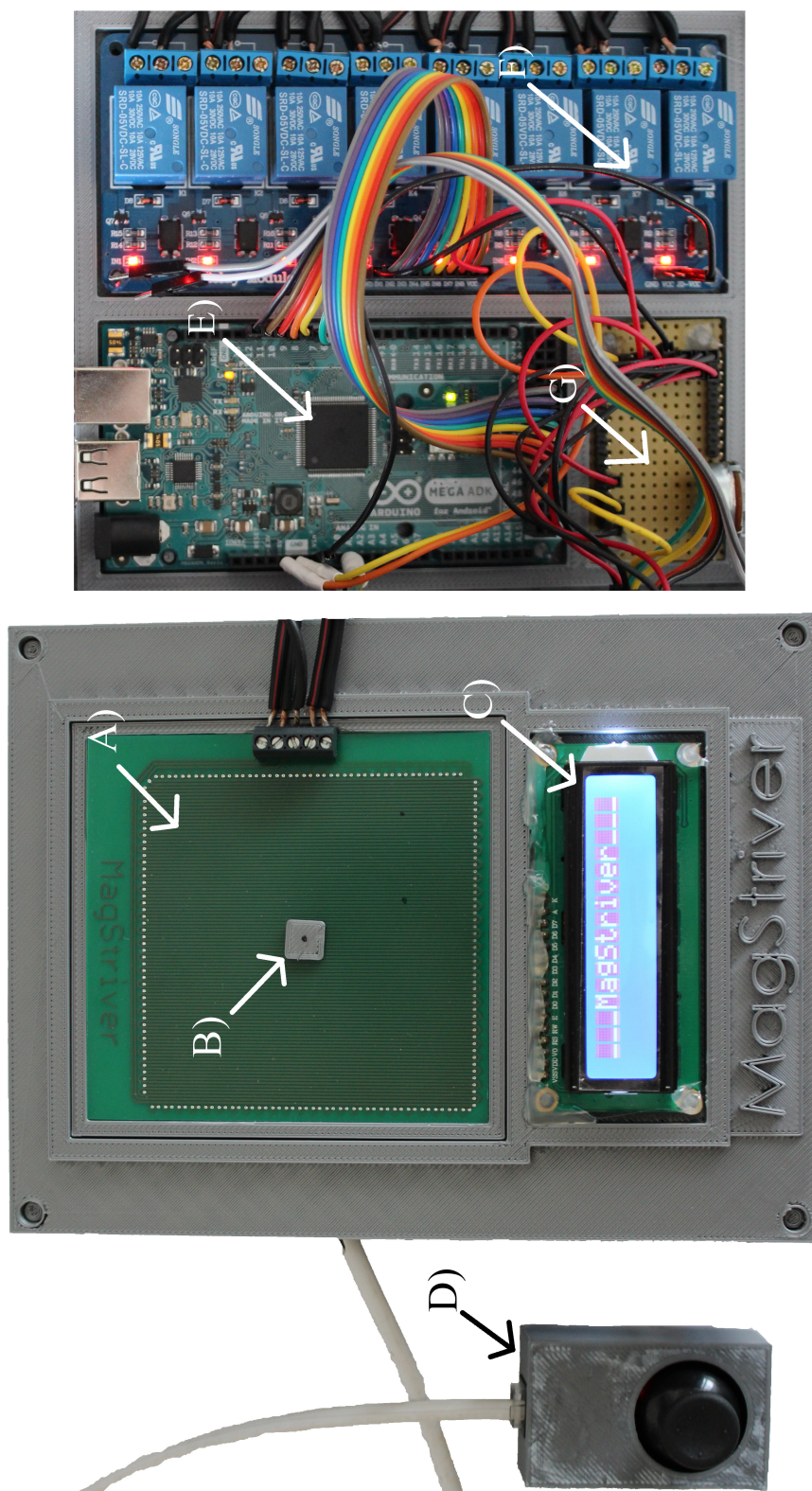
P LATFORMA MagStriver je ucelený polohovací systém, který by mohl najít mnohé uplatnění v komerční sféře. Finální výrobek sestává z polohovací desky, programovatelného mikroprocesoru, displaye, joysticku a sady robotů. Vše je uloženo do krabičky pro možnou manipulaci. Deska lze pro možné použití desky mimo krabičku od ní jednoduše oddělit.

IV.1.1 TECHNICKÉ ÚDAJE PLATFORMY

Potřebné technické údaje jsou uvedeny v tab. 6. Finanční náročnost jednotlivých položek MagStriveru je vyčíslena v tab. 5. Celková cena činí 2083,- Kč.

Tab. 5: Finanční náročnost platformy MagStriver

Položka	cena (Kč)	Položka	cena (Kč)
Polohovací deska	835,-	Arduino Mega	457,-
Relé modul	346,-	Display	117,-
Joystick	178,-	Ostatní položky	150,-



Obr. 42: Kompletní platforma MagStriver: A) pracovní deska, B) miniaturní robot, C) display zobrazující směr a aktuální rychlost, D) joystick pro manuální ovládání, E) mikroprocesor Arduino Mega, F) relé modul, G) propojovací deska

iv.1.2 MOŽNÉ VYUŽITÍ

Tab. 6: Technické specifikace MagStriver

Rozměry pracovní desky	71,25 x 71,25 mm
Šířka pracovní desky	0,25 mm
Šířka vodiče	0,5 mm
Šířka izolační mezery	0,25 mm
Počet stupňů volnosti	2
Rychlost pohybu	0 - 40 mm/s
Nejmenší krok	0,75 mm
Napájecí napětí	± 3 V
Napájecí proudy	$\pm 0,7$ A
Příkon	2,1 W
Velikost robota	8,6 mm
Nosnost	0,41 g

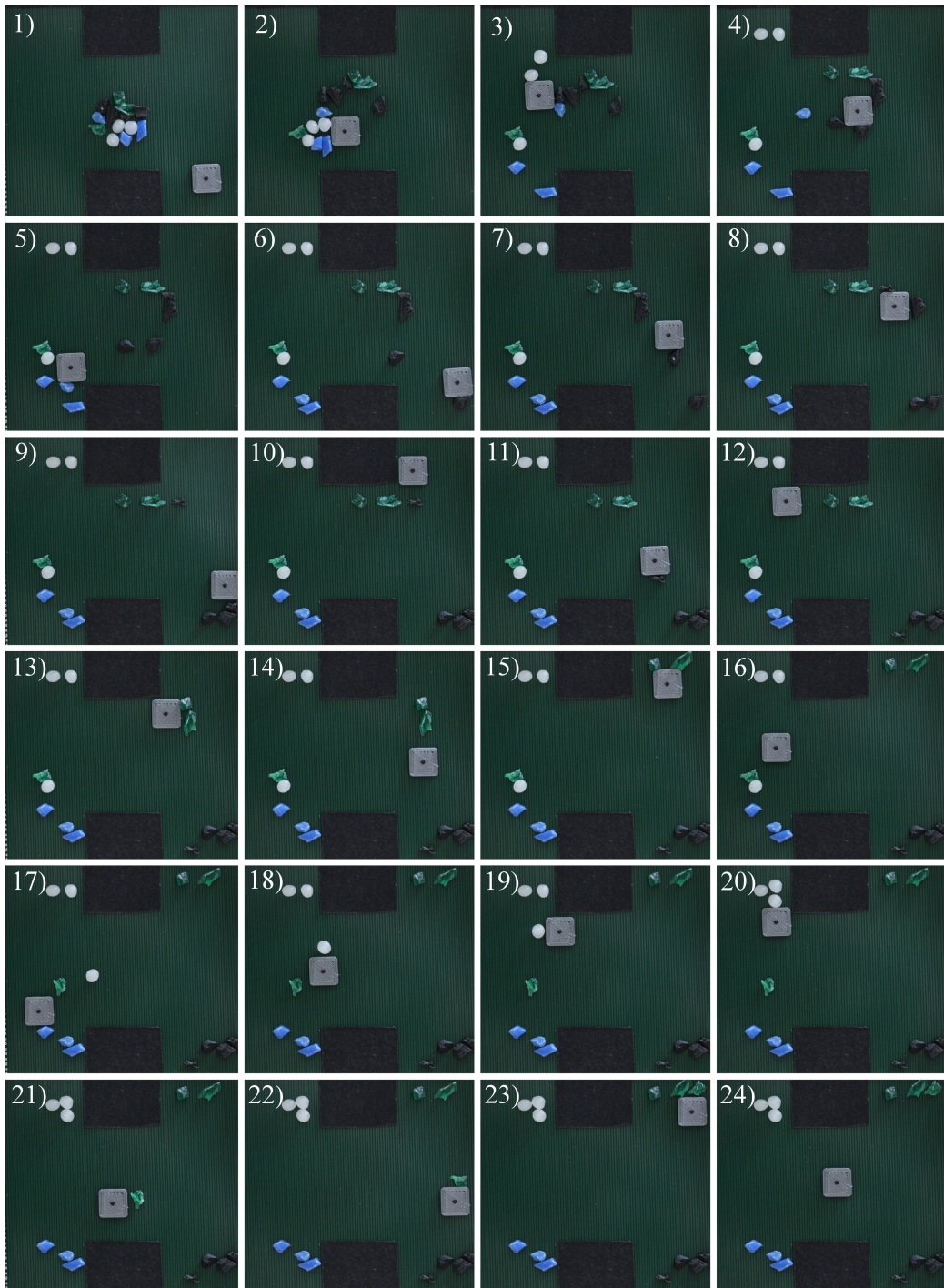
IV.1.2 MOŽNÉ VYUŽITÍ

Polohovací systém MagStriver by mohl najít uplatnění v laboratorní manipulaci (například manipulaci s různými vzorky). Díky oddělitelné polohovací desce je možné samotnou desku umístit do ochranné atmosféry a tak zaručit správné podmínky pro vzorky. Další možné využití díky odnímatelné desce by mohlo být manipulování se vzorky pod mikroskopem.

Další možné využití by mohlo být při pick and place výrobě, konkrétně při rozmístění elektrosoučástek na deskách plošných spojů, speciálně pak na tenkých fóliích.

Velmi silné uplatnění by mohla mít platforma při separaci malých kousků odpadu. V dnešní době je problém například při separaci elektroniky. Tato elektronika by mohla být rozemleta na malé kousky, které by byly následně roztříděny pomocí miniaturních robotů. Malá ukázka separace je zobrazena v obr. 43.

iv.1.2 MOŽNÉ VYUŽITÍ



Obr. 43: Ukázka využití platformy k separaci odpadu

Část V

ZHODNOCENÍ A ZÁVĚR

V.1

ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A SMĚRY POKRAČOVÁNÍ PRÁCE

Hlavním tématem diplomové práce byla problematika polohování magnetických těles pomocí elektromagnetického pole. Toto téma je velmi aktuální a jeho rozvoj by mohl mít značný dopad na mnoho odvětví, například pro urychlení a hlavně miniaturizaci výrobních a zpracovatelských systémů.

V.1.1 ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

V první části práce bylo definováno několik základních pojmů, byla vymezena oblast řešení dané problematiky a zmíněna motivace práce. Hlavní část úvodu byla věnována současnému stavu poznání dané problematiky.

Ve druhé části práce bylo využito dosažených teoretických znalostí z rešerše k návrhu polohovacího aktuátoru a robota. Při návrhu aktuátoru bylo využito matematického modelování a simulací. Díky modelům a simulacím byl vybrán návrh k následné výrobě.

Praktická třetí část práce se zaměřila na stavbu a testování dvou experimentálních zařízení. První experimentální zařízení nazvané MagSnail posloužilo hlavně k otestování funkčnosti teoretických předpokladů. Došlo k testování algoritmu spínání, zahřívání platformy, nosnosti a rychlosti robota. Dále byla zkoumána možnost kombinace platformy s úchopovými systémy využívajícími magnetic-

kou kapalinu či elektroadhezi [8] [10]. Díky poznatkům z platformy MagSnail byla navržena a vyrobena platforma MagStriver, na které bylo provedeno komplexní měření. MagStriver doznal mnoha vylepšení. Došlo k celkovému zmenšení, přidání možnosti polohování ve dvou osách, zlepšení nosnosti, snížení energetické náročnosti, snížení zahřívání a také k redukci spínacích prvků. Dále byla pro MagStriver navržena a vytištěna krabička na 3D tiskárně. Platforma byla také obohacena o joystick pro lepší manuální ovladatelnost a o display zobrazující aktuální procesy robota.

Poslední část práce se zabývala celkovou finanční náročností stavby, shrnutím technických údajů finálního prototypu a hlavně možným komerčním využitím. Platforma by se také dala využít při laboratorním polohování se vzorky, polohováním pod mikroskopem, rozmístění elektrosoučástí na fólii či při separaci odpadu.

V.1.2 SMĚRY POKRAČOVÁNÍ PRÁCE

Dosavadní práce položila základy polohovacímu systému pomocí elektromagnetického pole, jehož vývoj bude samozřejmě dále pokračovat. Jedním z hlavních směrů tohoto vývoje bude zajištění nezávislého pohybu robotů, který by mohl být docílen přidáním nové vrstvy s cívkou a tím by bylo vytvořeno nulové magnetické pole. Další pokračování práce bude lokalizace, která může být provedena pomocí kamerového systému nebo pomocí výpočtu změny magnetického pole vytvořeného robotem. Další možnosti zdokonalení by mohly být přidáním stupně volnosti, spínáním pomocí generátoru signálu, či docílením levitace robota. Finálním vylepšením by byla implementace kolektivního myšlení na nezávisle se pohybující roboty a spolupráce jejich velkého množství.

LITERATURA

- [1] Miroslav Husák. Mikrosenzory a mikroaktuátory. Technical report, ISBN 978-80-200-1478-8, 2008.
- [2] Robot. in: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. <https://cs.wikipedia.org/wiki/Robot>. cit. 11.12.2016.
- [3] C Ronald Kube and Hong Zhang. Collective robotics: From social insects to robots. *Adaptive behavior*, 2(2):189–218, 1993.
- [4] Microfactory. in: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. <https://en.wikipedia.org/wiki/Microfactory>. cit. 11.12.2016.
- [5] Microfactory platform for smart manufacturing. sri international [online]. <https://www.sri.com/work/projects/microfactories-for-smart-manufacturing>. cit. 11.12.2016.
- [6] Letecká mapa. in: mapy.cz [online]. <https://mapy.cz/>. cit. 08.05.2017.
- [7] N Arora, MU Khan, L Petit, and C Prella. A planar electromagnetic actuator based on two layer coil assembly for micro applications. In *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2014 IEEE/ASME International Conference on*, pages 174–179. IEEE, 2014.
- [8] Vojtěch Skřivan. *Úchopový systém využívající magnetické kapaliny*. Zápa-
dočeská univerzita v Plzni, 2017.

- [9] Tomáš Šašek. *Paralelní polohování miniaturních robotů pomocí magnetického pole*. Západočeská univerzita v Plzni, 2017.
- [10] Jan Fessler. *Úchopový systém využívající elektroadhezi*. Západočeská univerzita v Plzni, 2017.
- [11] Minimally-invasive eye surgery on the horizon as magnetically-guided microbots approach clinical trials [online]. <http://robohub.org/minimally-invasive-eye-surgery-on-the-horizon-as-magnetically-guided-microbots-move-toward-clinical-trials>. cit. 21.2.2017.
- [12] Ronald E Pelrine, Gregory K Myers, Annjoe Wong-Foy, James A Herson, and Thomas P Low. Levitated micro-manipulator system, November 26 2013. US Patent 8,593,016.
- [13] Ron Pelrine, Annjoe Wong-Foy, Brian McCoy, Dennis Holeman, Rich Mahoney, Greg Myers, Jim Herson, and Tom Low. Diamagnetically levitated robots: An approach to massively parallel robotic systems with unusual motion properties. In *Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on*, pages 739–744. IEEE, 2012.
- [14] Ioan Alexandru Ivan, Gilgueng Hwang, Joël Agnus, Micky Rakotondrabe, Nicolas Chaillet, and Stéphane Régnier. First experiments on magpier: A planar wireless magnetic and piezoelectric microrobot. In *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on*, pages 102–108. IEEE, 2011.
- [15] Hoyeon Kim, Jamel Ali, U Kei Cheang, Jinwoo Jeong, Jin Seok Kim, and Min Jun Kim. Micro manipulation using magnetic microrobots. *Journal of Bionic Engineering*, 13(4):515–524, 2016.

- [16] Michael P Kummer, Jake J Abbott, Bradley E Kratochvil, Ruedi Borer, Ali Sengul, and Bradley J Nelson. Octomag: An electromagnetic system for 5-dof wireless micromanipulation. *IEEE Transactions on Robotics*, 26(6):1006–1017, 2010.
- [17] S Tasoglu, E Diller, S Guven, M Sitti, and U Demirci. Untethered micro-robotic coding of three-dimensional material composition. *Nature communications*, 5, 2014.
- [18] Laurent Arcese, Matthieu Fruchard, and Antoine Ferreira. Endovascular magnetically guided robots: navigation modeling and optimization. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 59(4):977–987, 2012.
- [19] Patrick Ryan and Eric Diller. Five-degree-of-freedom magnetic control of micro-robots using rotating permanent magnets. In *Robotics and Automation (ICRA), 2016 IEEE International Conference on*, pages 1731–1736. IEEE, 2016.
- [20] Ackerman, evan. steerable, motorized cyborg sperm-bots take on infertility. *ieee spectrum* [online]. <http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/medical-robots/spermbots-take-on-infertility>. cit. 11.12.2016.
- [21] KL MOORE and TVN PERSAUD. Zrození člověka. praha: Isv nakladatelství. Technical report, ISBN 80-85866-94-3, 2002.
- [22] Jürgen Rahmer, Christian Stehning, and Bernhard Gleich. Spatially selective remote magnetic actuation of identical helical micromachines. *Science Robotics*, 2(3):eaal2845, 2017.

Literatura

- [23] Shuhei Miyashita, Eric Diller, and Metin Sitti. Two-dimensional magnetic micro-module reconfigurations based on inter-modular interactions. *The International Journal of Robotics Research*, 32(5):591–613, 2013.
- [24] François Nadal and Eric Lauga. Asymmetric steady streaming as a mechanism for acoustic propulsion of rigid bodies. *Physics of Fluids*, 26(8):082001, 2014.
- [25] Baohu Dai, Jizhuang Wang, Ze Xiong, Xiaojun Zhan, Wei Dai, Chien-Cheng Li, Shien-Ping Feng, and Jinyao Tang. Programmable artificial phototactic microswimmer. *Nature Nanotechnology*, 11(12):1087–1092, 2016.
- [26] Timothy R Kline, Walter F Paxton, Thomas E Mallouk, and Ayusman Sen. Catalytic nanomotors: Remote-controlled autonomous movement of striped metallic nanorods. *Angewandte Chemie International Edition*, 44(5):744–746, 2005.
- [27] Bahareh Behkam and Metin Sitti. Bacterial flagella-based propulsion and on/off motion control of microscale objects. *Applied Physics Letters*, 90(2):023902, 2007.
- [28] Gabriel Loget and Alexander Kuhn. Electric field-induced chemical locomotion of conducting objects. *Nature communications*, 2:535, 2011.
- [29] Tomáš Bauer. *Analýza pohybu objektů v posloupnosti obrazů*. Západočeská univerzita v Plzni, 2016.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1	Letecká fotografie průmyslové zóny Borská pole: A) v roce 2003 B) v roce 2017 [6]	4
Obrázek 2	Ilustrace planárních systémů polohování A) cívky sloužící k polohování ve směru x [12]; B) složení čtyř cívek sloužících k polohování x, y [12]; C) ukázka kombinace několika magnetů [7]	9
Obrázek 3	Systémy planárního polohování A) fotografie systému čtyř cívek MagPier [14]; B) prostorové rozložení cívek [15]; C) fotografie robota použitého v systému MagPier [14]; D) fotografie C-robotu [15]; E) ukázka možné orientace robota tvaru C [15]	10
Obrázek 4	Systémy třídimenzionálního polohování A) systém OctoMag [16]; B) robot v podobě skalpelu připevněném na permanentním magnetu systému OctoMag [16]; C) polohovací systém tvořený osmi cívkami [17]; D) fotografie robota používaného systémem osmi cívek [17]	12
Obrázek 5	Systémy třídimenzionálního polohování A) soustava permanentních magnetů tvořící pohybový systém [19]; B) permanentní magnet upevněný na motor [19]; C) grafické znázornění Spermbota [20]; D) fotografie Spermbota při experimentu [20]	14

Seznam obrázků

Obrázek 6	Systém paralelního polohování A) fotografie robota z experimentu [22]; B) prostorové rozložení cívek [22]; C) fotografie plastových šroubů s permanentními magnety [22]	15
Obrázek 7	Grafické zobrazení obdélníkových cívek, vlevo antisymetrické a vpravo symetrické zapojení	18
Obrázek 8	Grafické zobrazení kruhových cívek	20
Obrázek 9	Grafické zobrazení rozloženého provedení cívek	20
Obrázek 10	Definiční oblast modelu magnetického pole	22
Obrázek 11	Rozložení magnetické indukce: obdélníkové zapojení (parametry jsou zmíněny v tab. 1)	24
Obrázek 12	Rozložení magnetické indukce: kruhové zapojení (parametry jsou zmíněny v tab. 2)	25
Obrázek 13	Rozložení magnetické indukce rozloženého provedení . .	25
Obrázek 14	Zobrazení magnetické indukce v simulaci u rozloženého provedení, posloupnost spínání a polarita proudů je blíže vysvětlena v podkapitole iii.1.2	26
Obrázek 15	Graf síly působící mezi dvěma magnety v závislosti na jejich vzájemné vzdálenosti	29
Obrázek 16	A) vzdálenost mezi magnety u provedení čtyř magnetů, B) návrh robota se čtyřmi magnety, C) vzdálenost mezi magnety u provedení devíti magnetů, D) návrh robota s devíti magnety	30
Obrázek 17	Simulace sil působících na robota. F_{mx} je síla působící v ose x (způsobuje pohyb robota), F_{my} síla působící na robota v ose y (ovlivňuje tření). Zkratka aprox. znamená aproximování výsledků sedmým stupněm.	33

Seznam obrázků

Obrázek 18	Průběhy sil působících na robota, kde Ω_1 je kladně napájený vodič, Ω_2 je vodič bez napájení, Ω_3 je záporně napájený vodič, F_{mx} je x . složka síly působící pohyb robota, F_{my} je třecí síla respektující nadzvedávání a přitlačování robota magnetickým polem cívek, F_{mxmax} je maximální hodnota síly působící na magnet od cívky, F_{mymax} je maximální třecí síla F_{mymin} je minimální třecí síla	34
Obrázek 19	Výsledky simulace robota	35
Obrázek 20	Fotografie z vysokorychlostní kamery	35
Obrázek 21	Platforma MagSnail s roboty vybavené magnetickým úchopovým systémem, kde A) pracovní plocha, B) robot s permanentním magnetem, C) robot s magnetickou kapalinou, D) úchopový systém, F) směr pohybu	38
Obrázek 22	Grafické zobrazení spínání osmi spínacích prvků a posunu robota při jednotlivých sepnutí: A) první fáze: sepnutí první cívky, B) druhá fáze: sepnutí druhé cívky, C) třetí fáze: sepnutí první cívky inverzně, D) čtvrtá fáze: sepnutí druhé cívky inverzně	40
Obrázek 23	Ilustrace časového průběhu napětí při spínání jednotlivých cívek a čísla sepnutých spínačů	41
Obrázek 24	A) robot s devíti magnety, B) robot se čtyřmi magnety	41
Obrázek 25	A) návrh zamezení kmitání pomocí spínání a setrvačnosti B) návrh zamezení kmitání robota díky spojitému pohybu	42

Seznam obrázků

Obrázek 26	Ohřev platformy MagSnail pořízený termokamerou: A) fotografie rozložení teploty v první minutě, B) fotografie rozložení teploty ve třetí minutě, C) fotografie rozložení teploty v páté minutě	43
Obrázek 27	Grafické zobrazení spolupráce robotů s magnetickým úchopovým systémem	44
Obrázek 28	A) elastická elektroda vyrobená pomocí uhlíkového prášku a silikonu B) flexibilní elektroda vyrobena pomocí technologie Aerosol Jet Printing	45
Obrázek 29	Grafické znázornění modifikace pro jeřáb vlevo a fotografie vpravo kde, A) je nahromaděná magnetická kapalina, B) je zbytková magnetická kapalina, C) je platforma MagSnail, D) jsou magnety, E) je robot a F) jsou elektrody	46
Obrázek 30	Návrh platformy MagStriver s detailním výřezem na propojení vodivých cest	48
Obrázek 31	První verze vyrobená na fréze ZČU, porovnání velikosti magnetu a jedné koruny české	49
Obrázek 32	A) velký robot osazený devíti magnety, B) velký robot osazený čtyřmi magnety, C) malý robot osazený čtyřmi magnety	49
Obrázek 33	Druhá verze MagStriver vyrobená s prokovenými otvory, s položeným robotem osazeným devíti magnety	50
Obrázek 34	Grafické zobrazení spínání čtyř spínacích prvků a posunu robota při jednotlivých sepnutí, A) první fáze, B) druhá fáze, C) třetí fáze, D) čtvrtá fáze	51

Seznam obrázků

Obrázek 35	Výsledky měření energetické náročnosti při rychlost spínání 50 ms a vstupním napětí 2,5 V, kde a, b, c, d značí jednotlivé cívky	53
Obrázek 36	Simulace pohybu robota A) bez překmitávání, B) s překmitáváním	54
Obrázek 37	Výsledky měření dynamiky při rychlosti spínání 25 ms a vstupním napětí 2,5 V	55
Obrázek 38	Výsledky měření chybovosti: A) počet kroků 6, rychlost spínání 50 ms, napětí 2,5 V, B) počet kroků 6, rychlost spínání 50 ms, napětí 3,0 V, C) počet kroků 6, rychlost spínání 25 ms, napětí 2,5 V, D) počet kroků 6, rychlost spínání 25 ms, napětí 3,0 V, E) počet kroků 12, rychlost spínání 50 ms, napětí 2,5 V, F) počet kroků 6, rychlost spínání 50 ms, napětí 2,5 V, 2 roboti	56
Obrázek 39	A) robot s vaničkou na kapalinu B) robot bez vaničky	57
Obrázek 40	Ohřev platformy MagStriver pořízený termokamerou: A) rozložení teploty před spuštěním platformy B) rozložení teploty v první minutě C) rozložení teploty ve třetí minutě D) rozložení teploty v páté minutě	58
Obrázek 41	Srovnání robotů: A) robot velký MagSnail, B) robot malý MagSnail, C) robot velký MagStriver, D) robot malý MagStriver	59
Obrázek 42	Kompletní platforma MagStriver: A) pracovní deska, B) miniaturní robot, C) display zobrazující směr a aktuální rychlost, D) joystick pro manuální ovládání, E) mikroprocesor Arduino Mega, F) relé modul, G) propojovací deska	62

Seznam obrázků

Obrázek 43	Ukázka využití platformy k separaci odpadu	64
Obrázek 44	Ohřev platformy MagSnail pořízený termokamerou: A) fotografie rozložení teploty před měřením	75
Obrázek 45	Ohřev platformy MagSnail pořízený termokamerou: B) fotografie rozložení teploty ve druhé minutě, C) fotografie rozložení teploty ve čtvrté minutě	76
Obrázek 46	Ohřev platformy MagStriver pořízený termokamerou: A) před začátkem měření B) ve druhé minutě, C) ve čtvrté minutě.	77
Obrázek 47	Výsledky měření energetické náročnosti při rychlost spínání 25 ms a vstupním napětí 3 V, kde a, b, c, d jsou jednotlivé cívky.	78
Obrázek 48	Výsledky měření energetické náročnosti při rychlost spínání 100 ms a vstupním napětí 2 V, kde a, b, c, d jsou jednotlivé cívky.	79

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1	Tabulka s parametry simulovaných obdélníkových cívek	18
Tabulka 2	Tabulka s parametry simulovaných kruhových cívek . . .	19
Tabulka 3	Konvergence řešení modelu	23
Tabulka 4	Energetická náročnost MagStriver	52
Tabulka 5	Finanční náročnost platformy MagStriver	61
Tabulka 6	Technické specifikace MagStriver	63

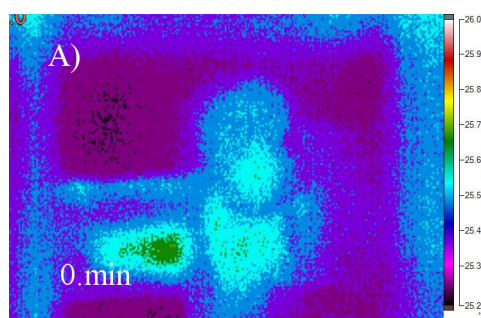
Část VI

PŘÍLOHA

Vi.1

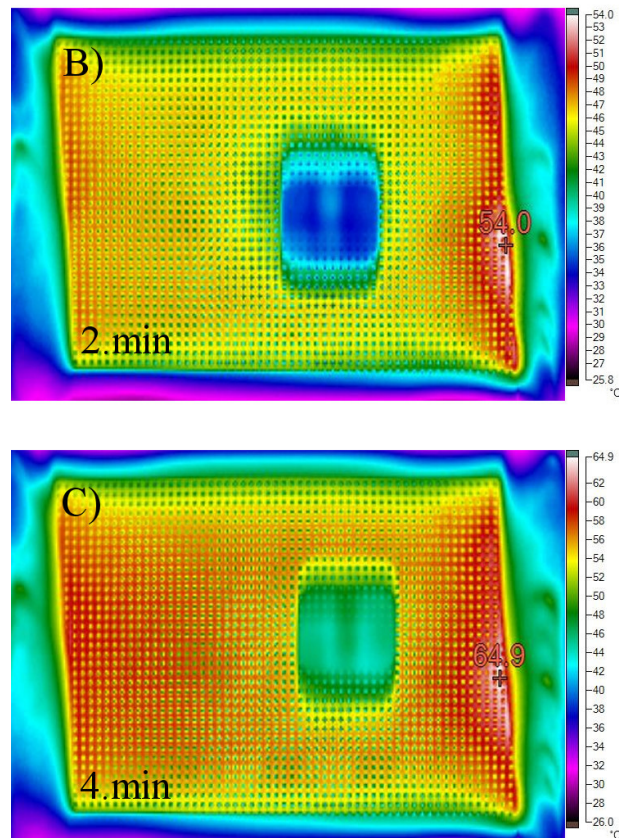
MAGSNAIL

VI.1.1 ZAHŘÍVÁNÍ MAGSNAIL



Obr. 44: Ohřev platformy MagSnail pořízený termokamerou: A) fotografie rozložení teploty před měřením

vi.1.1 ZAHŘÍVÁNÍ MAGSNAIL

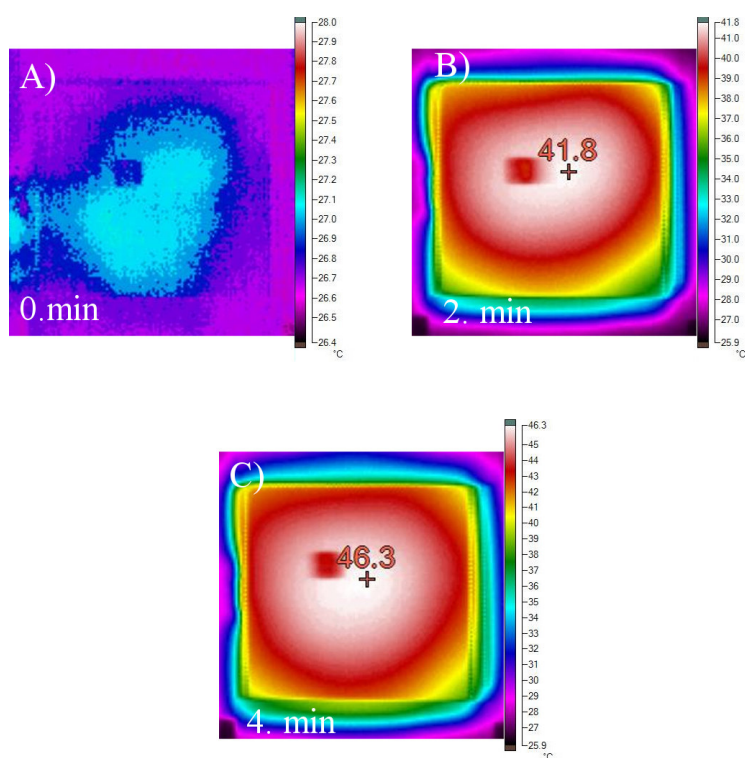


Obr. 45: Ohřev platformy MagSnail pořízený termokamerou: B) fotografie rozložení teploty ve druhé minutě, C) fotografie rozložení teploty ve čtvrté minutě

vi.2

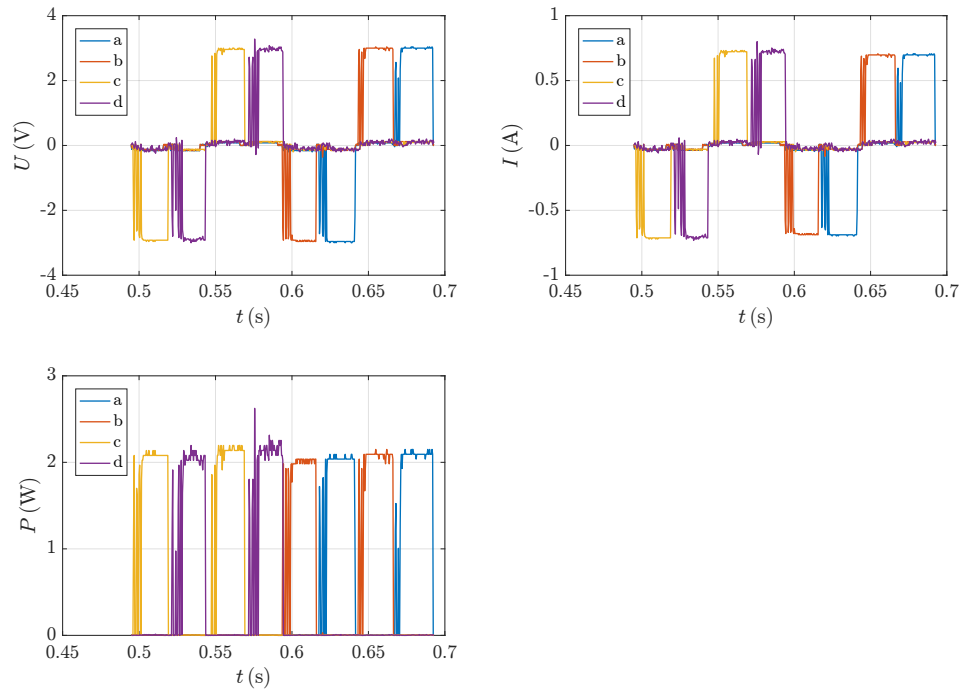
MAGSTRIVER

VI.2.1 ZAHŘÍVÁNÍ MAGSTRIVER



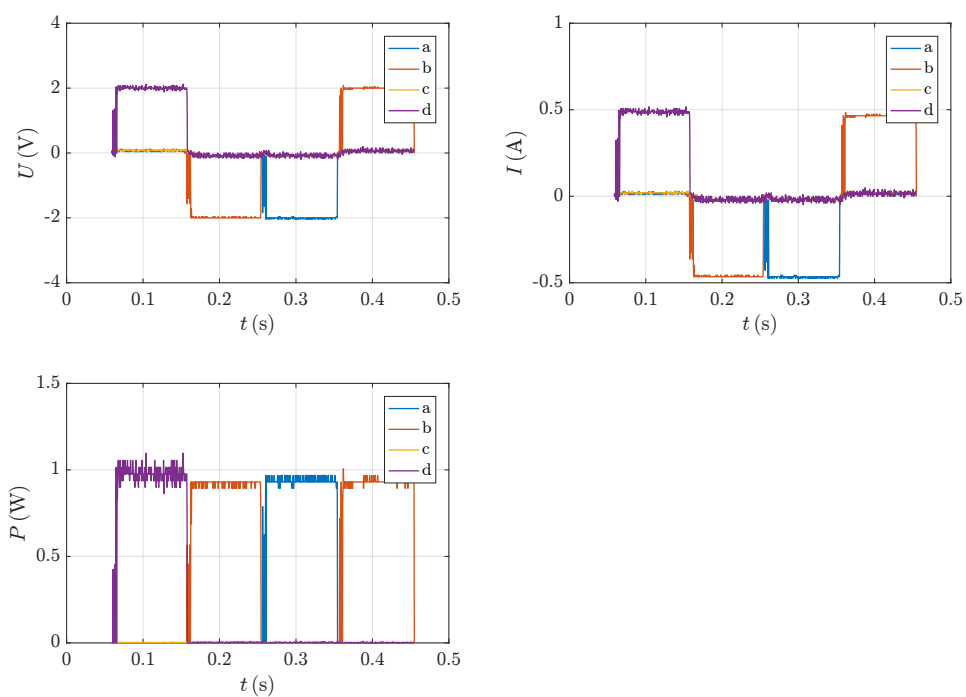
Obr. 46: Ohřev platformy MagStriver pořízený termokamerou: A) před začátkem měření B) ve druhé minutě, C) ve čtvrté minutě.

VI.2.2 ENERGETICKÁ NÁROČNOST



Obr. 47: Výsledky měření energetické náročnosti při rychlosti spínání 25 ms a vstupním napětí 3 V, kde a, b, c, d jsou jednotlivé cívky.

VI.2.2 ENERGETICKÁ NÁROČNOST



Obr. 48: Výsledky měření energetické náročnosti při rychlosti spínání 100 ms a vstupním napětí 2 V, kde a, b, c, d jsou jednotlivé cívky.