

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A  
TELEKOMUNIKACÍ**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Úchopový systém využívající magnetické kapaliny**

**Bc. Vojtěch Skřivan**

**2017**

*Originál (kopie) zadání BP/DP*

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce se zabývá návrhem a realizací úchopového systému využívajícího magnetickou kapalinu určeného primárně pro aplikace magneticky řízených robotů. Teoretická část diplomové práce se zaměřuje na současně vyvíjené aplikace magneticky řízených mikro-robotů a magnetickou kapalinu a její vlastnosti. Vlastní návrhy úchopových systémů lze rozdělit do dvou hlavních skupin: úchopové systémy využívající flexibilního váčku s magnetickou kapalinou a úchopové systémy využívající směs magnetické kapaliny a silikonu. Diplomová práce je dále zaměřena na výrobu prototypů navržených úchopových systémů, experimentální ověření jejich funkčnosti a princip jejich využití.

## **Klíčová slova**

Magnetická kapalina, magnetické nanočástice, nosná kapalina, úchopový systém, magneticky ovládaní roboti, saturační magnetizace, flexibilní váček.

## **Abstract**

This master thesis deals with the design and realization of a ferrofluid based gripper system which is primarily designed for magnetically guided robot applications. The theoretical part of the master thesis focuses on the currently developed applications of magnetically guided micro-robots and ferrofluids and their properties. The actual designs of the gripper system can be divided into two main groups: gripper systems that uses a ferrofluid filled flexible pocket and gripper systems that uses a mixture of ferrofluid and silicon. The master thesis is further focused on the designed gripper system prototypes production, experimental verification of their functionality and the principle of their utilization.

## **Key words**

Ferrofluid, magnetic nanoparticles, carrier fluid, gripper system, magnetically guided robots, gripper, saturation magnetization, flexible pocket.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....  
Podpis

V Plzni dne 18.5.2017

Vojtěch Skřivan

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Františku Machovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

# OBSAH

<b>OBSAH</b> .....	<b>7</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>10</b>
<b>I SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ</b> .....	<b>11</b>
I.1 OCTOMAG .....	12
I.2 SPERMBOT.....	15
I.3 MMT - MAGNETICALLY DRIVEN MICRO TOOL .....	16
I.4 STARFISH MICROBOTS .....	17
I.5 OCTOBOT .....	18
<b>II MAGNETICKÁ KAPALINA</b> .....	<b>21</b>
II.1 APG SERIES - MAGNETICKÉ KAPALINY PRO AUDIO REPRODUKTORY .....	24
II.2 EFH SERIES – MAGNETICKÉ KAPALINY PRO VZDĚLÁVACÍ APLIKACE .....	25
II.3 EMG SERIES - EXPERIMENTÁLNÍ MAGNETICKÉ KAPALINY .....	26
II.3.1 EMG na vodní bázi.....	26
II.3.2 EMG na olejové bázi .....	26
II.3.3 EMG suché magnetické nano-částice.....	27
<b>III NÁVRH A REALIZACE ÚCHOPOVÉHO SYSTÉMU</b> .....	<b>29</b>
III.1 KONCEPT FLEXIBILNÍHO VÁČKU .....	31
III.2 MĚŘENÍ SILOVÝCH ÚČINKŮ FLEXIBILNÍHO VÁČKU S MAGNETICKOU KAPALINOU	32
III.3 ÚCHOPOVÝ SYSTÉM VYUŽÍVAJÍCÍ LATEXOVÉHO VÁČKU S MAGNETICKOU	
KAPALINOU .....	35
III.3.1 <i>Koncept 1: Uzavření latexového váčku pomocí plastového víčka</i> .....	35
III.3.2 <i>Koncept 2: Uzavření latexového váčku ovázáním</i> .....	36
III.3.3 <i>Koncept 3: Lepení latexového váčku mezi dvě plastové fólie</i> .....	36
III.3.4 <i>Koncept 4: „Caterpillar“</i> .....	41
III.3.5 <i>Implementace na systém MagSnail</i> .....	42
III.3.6 <i>Vysychání magnetické kapaliny</i> .....	44
III.3.7 <i>Systém „Upside Down MagSnail“</i> .....	46
III.4 ÚCHOPOVÝ SYSTÉM VYUŽÍVAJÍCÍ SILIKONOVÉHO VÁČKU S MAGNETICKOU	
KAPALINOU .....	48
III.5 ÚCHOPOVÝ SYSTÉM VYUŽÍVAJÍCÍ SMĚS MAGNETICKÉ KAPALINY A SILIKONU.....	52
III.5.1 <i>Koncept 1: „Beak“</i> .....	55
III.5.2 <i>Koncept 2: „Gekon“</i> .....	58
III.5.3 <i>Plánovaný vývoj</i> .....	59
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>61</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>64</b>

<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>1</b>
PŘÍLOHA A. MĚŘENÍ SILOVÝCH ÚČINKŮ FLEXIBILNÍHO VÁČKU.....	1
PŘÍLOHA B. MĚŘENÍ SILOVÝCH ÚČINKŮ SMĚSI MAGNETICKÉ KAPALINY A SILIKONU ..	10
PŘÍLOHA C. VÝVOJOVÉ FÁZE VÝROBY FLEXIBILNÍHO VÁČKU .....	14
PŘÍLOHA D. SILIKONY – TECHNICKÁ SPECIFIKACE .....	19



## ÚVOD

Diplomová práce se zabývá návrhem a realizací úchopového systému využívajícího magnetickou kapalinu. Navrhované systémy jsou určeny primárně pro aplikace magneticky řízených robotů.

Řízení robotů pomocí magnetického pole je nově se rozvíjející odvětví, které ukazuje obrovský potenciál v mnoha lékařských a technických oborech. Z velké části se jedná o řízení robotů o velmi malých rozměrech, u kterých není možné, aby nesly vlastní zdroj energie, a proto musí jejich manipulace být zajištěna pomocí vnějšího magnetického pole. Vzhledem k malé velikosti robotů se obvykle jedná o pasivní roboty pohybující se na velmi malých rozměrových škálách. Cílem této práce je navrhnout úchopový systém ovládaný pomocí vnějšího magnetického pole s využitím magnetické kapaliny, který bude schopný rozšířit možnosti pasivních magneticky ovládaných robotů.

První část práce se zaměřuje na vybrané aplikace současně vyvíjených magneticky řízených mikro-robotů a jejich úchopových systémů. Ve druhé části diplomové práce je proveden rozbor magnetických kapalin s ohledem na jejich vlastnosti a oblast využití. Třetí část práce se zabývá vlastním návrhem a realizací úchopových systémů využívajících magnetickou kapalinu. Jednotlivé návrhy lze rozdělit do dvou hlavních oblastí: úchopové systémy využívající flexibilní váček naplněný magnetickou kapalinou a úchopové systémy využívající směs magnetické kapaliny a silikonu.

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

$B$	T	magnetická indukce
$B_r$	T	remanentní magnetická indukce
$B_s$	T	saturační magnetizace
$\mu_r$	-	relativní permeabilita
$F$	N	síla
$g$	$m/s^2$	gravitační zrychlení
$m$	g	hmotnost
$U$	V	elektrické napětí
$I$	A	elektrický proud

---

## **I SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ**

---

V této kapitole jsou uvedeny současně vyvíjené aplikace magneticky řízených robotů, pro které je úchopový systém využívající magnetickou kapalinu primárně navrhován. Kromě magneticky řízených robotů je popsán i systém Octobot, který souvisí s vývojem směsi magnetické kapaliny a silikonu.

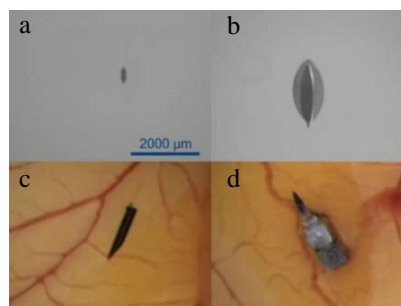
## **I.1 Octomag**

Octomag vyvinutý v laboratoři MSRL ETH Zurich vznikl na základě požadavku vytvořit precizní manipulační systém pro ovládání mikro-robotů velmi malých rozměrů pro použití v lékařských aplikacích. Na rozdíl od jiných aplikací jsou tyto mikro-roboty pohybuje se uvnitř lidského těla příliš malí na to, aby mohli přenášet vlastní zdroj energie. Systém Octomag proto využívá magnetické pole cívek k bezdrátovému ovládání mikro-robotů z magneticky měkkého materiálu. [1] [3]

První koncept tohoto systému (*Obr. 1.1.1*) byl navržen pro méně invazivní a bezpečnější operaci rohovky. Manipulační systém je tvořen 8 cívkami umístěnými v jedné hemisféře nad pacientovým okem. Na základě velikosti proudu protékajícího jednotlivými cívkami je ovlivňováno elektromagnetické pole v operačním prostoru mikro-robotů. Systém je schopen orientovat elektromagnetické pole s magnetickou indukcí až 50 mT v jakémkoli směru ve třidimenzionálním prostoru. Jde o první bezdrátový magneticky ovládaný systém umožňující 5 stupňů volnosti. Systém v současné době nemá jinou zpětnou vazbu než obraz snímáný kamerou. [2] [3]

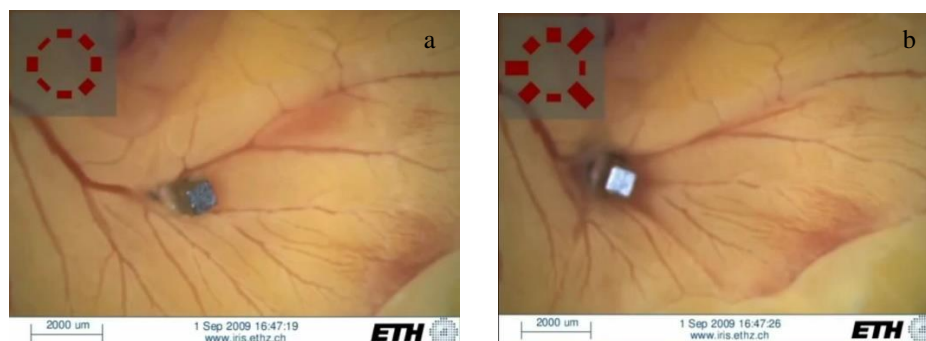


Obr. 1.1.1 – Manipulační systém Octomag [2]



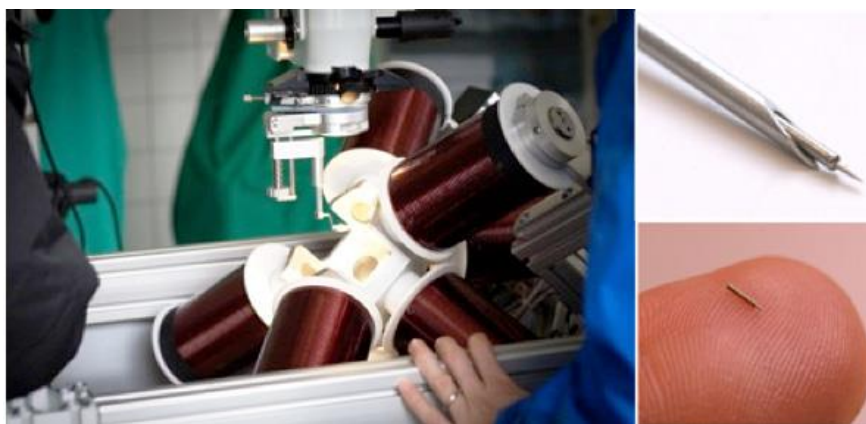
Obr. 1.1.2.a/b/c/d – Verze testovaných mikro-robotů [2]

Octomag umožňuje ovládání různých druhů pasivních mikro-robotů o velikostech v řádu stovek  $\mu\text{m}$ . Zatím byly testovány mikro-roboti ze sloučenin kobaltu a niklu (Obr. 1.1.2.a, 1.1.2.b), nerezové oceli (Obr. 1.1.2.c) nebo permanentního magnetu (Obr. 1.1.2.d). Počáteční testy manipulace a polohování mikro-robotů byly provedeny v silikonovém oleji s viskozitou odpovídající směsi, která se používá jako náhrada po vitrektomii (odstranění sklivce). V rámci dalšího testování bylo využito mikro-robot z permanentního magnetu opatřený jehlou pro proražení krevní cévy chorioalantoidní membrány kuřete jako simulace operace rohovky. Mikro-robot byl schopen velice přesného pohybu a polohování (Obr. 1.1.3.a) a současně byl schopen vyvinout dostatečnou sílu k proražení krevní cévy a potenciálnímu dopravení enzymů nebo látek proti srážení krve do struktury oka (Obr. 1.1.3b). [2] [3]



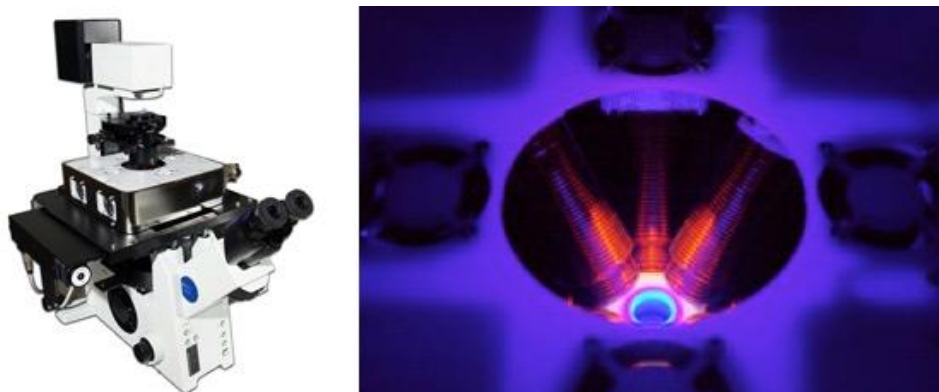
Obr. 1.1.3.a/b – Testování mikro-roboty z permanentního magnetu [2]

Další generace systému Octomag (*Obr. 1.1.4*) byla testována při in-vivo operaci králičího oka. U tohoto systému byl použit mikro-robot o velikosti 285  $\mu\text{m}$ . Systém Octomag ukazuje vysoký potenciál použití této technologie v chirurgických aplikacích. [2] [3]



*Obr. 1.1.4 – Nová generace systému Octomag [2]*

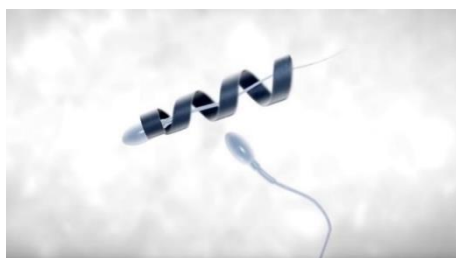
Další koncept tohoto systému s označením Minimag (*Obr. 1.1.5*) je v podstatě zmenšená verze systému Octomag. Cívky systému Minimag jsou menší a jsou umístěny velmi blízko vedle sebe, tím redukuje operační prostor na 1  $\text{cm}^2$  a umožňují dosáhnouti mnohem vyšších sil. Systém může být integrován do klasických nebo invertovaných mikroskopů. [2] [3]



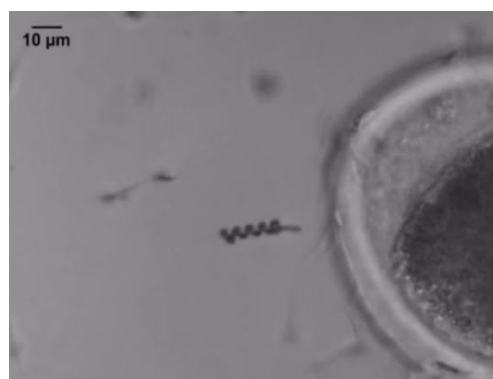
*Obr. 1.1.5 – Systém Minimag [2]*

## I.2 Spermibot

Spermibot vyvinutý v laboratoři IFW Dresden v Německu slouží jako nástroj k in-vitro oplodnění. Vychází ze skutečnosti, že jedním z hlavních důvodů neplodnosti je nízká hemživost spermií. Spermie jsou zdravé, ale nedostatečně pohyblivé. Spermibot tvoří kovová spirála velmi malých rozměrů schopná natočit se na bičík spermie a následně se spermií manipulovat (*Obr. 1.2.1*). Vlastní pohyb mikro-roboty je řízen pomocí vnějšího točivého elektromagnetického pole. Změnou orientace elektromagnetického pole je možné dopravit Spermibot se zachycenou spermií až k vajíčku a dosáhnout oplodnění (*Obr. 1.2.2*). Předtím, než bude Spermibot použitelný na lidských buňkách, musí být provedeny další testy a simulace. [4] [5]



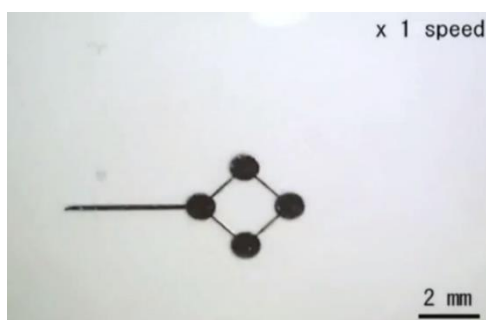
*Obr. 1.2.1 – Ilustrace systému Spermibot [6]*



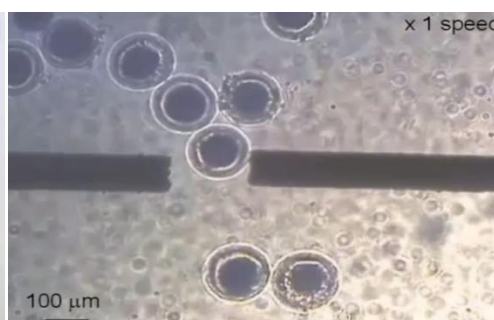
*Obr. 1.2.2 – Doprava spermie k vajíčku [4]*

### I.3 MMT - Magnetically Driven Micro Tool

MMT je přesný polohovací systém velmi malých rozměrů tvořený dvěma proti sobě umístěnými mikro-fluidními čipy ve tvaru jehlice ovládanými pomocí magnetického pole určený pro bio-medicínské aplikace (*Obr. 1.4.1*). Pro polohování nástroje využívá systém čtyř horizontálně orientovaných permanentních magnetů. Horizontálně orientovaný permanentní magnet nepřitahuje nástroj tak velkou silou a omezuje tak tření při pohybu nástroje po pracovní desce. Přesnost polohování horizontálně umístěným magnetem se pohybuje v řádu desítek  $\mu\text{m}$ . Za účelem dále snížit tření je mezi vlastní nástroj a permanentní magnet umístěna piezoelektrická keramická deska vyvolávající ultrazvukové vibrace v důsledku působení časově proměnného elektrického pole. Jemným vibrováním polohovacího nástroje je dosaženo velmi nízkého tření a přesnosti polohování až  $0.1 \mu\text{m}$ . [8]



*Obr. 1.4.1 – Mikro-fluidní čip MMT [8]*



*Obr. 1.4.2 – Manipulace s buňkami pomocí systému MMT [8]*

Systém MMT je díky silnému magnetickému poli schopný vyvinout síly desítek mN a posunout objekty až 1000krát těžší než je vlastní nástroj. Přesnost a rychlá odezva systému umožňuje uchopení, transport nebo rotaci buněk (*Obr. 1.4.2*). [8]



## I.4 Starfish Microbots

Jedná se o speciální úchopový systém ve tvaru hvězdice vyvinutý v Johns Hopkins University, jehož první koncept je navržený pro odebrání vzorků z lidského střeva (*Obr. 1.3.1*). Hvězdice o velikosti menší než 1 mm jsou vyráběné z materiálů citlivých na teplotu, pH nebo enzymy. [7]

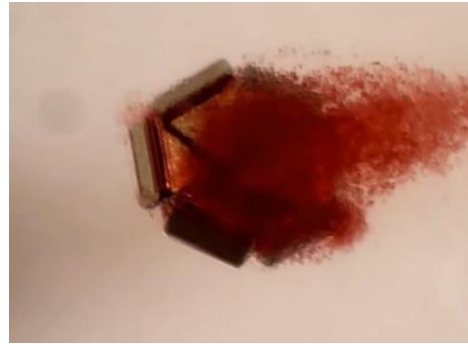


*Obr. 1.3.1 – Starfish Microbots [7]*

Hvězdice citlivé na teplotu jsou navrženy tak, aby došlo sevření chapadel kolem vzorku tkáně při jejich vystavení teplotě lidského těla. Hvězdice jsou ve stovkách vypuštěny do střeva (*Obr. 1.3.2*), kde obstarají vzorky pro histologické vyšetření, kterým lze prokázat například nádorová onemocnění. Následně jsou sesbírány endoskopicky pomocí permanentního magnetu nebo z pacientovy stolice. Při in-vivo testech ve střevech prasat bylo zaznamenáno, že zhruba dvě třetiny hvězdic nezachytí použitelný vzorek, protože se zavřou příliš brzy. Při aplikaci stovek hvězdic je ale i třetina s použitelným vzorkem tkáně dostatečná pro následné histologické vyšetření (*Obr. 1.3.3*). Tento způsob představuje méně invazivní cestu pro odebrání vzorků tkáně. V současné době byl testován pouze na zvířatech. [7]



Obr. 1.3.2 – Endoskopické vypuštění hvězdic do střeva [7]



Obr. 1.3.3 – Sevřená hvězdice se vzorkem tkáně [7]

## 1.5 Octobot

Octobot vyvinutý na Harvardské univerzitě patří do skupiny tzv. soft robots (*Obr. 1.5.1*). V této skupině jde o prvního robota, který je schopen zcela soběstačného pohybu bez jakékoliv elektroniky. [9]

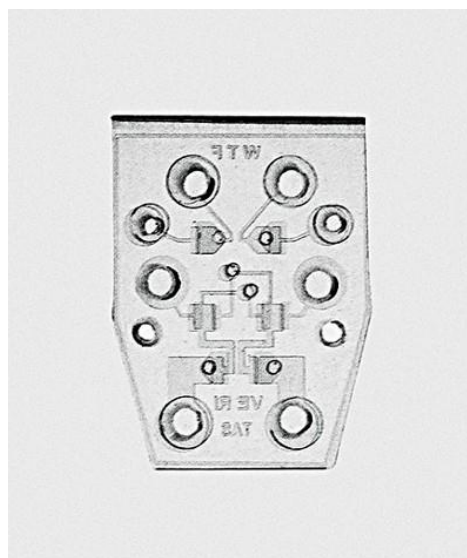


Obr. 1.5.1 – Octobot [9]

Tělo robota ve tvaru chobotnice s osmi chapadly je odlité ze silikonu (*Obr. 1.5.2*). Základem celého systému je tzv. mikro-fluidní kontrolér (*Obr. 1.5.3*) umístěný ve středu robota, který řídí pohyb všech osmi chapadel. Při výrobním procesu jsou pomocí 3D tisku v silikonu vytvořeny dráhy z platinového inkoustu a dráhy ze speciálního inkoustu, který se posléze vypaří a vytvoří trubice pro proudění plynu. [9]



*Obr. 1.5.2 – Odlévání silikonového těla [9]*

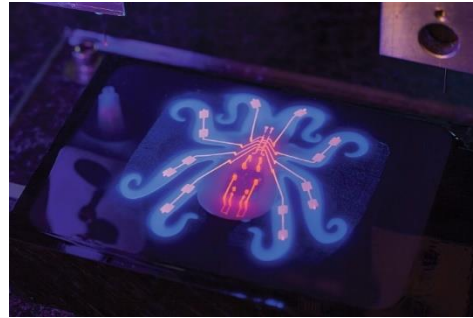


*Obr. 1.5.3 – Mikro-fluidní kontrolér [9]*

Za normálních okolností je Octobot bezbarvý (*Obr. 1.5.4*), do inkoustu pro 3D tisk mohou být ale přidána aditiva, která natištěné dráhy zbarvují nebo zajišťují, aby fluoreskovaly pod UV světlem (*Obr. 1.5.5*). K celkovému utěsnění se poté Octobot 4 dny vypaluje. [9]



Obr. 1.5.4 – Bezbarvý Octobot [9]



Obr. 1.5.5 – Octobot s aditivou [9]

Octobot je pneumatický systém využívající k pohybu peroxid vodíku. Koncentrovaný peroxid vodíku je pumpován do dvou komor uvnitř těla robota. Odtud se tlakem kapalina dostává skrz malé trubice, až narazí na platinu sloužící jako katalyzátor. Dochází k reakci, při které vzniká plyn. Plyn se rozpíná a prochází skrz mikro-fluidní kontrolér, který střídavě směřuje plyn do chapadel robota. Střídavé vypouštění plynu pak zajišťuje pohyb robota, který střídavě zvedá a pokládá svá chapadla. Octobot je schopen pracovat po dobu přibližně 8 minut na 1 ml paliva. [9]

---

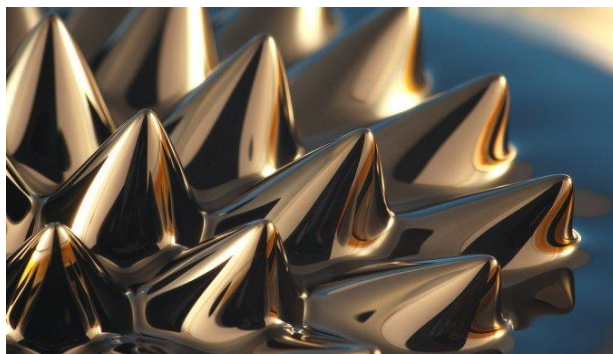
## **II MAGNETICKÁ KAPALINA**

---

Název magnetická kapalina byl poprvé použit Dr. Ronaldem Rosensweigem v roce 1967 ve výzkumu NASA. Cílem bylo řídit tok raketového paliva do raketových motorů ve stavu beztláče pomocí silných magnetů. Tento koncept byl ale nakonec nahrazen jinou technologií. Komercializace magnetických kapalin začala v roce 1968 založením Ferrofluidics Corporation. Jednou z hlavních aplikací magnetické kapaliny zůstává do současnosti použití v reproduktorech. Každý rok je magnetická kapalina instalována do více než 300 milionů reproduktorů. [11]

Magnetická kapalina je tvořena suspenzí magnetických nanočástic v nosné kapalině. Tyto částice s průměrem přibližně 10 nm jsou obaleny stabilizačním detergentem zabraňujícím v jejich shlukování. Detergent je polymerní povrchově aktivní látka tvořená dlouhými řetězci polárních molekul. Každý z řetězců je svým jedním koncem svázán s magnetickou nanočásticí a svým druhým koncem je volněji přitahován molekulami nosného média. Délka těchto řetězců je přibližně 1 až 2 nm. Typická magnetická kapalina objemově obsahuje 5 % pevných magnetických látek, 10 % detergentu a 85 % je tvořeno nosnou kapalinou. [11] [13]

V přítomnosti magnetického pole dochází k polarizaci částic magnetické kapaliny ve směru magnetického pole. Magnetická kapalina je tak vtahována do magnetického pole ve směru jeho intenzity. Působením magnetického pole dochází ke změně některých vlastností magnetické kapaliny. Jednou z nejvýrazněji ovlivněných vlastností je její viskozita, která v přítomnosti magnetického pole prudce vzroste. Časová odezva změny viskozity se pohybuje v řádu ms. V proměnném magnetickém poli dochází vlivem hysterezních ztrát a ztrát vířivými proudy při přemagnetování nanočástic k jejich ohřevu. Teplota magnetické kapaliny představuje další parametr ovlivňující její viskozitu, která s rostoucí teplotou exponenciálně klesá. Změny teploty magnetické kapaliny chemicky znehodnocují detergentové řetězce na povrchu nanočástic, což vede k jejich shlukování a destabilizaci magnetické kapaliny. [13] [14]

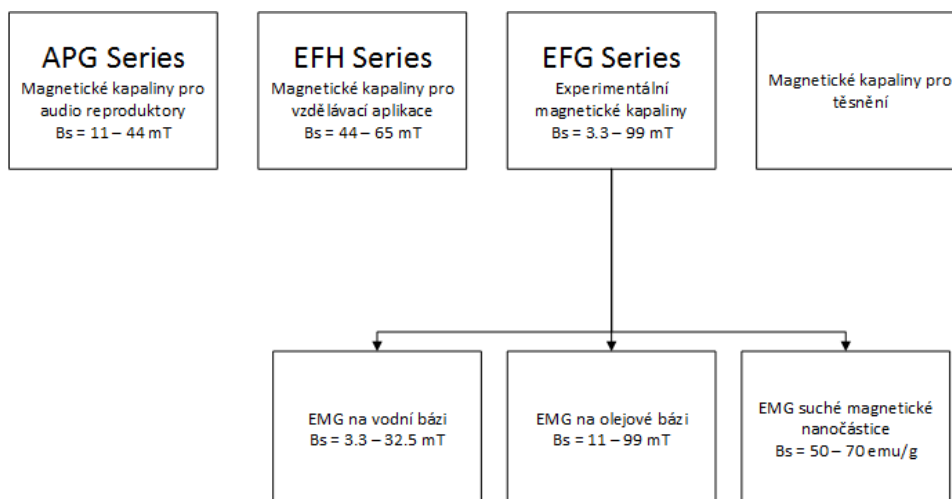


*Obr. 2.1 – Magnetická kapalina v přítomnosti magnetického pole [12]*

Magnetická kapalina byla dříve vyráběna procesem tzv. mokrého mletí. Ten spočíval v dlouhodobém mechanickém drcení feromagnetických částic za přítomnosti detergentového roztoku, po kterém následovala odstředivá separace hrubších částic. V současnosti jsou využívány technologie založené na fyzikálně chemických procesech např. na chemické precipitaci magnetických částic z roztoků železitých solí, elektrolýze, odpařování apod. [13]

Zvláštním typem magnetických kapalin jsou tzv. magnetoreologické kapaliny. Na rozdíl od nanočástic magnetických kapalin je rozměr částic magnetoreologických kapalin přibližně 5  $\mu\text{m}$ . Částice magnetoreologických kapalin jsou tedy výrazně větší a tvoří podstatně větší podíl ve složení kapaliny. V porovnání s magnetickými kapalinami mnohem více zvyšují svoji viskozitu při vložení do magnetického pole. Nevýhodou těchto kapalin je značná degradace limitující jejich použití v praxi. [13]

Jedním z předních světových výrobců magnetických kapalin je společnost FerroTec. Magnetické kapaliny společnosti FerroTec jsou rozděleny do několika skupin dle aplikace. Toto rozdělení magnetických kapalin bude použito i v této práci. Výrobce uváděné vlastnosti jednotlivých magnetických kapalin se liší v závislosti na příslušné skupině. [11]



Obr. 2.2 – Rozdělení magnetických kapalin

Zvláštní skupinu tvoří magnetické kapaliny pro těsnění a vakuové průchodky, které jsou vyvíjeny na základě specifických požadavků konkrétních cílových aplikací a nejsou tak běžně dostupné. [11]

## II.1 APG Series - magnetické kapaliny pro audio reproduktory

Použití magnetické kapaliny v reproduktorech zlepšuje jejich účinnost a dynamické vlastnosti. Cívka napájená akustickým signálem u těchto reproduktorů kmitá v magnetické kapalině, která cívku chladí a snižuje její vibrace. Magnetické kapaliny pro reproduktory jsou založeny na dvou třídách dle nosných kapalin: syntetické uhlovodíky a estery. Obě nosné kapaliny jsou vysoce tepelně stabilní a mají nízkou těkavost. Volba APG magnetické kapaliny se odvíjí od prostředí aplikace (vlhkost, kontakt s vodou, reaktivní plyny apod.) a hodnot viskozity a magnetizace, které optimalizují akustické vlastnosti reproduktorů. [11] [15]



Tab. 2.1.1 – Vlastnosti magnetické kapaliny APG W05 [11]

Nosná kapalina	syntetický esterový olej
Saturační magnetizace	40 mT
Viskozita (27 °C)	500 mPa·s
Hustota (25 °C)	$1.31 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$
Bod tuhnutí	- 32 °C
Bod vzplanutí	> 200 °C
Tepelná vodivost (38 °C)	150 mW/m·K
Povrchové napětí (25 °C)	32 mN/m

## II.2 EFH Series – magnetické kapaliny pro vzdělávací aplikace

EFH magnetické kapaliny jsou primárně určeny pro použití ve školství a v muzeích. Hlavními parametry těchto magnetických kapalin jsou magnetické vlastnosti a vzhled pro efektivní vizualizaci magnetických polí. [11]

Tab. 2.2.1 – Vlastnosti magnetické kapaliny EFH3 [11]

Nosná kapalina	lehký uhlovodík
Saturační magnetizace	65 mT
Viskozita (27 °C)	12 mPa·s
Hustota (25 °C)	$1.42 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$
Bod tuhnutí	- 94 °C
Bod vzplanutí	92 °C
Počáteční magnetická susceptibilita	3.52

### II.3 EMG Series - experimentální magnetické kapaliny

EMG magnetické kapaliny jsou určeny pro řadu specializovaných aplikací v různých technických nebo bio-medicínských odvětvích. Tyto magnetické kapaliny jsou dostupné ve třech třídách dle nosné látky. [11]

#### II.3.1 EMG na vodní bázi

Jedná se o magnetické kapaliny určené primárně pro bio-medicínské aplikace. Saturační magnetizace těchto kapalin se pohybuje od 3.3 mT do 32.5 mT. Hlavní výhodou těchto kapalin je nízká viskozita. [11]

Tab. 2.4.1 – Vlastnosti magnetické kapaliny EMG 507 [11]

Nosná kapalina	voda
Saturační magnetizace	11 mT
Viskozita (27 °C)	< 5 mPa·s
Hustota (25 °C)	$1.12 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$
Počáteční magnetická susceptibilita	3.52
pH	8-9
Koncentrace magnetických částic	2 %

#### II.3.2 EMG na olejové bázi

Magnetické kapaliny na olejové bázi se používají typicky v aplikacích vyžadujících nízkou viskozitu srovnatelnou s vodou, tam kde voda nelze použít. Nosnou kapalinu obvykle tvoří lehké uhlovodíkové oleje, které mají vyšší těkavost v porovnání s magnetickými kapalinami APG, ale nižší viskozitu. Saturační magnetizace těchto kapalin se pohybuje od 11 mT do 99 mT. Magnetické kapaliny na olejové bázi se používají v aplikacích, ve kterých nesmí docházet k vypařování magnetické kapaliny nebo nesmí docházet k reakci magnetické kapaliny s dalšími prvky. [11]

Tab. 2.4.2 – Vlastnosti magnetické kapaliny EMG 905 [11]

Nosná kapalina	lehký uhlovodíkový olej
Saturační magnetizace	44 mT
Viskozita (27 °C)	3 mPa·s
Hustota (25 °C)	$1.2 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$
Bod tuhnutí	- 94 °C
Bod vzplanutí	89 °C
Počáteční magnetická susceptibilita	3.52
Těkavost	9
Koncentrace magnetických částic	7.8 %

### II.3.3 EMG suché magnetické nano-částice

Jedná se o suché částice oxidu železa obalené specifickými povrchově aktivními látkami pro suspenzi v různých rozpouštědlech. Počáteční magnetická susceptibilita těchto částic s průměrem asi 10 nm se pohybuje kolem 0.2 a řadí se tedy do skupiny super-paramagnetik. Základní materiál je oxid železnato-železitý  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Typicky jsou tyto částice použitelné i pro aplikace na živé tkáni. Společnost FerroTech ale v současnosti nemá pro in-vivo aplikace certifikaci. Saturační magnetizace částic se pohybuje od 50 – 70 emu/g. [11]

Tab. 2.4.3 – EMG suché magnetické nano-částice [11]

<b>Typ</b>	<b>Povrchově aktivní látka</b>	<b>Rozpouštědlo</b>	<b>Obsah Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub></b>
EMG 1200	mastná kyselina	toulen, heptan, xylén	60 – 80 %
EMG 1300	polymerní	toulen, heptan, xylén	60 – 80 %
EMG 1400	hydrofobní	toulen, heptan, xylén	70 – 90 %
EMG 1500	polární	butanol	65 – 85 %

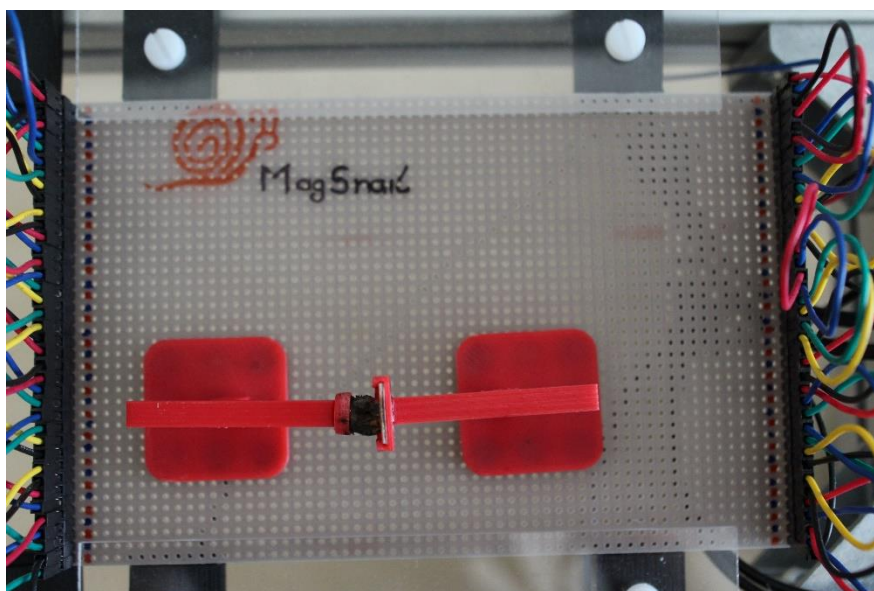
Suché nanočástice se využívají typicky pro experimentální účely a aplikace, kde je potřeba vytvořit vlastní koncentrace magnetické kapaliny nebo využít nosné kapaliny, která není komerčně nabízená. [11]

---

## **III NÁVRH A REALIZACE ÚCHOPOVÉHO SYSTÉMU**

---

Vlastní návrh úchopového systému využívající magnetické kapaliny byl vyvíjen v rámci projektu magneticky ovládaných mikro-robotů a byl tedy primárně uzpůsobován pro toto použití. V rámci tohoto projektu byla vytvořena deska s planárními cívkami sloužící jako manipulační systém pro mikro-robot. Základ mikro-robotu tvořila sada permanentních magnetů umístěných v plastovém pouzdře. Do cívek byl střídavě spínán proud způsobující vznik elektromagnetického pole kolem cívek. Vzájemnou interakcí magnetického pole permanentních magnetů mikro-robotu a elektromagnetického pole cívek bylo možné s mikro-robotem manipulovat. [10]



*Obr. 3.3.1 – Magneticky ovládaný systém MagSnail [10]*

Pro návrh úchopového systému byla využita magnetická kapalina WHJS1-B společnosti Liquids Research s uhlovodíkovou nosnou kapalinou a saturační magnetizací 40 mT.

### III.1 Koncept flexibilního váčku

Pro využití magnetické kapaliny pro úchopový systém se nabízí několik možností. Jednou z variant je využít změny viskozity magnetické kapaliny v důsledku působení magnetického pole podobně jako u magnetoreologických tlumičů v automobilovém průmyslu. Vlivem magnetického pole by kapalina uvnitř úchopového systému zvýšila svoji viskozitu a úchopový systém by tak ztuhl. Jako vhodnější varianta se ale jeví využití magnetických vlastností magnetické kapaliny uzavřené ve flexibilním váčku. Úchopový systém by tedy byl tvořen dvěma základními částmi: zdrojem magnetického pole na jedné straně a flexibilním váčkem naplněným magnetickou kapalinou na straně druhé. Toto uspořádání má několik výhod:

- Flexibilní váček naplněný magnetickou kapalinou částečně nebo zcela obalí uchopovaný objekt. Úchopový systém je tedy téměř zcela nezávislý na nerovnostech uchopovaného objektu.
- Síla, kterou působí flexibilní váček naplněný magnetickou kapalinou na uchopovaný předmět, je závislá na intenzitě magnetického pole.
- Díky flexibilním vlastnostem váčku má úchopový systém tzv. „human touch“ vlastnost a je tedy méně náchylný k rozdrčení nebo poškození uchopovaného objektu.
- V přítomnosti magnetického pole není potřeba žádné další přídržné síly k udržení uchopeného objektu.

Pro ověření funkčnosti tohoto konceptu bylo provedeno několik testů vlivu magnetického pole na magnetickou kapalinu. Magnetická kapalina byla umístěna do špičky prstu latexové rukavice, který fungoval jako model flexibilního váčku. Jako zdroj magnetického pole byl v první řadě použit permanentní magnet. Použití permanentního magnetu se ukázalo jako zcela vyhovující. Mezi permanentní magnet a flexibilní váček bylo možné bez problémů uchopit testované objekty různých velikostí a tvarů.

V druhé řadě byl testován vliv magnetického pole elektromagnetu. Pro tento případ byl sestaven model úchopového systému tvořený cívkou se 70 závitů s železným jádrem se vzduchovou mezerou, do které byl umístěn flexibilní váček a uchopovaný objekt. V tomto případě dosahoval úchopový systém mnohem horších vlastností a pro uchopení testovaných objektů bylo potřeba proudů v řádech jednotek ampér.

### **III.2 Měření silových účinků flexibilního váčku s magnetickou kapalinou**

Po ověření funkčnosti konceptu flexibilního váčku s magnetickou kapalinou bylo provedeno měření s cílem zjistit, jak velkou sílu je schopen flexibilní váček vyvinout po vložení do magnetického pole. K tomuto účelu byl využit senzor FlexiForce A201 společnosti Tekscan s rozsahem 0 – 4,4 N ovládaný pomocí kontroléru Arduino. Pro senzor byla aplikací známých sil provedena kalibrace. Vzhledem ke značné setrvačnosti senzoru musely být měřené hodnoty softwarově validovány. Jako platný výsledek byl považován aritmetický průměr celkem 100 naměřených hodnot měřených po 10 ms intervalech, jejichž směrodatná odchylka byla menší než 1. Podrobná specifikace uspořádání měření a jeho výsledků je uvedena v příloze A.

Pro model flexibilního váčku byly použity dva druhy latexového materiálu: latex z latexové rukavice a latex z prezervativu. Jako zdroj magnetického pole byl použit permanentní magnet ( $B_r = 1.14 \text{ T}$ ,  $\mu_r = 1.2$ ). Měření silových účinků bylo provedeno pro 1 ml a 2 ml magnetické kapaliny. Pro latex prezervativu bylo pak provedeno i měření s vyschlou magnetickou kapalinou. Vyschlá magnetická kapalina byla získána po přibližně 6 dnech, kdy se kapalina nechala v latexovém váčku uzavřená. Tabulka 1 obsahuje hodnoty získané pomocí sériového rozhraní z AD převodníku Arduino kontroléru a odpovídající sílu odečtenou z kalibrační křivky senzoru.

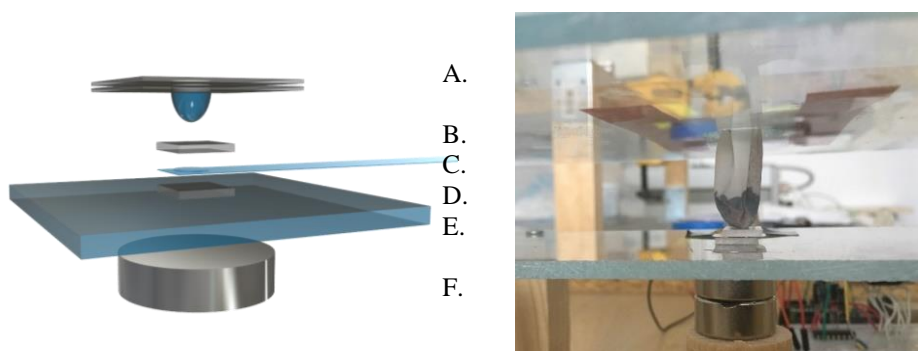


Tabulka 1: Měření silových účinků flexibilního váčku s magnetickou kapalinou

<b>Materiál</b>	<b>Množství mag. kapaliny</b>	<b>AD [-]</b>	<b>F[N]</b>
<b>Latex - prezervativ</b>	1 ml – vyschlá kapalina	103.89	0.1
	1 ml	781.51	0.3
	2 ml	887.16	0.6
<b>Latex - rukavice</b>	1 ml	679.48	0.28
	2 ml	813.16	0.44

Z tabulky je patrné, že latexový váček s vyschlou magnetickou kapalinou je schopný vyvinout mnohem menší sílu než váček s kapalinou nevyschlou. To je s největší pravděpodobností způsobené tím, že zaschnutí kapaliny způsobí částečné zatuhnutí flexibilního váčku. Vlastní pohyb shluků magnetických částic vyschlé magnetické kapaliny je uvnitř flexibilního váčku navíc značně omezen, což dále snižuje výslednou sílu, kterou je flexibilní váček schopen vyvinout. U latexových váčků z latexové rukavice a z prezervativu jsou naměřené síly srovnatelné. Latexový váček vyrobený z prezervativu je schopen vyvinout sílu o něco vyšší vzhledem k větší flexibilitě, je ale náchylnější na protržení. Množství magnetické kapaliny významným způsobem ovlivňuje sílu, kterou je váček schopen vyvinout.

Pro zajištění korektní funkce úchopového systému je tedy nutné zajistit dostatečnou flexibilitu váčku a jeho naplnění co největším množstvím magnetické kapaliny vzhledem k rozměru váčku a nosnosti mikro-roboty.



Obr. 3.2.1 – Měření silových účinků flexibilního váčku s magnetickou kapalinou

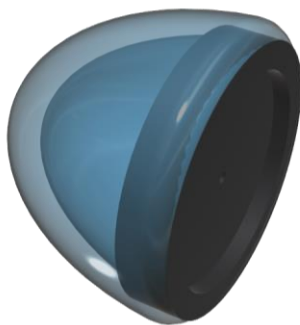
- A. latexový váček umístěný mezi dvě melinexové fólie
- B. horní plastová destička zajišťující rovnoměrné zatížení senzoru
- C. senzor FlexiForce A201
- D. spodní plastová destička zajišťující rovnoměrné zatížení senzoru
- E. pracovní deska
- F. permanentní magnet

### III.3 Úchopový systém využívající latexového váčku s magnetickou kapalinou

Na základě předchozího testování byla ověřena funkčnost konceptu latexového váčku pro magnetickou kapalinu. Model váčku s magnetickou kapalinou byl schopen při vystavení magnetickému poli permanentního magnetu vyvinout dostatečnou sílu k uchopení objektu odpovídající hmotnosti. Pro možnost využití latexového váčku v reálné aplikaci bylo potřeba navržený model zmenšit, uzavřít a ukotvit na rameni mikro-roboty. Na základě těchto požadavků bylo sestaveno několik konceptů.

#### III.3.1 Koncept 1: Uzavření latexového váčku pomocí plastového víčka

První koncept latexového váčku měl utěsňovat magnetickou kapalinu pomocí plastového víčka. Latexový váček měl být nasazen na plastové víčko vyrobené pomocí 3D tisku a zalepen pomocí lepidla. Ve víčku byl pak jehlou vytvořen otvor pro naplnění magnetickou kapalinou.



Obr. 3.3.1 – Koncept 1: latexový váček uzavřený pomocí plastového víčka

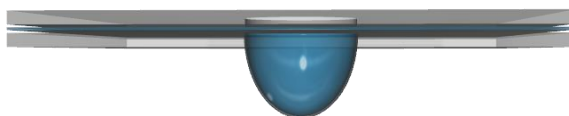
Tento koncept se ukázal jako zcela nerealizovatelný. Latex nebylo možné upravit do potřebného tvaru. Lepení tak bylo velmi problematické a neutěsnilo váček dostatečně.

### III.3.2 Koncept 2: Uzavření latexového váčku ovázáním

Druhým konceptem byl pokus uzavřít váček naplněný magnetickou kapalinou ovázáním pomocí nitě nebo tenkého drátu. I tento koncept se ukázal jako nerealizovatelný. Váček nebylo možné vytvořit dostatečně malý a uzavřít ho tak, aby magnetická kapalina neunikala.

### III.3.3 Koncept 3: Lepení latexového váčku mezi dvě plastové fólie

Tento koncept pro uzavření latexového váčku s magnetickou kapalinou spočíval v lepení latexu mezi dvě plastové fólie. Výhodou tohoto návrhu byla pevná základna latexového váčku, která by umožnila snadné ukotvení na rameno mikro-roboty. Nevýhodou představovala skutečnost, že byl latexový váček vytvářen z netvarovaného latexu. Při vytvoření váčku tak mezi plastovými fóliemi vznikalo velké množství přehybů, které bylo potřeba utěsnit.



*Obr. 3.3.2 – Koncept 3: latexový váček uzavřený mezi dvě plastové desky*

Tento koncept prošel poměrně rozsáhlým vývojem, který je popsán v následujících kapitolách. Finální postup výroby latexového váčku je zobrazen na *Obr. 3.3.3*.

## **Lepení**

Pro lepení latexu byly testovány celkem tři druhy lepidla: vteřinové lepidlo, lepidlo na plast a epoxidové lepidlo. Rychlé zatuhnutí vteřinového lepidla znemožňovalo dodatečné narovnání latexu během lepení. Lepidlo se navíc dostávalo do vlastního váčku a způsobovalo jeho zatuhnutí. Lepších výsledků bylo dosaženo s lepidlem na plast a s epoxidovým lepidlem. Dostatečná doba tuhnutí umožňovala dodatečné narovnání latexu a omezení jeho přehybů. V porovnání s lepidlem na plast přilnulo epoxidové lepidlo k latexu lépe a plastové fólie měly menší tendenci se odlepovat.

I přes dodatečné narovnání latexu při lepení docházelo vlivem přehybů a drobného odlepení ke vzniku malých kanálků, do kterých se magnetická kapalina díky své nízké viskozitě dostávala. K odstranění tohoto problému byly ze dřeva vyrobeny lisovací desky, které se i s váčkem vložily do svěráku po dobu zasychání lepidla. Lisování sice latexový váček dostatečně zatěsnilo, docházelo ale k vytlačování lepidla do vlastního váčku. K tomuto účelu byla vyrobena úzká plastová zábrana ve tvaru kroužku, která se během lepení vkládala do hrdla váčku a bránila tak vtékání lepidla do váčku. Takto upravený způsob výroby umožňoval dostatečně uzavřít latexový váček tak, aby nemohlo docházet k úniku magnetické kapaliny.

## **Plastová fólie**

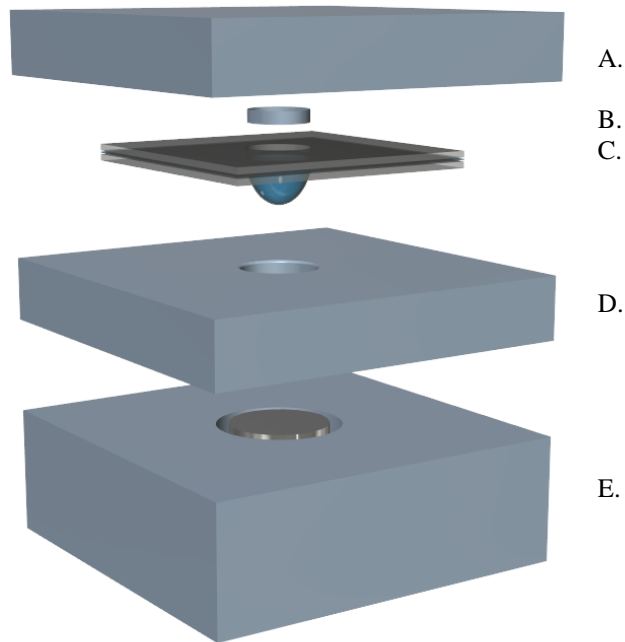
Pro uzavření latexového váčku byly testovány dva typy plastových fólií. V první řadě byla použita běžně dostupná PET fólie. Při dalších testech bylo využito melinexových fólií, které lze naleptat pomocí acetonu. Před nanesením lepidla se tedy fólie pro lepší přilnutí nejprve naleptaly tenkou vrstvou acetonu.

## **Plnění latexového váčku magnetickou kapalinou**

Problémem zůstávalo plnění latexového váčku magnetickou kapalinou. První návrh počítal s plnou zadní plastovou deskou, do které by se pak jehlou vytvořil malý otvor pro vpravení magnetické kapaliny. Tento otvor by se pak uzavřel pomocí kapky lepidla. Tento způsob se ale ukázal jako neefektivní. Při plnění ve váčku zůstával vzduch, který vytlačoval kapalinu zpět ven z váčku. Uzavření otvoru po jehle pomocí lepidla se ukázalo ve většině případů jako nedostatečné.

V důsledku těchto skutečností byl v zadní plastové desce vytvořen otvor o průměru odpovídajícímu vlastnímu váčku, kterým bylo možné váček bez problému naplnit. Navíc tímto způsobem bylo po skončení lepení možné odstranit plastovou zábranu proti vtékání lepidla do váčku. Pro celkové uzavření váčku byla pak přidána další plná plastová deska, která se nalisovala na již naplněný latexový váček.

Úskalím plnění váčku magnetickou kapalinou byla skutečnost, že latexový váček nadržel během plnění magnetickou kapalinou optimální tvar. Do váčku tak nebylo možné dostat požadované množství kapaliny a zhoršily se jeho úchopové vlastnosti. Z toho důvodu byla vyrobena další dřevěná deska, do které bylo možné umístit permanentní magnet. Plnění latexového váčku magnetickou kapalinou a jeho následné lisování tak probíhalo v přítomnosti magnetického pole. V momentě, kdy se ve váčku objevila magnetická kapalina, na ni začalo působit magnetické pole permanentního magnetu a tím došlo k roztažení váčku. Tímto způsobem bylo možné do váčku vpravit dostatečné množství magnetické kapaliny k dosažení požadovaných vlastností.



Obr. 3.3.3 – Koncept 3: Lepení a lisování latexového váčku

- A. horní dřevěná deska pro lisování
- B. plastová zábrana proti vtékání lepidla do latexového váčku
- C. latexový váček umístěný mezi dvě melinexové fólie naleptané acetonem a nanesené epoxidovým lepidlem
- D. spodní dřevěná deska pro lisování s otvorem pro latexový váček
- E. dřevěná deska s otvorem pro permanentní magnet

Po naplnění a vylisování latexového váčku byla přidána na zadní stranu plná melinexová fólie, která váček uzavřela. Fólie takto vyrobeného váčku byla zastřižena tak, aby se váček dal usadit na rameno mikro-roboty. Latexový láček byl vyráběn z latexové rukavice i z prezervativu. Latex z prezervativu měl sice lepší flexibilní vlastnosti, byl ale více náchylný na roztržení.

Tímto způsobem byl vytvořen první použitelný prototyp latexového váčku s magnetickou kapalinou, který byl implementován na magneticky řízený systém MagSnail. Vlastní implementace je popsána v samostatné kapitole.

### **Poptávka výroby latexového váčku u externích subjektů**

V rámci dalšího vývoje úchopového systému využívajícího latexový váček s magnetickou kapalinou byla snaha celý systém dále miniaturizovat. S dostupnými nástroji byla ovšem výroba latexových váčků velmi malých rozměrů problematická. Hlavním nedostatkem byla skutečnost, že používaný latex nebyl nijak tvarován. Při vytvoření váčku tak vznikaly po okrajích přehyby, které ztěžovaly jeho následné uzavření. Z toho důvodu byla poptána výroba tvarovaného latexového váčku u několika externích subjektů:

- Vulcan-Technical, s.r.o. – výroba a prodej latexových produktů,
- Air-Products, s.r.o. – prodej aditiv pro výrobu latexových produktů,
- Lybar, s.r.o. – výroba a prodej prezervativů (výrobní závod v Thajsku).

Výroba latexového váčku malých rozměrů ale nebyla možná. Výrobní zařízení neumožňovalo výrobu latexových produktů malých rozměrů. V případě ruční zakázkové výroby by nebylo možné garantovat požadovanou tloušťku latexu ani jeho těsnost. Problémové bylo i vytvoření pole okolo latexového váčku.



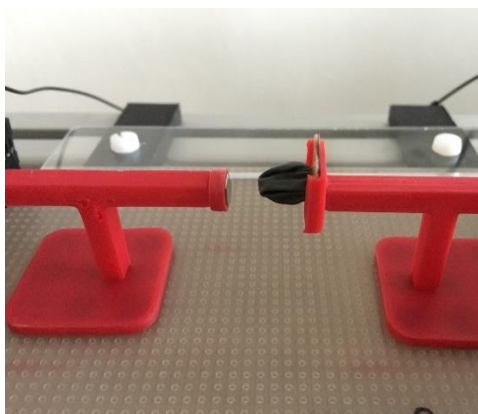
### III.3.4 Koncept 4: „Caterpillar“

Tento koncept zcela opouštěl pevnou strukturu mikro-roboty. Celý mikro-robot byl v tomto případě tvořen latexovým váčkem o délce asi 2 cm naplněný magnetickou kapalinou. Latexový váček byl uzavřen stejným způsobem jako u předchozího konceptu. Melinexové fólie byly zastřiženy velice těsně s okrajem vlastního váčku. Takto vyrobený mikro-robot byl poté umístěn na pole planárních cívek systému MagSnail, které mělo umožňovat jeho pohyb. Kolem cívek tohoto systému ale nevznikalo dostatečně silné magnetické pole k rozpočívání mikro-roboty, a to ani v případě, že byla na pole cívek umístěna plastová fólie s kapkou magnetické kapaliny. Pro další vývoj tohoto konceptu by bylo potřeba využít silnější zdroj magnetického pole, případně vyzkoušet manipulaci mikro-roboty v jiném prostředí, kde by nedocházelo k tak velkým třecím silám např. ve vodě. Využití fólie s magnetickou kapalinou bylo dále uplatněno u návrhu systému Upside Down MagSnail, který je popsán v samostatné kapitole.

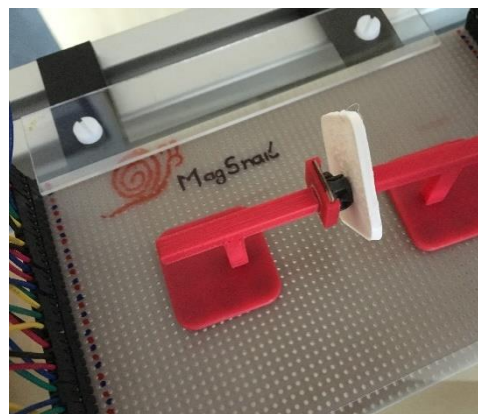
### III.3.5 Implementace na systém MagSnail

Výše popsaným lepením a lisováním latexového váčku mezi dvě plastové fólie byl vyroben první použitelný prototyp váčku s magnetickou kapalinou. Tento prototyp byl implementovaný na model mikro-roboty systému MagSnail. Systém MagSnail tvořila soustava planárních cívek, jejichž magnetické pole sloužilo k ovládání pohybu mikro-roboty. Mikro-robot byl tvořen celkem 9 permanentními magnety zasazenými do plastového pouzdra. [10]

Vlastní úchopový systém se skládal ze dvou mikro-robotů, vybavených nosným ramenem. Na jednom z ramen byl umístěn latexový váček a na druhém permanentní magnet. Pro uchopení objektu bylo nutné přiblížit ramena mikro-robotů tak, aby magnetické pole permanentního magnetu začalo působit na magnetickou kapalinu ve flexibilním váčku.



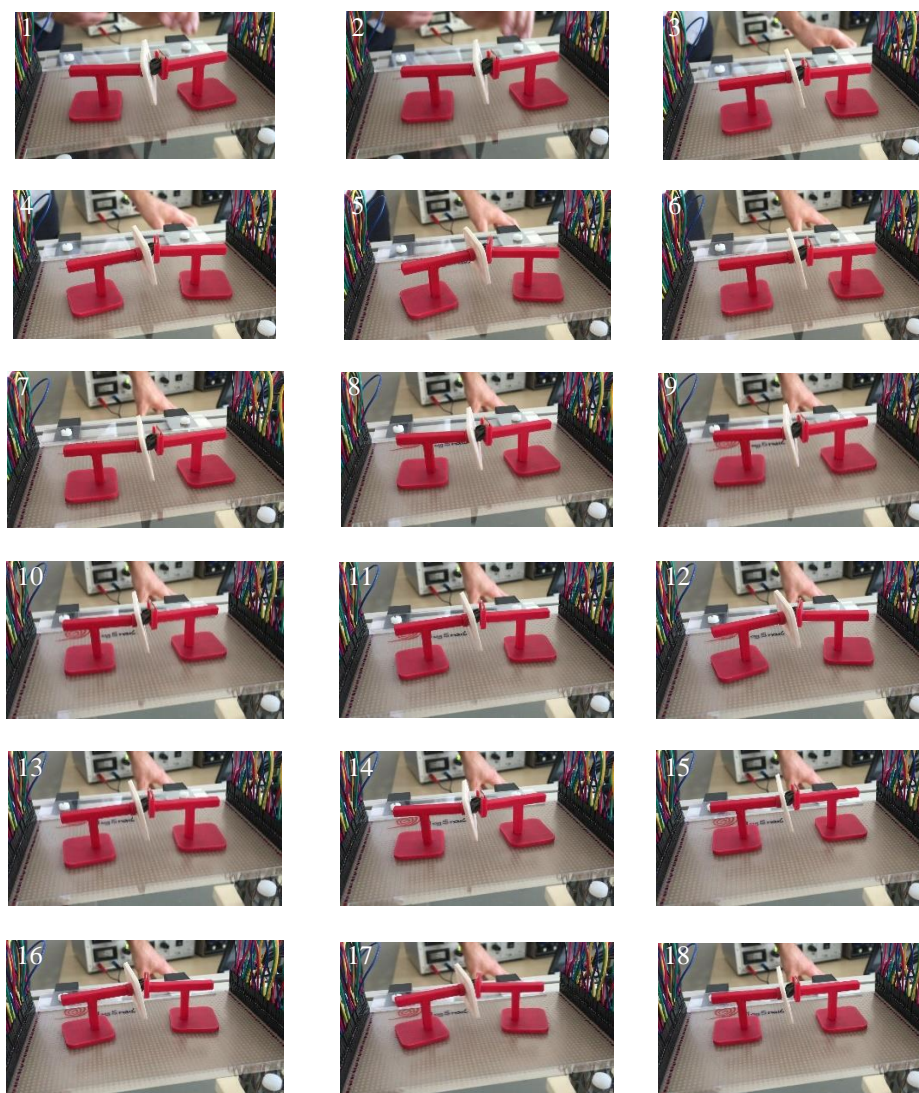
Obr. 3.3.4 – Prototyp úchopového systému



Obr. 3.3.5 – Uchopení testovaného objektu

První prototyp úchopového systému dokazoval velký potenciál tohoto uspořádání. Flexibilní váček byl schopen bez problému uchopit testované objekty a přizpůsobit se případným nerovnostem. Při pohybu mikro-robotů flexibilní váček dorovnával případné nepřesnosti v důsledku nepřesné synchronizace pohybu. Síla, kterou byl úchopový systém schopen vyvinout, se odvíjela od typu použitého permanentního magnetu.

Následující sekvence obrázků ukazuje pohybující se mikro-roboty vybavené úchopovým systémem držící jeden z testovaných objektů. Z obrázků je patrné, že je úchopový systém schopen udržet objekt i při značné desynchronizaci pohybu mikro-robotů.



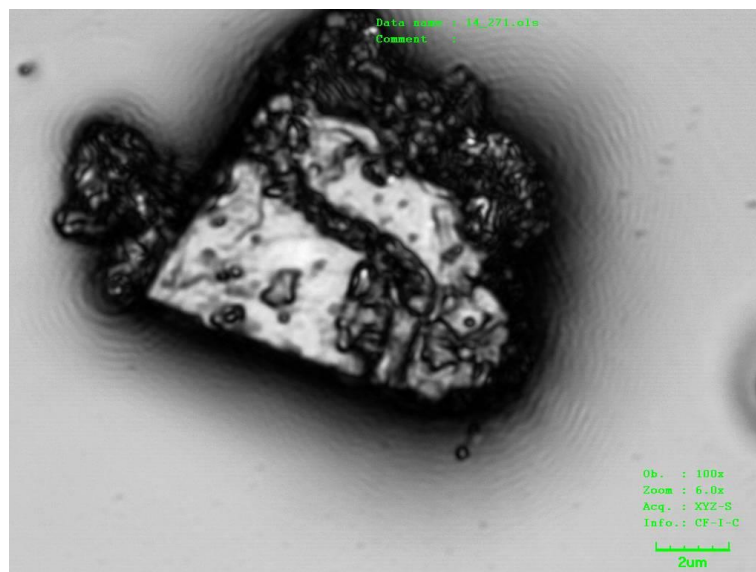
Obr. 3.3.6 – Testování prototypu úchopového systému

### III.3.6 Vysychání magnetické kapaliny

I přesto, že byl latexový váček uzavřen tak, aby z něj magnetická kapalina nemohla uniknout, docházelo časem k jejímu vysychání. Latexový váček pak zůstal funkční, ale výrazně se zhoršily jeho vlastnosti. Čas, za který dojde k vyschnutí magnetické kapaliny, nebylo možné přesně určit. U některých latexových váčků došlo k vyschnutí už po 14 dnech, u jiných až po 2 měsících.

Je potřeba zmínit, že u každé magnetické kapaliny dochází časem k degradaci. Vlivem degradace detergentu oddělující jednotlivé feromagnetické částice dochází k jejich shlukování a kapalina ztrácí své původní vlastnosti. Přesný důvod vysychání kapaliny uzavřené v latexovém váčku v tak rozdílných časových intervalech ale nebyl objasněn. Zajímavá je skutečnost, že v plastové nádobce zavírané obyčejným plastovým víčkem se závitem k vysychání kapaliny nedocházelo. Je možné, že k vysychání magnetické kapaliny docházelo v důsledku reakce mezi vlastní kapalinou a latexem, který s časem ztrácel své vlastnosti. K vysychání mohla přispívat i skutečnost, že byl latexový materiál před výrobou latexového váčku očištěn a částečně zbaven ochranného filmu. Pro další návrh by tedy bylo vhodné zkusit pokrýt vnitřní stranu latexového váčku materiálem, který bude fyzicky oddělovat magnetickou kapalinu a latexový materiál. [18]

Ve snaze získat další informace byla magnetická kapalina pozorována pomocí mikroskopů. Žádný z dostupných mikroskopů neumožňoval takové zvětšení, aby bylo možné pozorovat jednotlivé feromagnetické částice o velikosti několika nm, vidět bylo možné pouze jejich shluky. Pomocí laserového mikroskopu Olympus LEXT OLS 3000 byla pozorována magnetická kapalina v tekutém stavu. Na *Obr. 3.3.7* je vidět shluk feromagnetických částic o rozměrech více než 10  $\mu\text{m}$ . Je tedy patrné, že používaná kapalina je již v částečně degradovaném stavu.



Obr. 3.3.7 – Laserový mikroskop (Objektiv: 100x, Zoom: 6x):  
Shluk feromagnetických částic v magnetické kapalině

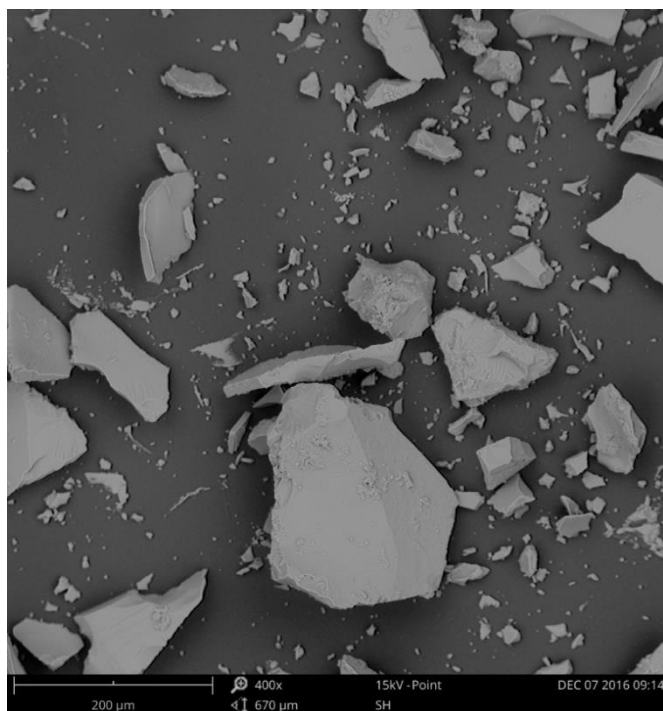
Vyschlá magnetická kapalina byla pozorována pomocí elektronového mikroskopu Penom ProX. Na Obr. 3.3.8 jsou vidět shluky feromagnetických částic různých velikostí a tvarů. Pomocí tohoto mikroskopu byla provedena tzv. EDS analýza zjišťující procentuální zastoupení pozorovaných prvků. Ze získaných grafů je patrné, že vyschlou kapalinu tvoří z největší části železo a jeho oxidy.

Graf 3.3.1 - Kvantitativní zastoupení prvků



Graf 3.3.2 - Hmotnostní zastoupení prvků





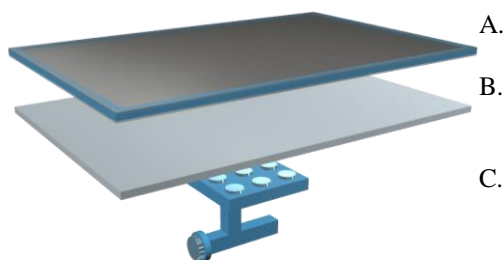
*Obr. 3.3.8 – Elektronový mikroskop:  
Vyschlá magnetická kapalina*

### **III.3.7 Systém „Upside Down MagSnail“**

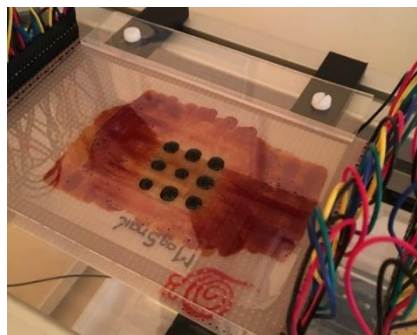
Základ tohoto systému tvoří fólie s magnetickou kapalinou, která dále rozšiřuje možnosti plastového mikro-roboty s permanentními magnety systému MagSnail. Umístěním fólie s magnetickou kapalinou na manipulační pole planárních cívek bylo možné řídit pohyb mikro-roboty umístěného vzhůru nohama. Permanentní magnety mikro-roboty si pomocí svého magnetického pole přitahovaly magnetickou kapalinu do oblasti nad vlastním magnetem (*Obr. 3.3.10*) a při pohybu mikro-roboty tedy docházelo současně i k pohybu magnetické kapaliny.

Důležitým parametrem systému bylo množství magnetické kapaliny. S rostoucím množstvím magnetické kapaliny se zvyšovala i nosnost mikro-roboty. V určitém bodě ale byla síla působící mezi permanentními magnety a magnetickou kapalinou tak velká, že magnetické pole planárních cívek nestačilo k rozpořbování mikro-roboty. Výhodou tohoto systému byla

velice nízká třecí síla ze strany magnetické kapaliny. Využití desky s magnetickou kapalinou i v běžném uspořádání navíc zamezovalo kmitání mikro-roboty během jeho pohybu, což představovalo jeden z výrazných problémů systému MagSnail.



A.  
B.  
C.

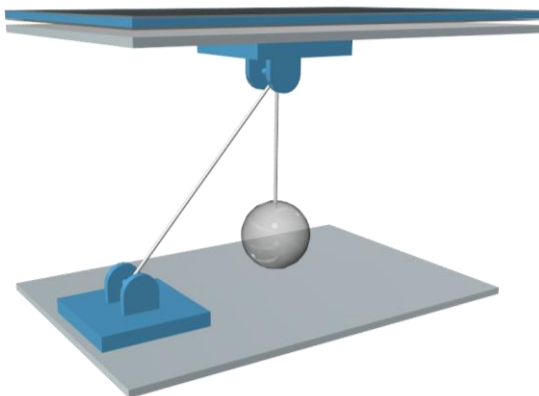


Obr. 3.3.9 – „Upside Down MagSnail“

Obr. 3.3.10 – Fólie s magnetickou kapalinou

- A. magnetická kapalina uzavřená mezi dvě plastové fólie
- B. deska s planárními cívkami
- C. plastový mikro-robot s permanentními magnety

Jedním z možných způsobů využití tohoto systému je vytvoření dvou manipulačních polí planárních cívek umístěných nad sebou. Horní manipulační pole by navíc obsahovalo fólii s magnetickou kapalinou a sloužilo k ovládní mikro-robotů umístěných vzhůru nohama. Mikro-robot ovládaný v horním manipulačním poli by pak mohl být vybaven např. kladkou a vytvářet tak jednoduchý jeřabový systém ovládaný mikro-roboty ze spodního manipulačního pole (Obr. 3.3.11).

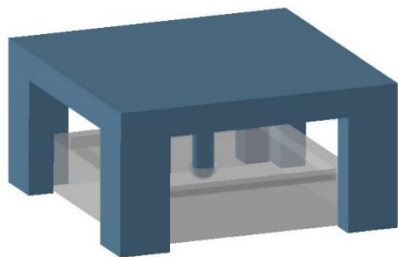


Obr. 3.3.11 – „Upside Down MagSnail“

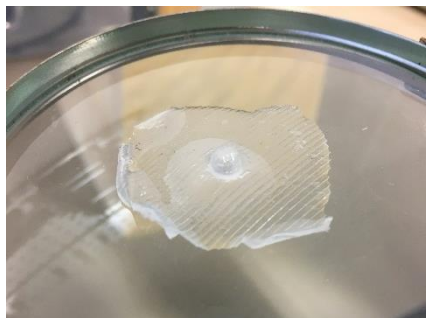
#### III.4 Úchopový systém využívající silikonového váčku s magnetickou kapalinou

Vzhledem k tomu, že latexový váček bylo velmi problematické dále miniaturizovat, byl jako další flexibilní materiál pro výrobu vybrán silikon. V první řadě byl testován adiční dvousložkový silikon Ecoflex 00-30. Dvě složky tohoto silikonu se smíchaly v poměru 1:1 a po dobu 45 min bylo možné se silikonem pracovat. Ke konečnému ztuhnutí silikonu byly potřeba přibližně 4 hodiny. Výhodou použití silikonu byla možnost jeho odlévání. Bylo tedy možné připravit silikonový váček požadovaných rozměrů a tvaru. K tomuto účelu byla na 3D tiskárně vytvořena dvoudílná forma. Spodní díl sloužil k vytvoření těla váčku. Horní díl sloužil k vytlačení kapsy pro magnetickou kapalinu. [16]





Obr. 3.4.1 – Forma pro odlévání silikonového váčku (spodní díl pro ilustraci zobrazen průhledně)



Obr. 3.4.2 – Silikonový váček

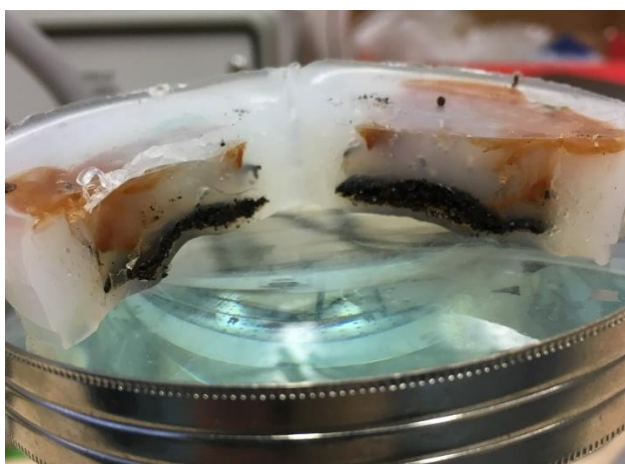
Při následném testování splňoval vytvořený silikonový váček všechny požadované parametry včetně dostatečné flexibility a těsnosti. Problémem zůstávalo jeho uzavření po naplnění magnetickou kapalinou.

Nejprve bylo testováno lepení pomocí epoxidového lepidla podobně jako u latexového váčku. Tento způsob se ale ukázal jako neefektivní, epoxidové lepidlo nepřilnulo k silikonu a docházelo k odlepování. Při schnutí silikonu navíc docházelo k jeho vytlačení podél stěny horního dílu formy, čímž vzniknul kolem vlastního váčku vyvýšený okraj, který ztěžoval jeho následné uzavření plastovou fólií. Z toho důvodu se na horní díl formy před vložením do silikonu nasadila plastová fólie zabraňující vytlačení silikonu. Navíc tato fólie vytvořila plošku, na kterou bylo možné přilepit plastovou desku pro uzavření váčku. Tímto způsobem bylo sice již možné silikonový váček s magnetickou kapalinou uzavřít, často ale docházelo ke vzniku trhliny mezi plastovou fólií a silikonovým váčkem a k následnému úniku magnetické kapaliny.

Lepších výsledků bylo dosaženo při opětovném zalití naplněného silikonového váčku silikonem. Silikon se držel na magnetické kapalině a dokonale se spojil s již zaschlým tělem váčku. Pro snazší ukotvení na rameni mikro-roboty byla při odlévání silikonového váčku zalévána melinexová fólie

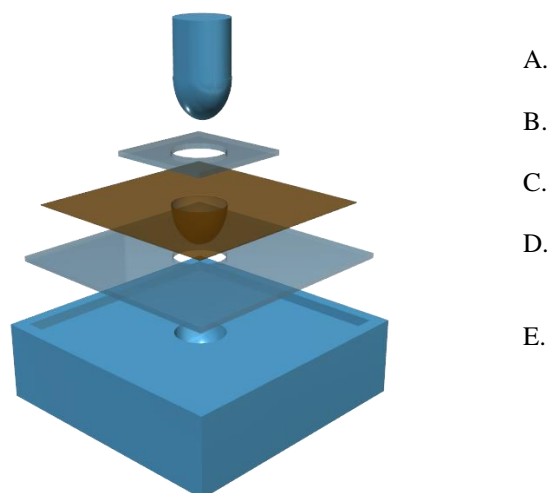
s otvorem pro vlastní váček. Tímto způsobem bylo docíleno pevné základny váčku umožňující snadné usazení váčku na rameno mikro-roboty.

Pro další testování uzavírání silikonového váčku zaléváním vrstvou silikonu byla vytvořena zvětšená verze. V první řadě byla odlita silikonová nádoba o průměru přibližně 2,5 cm a výšce přibližně 1 cm. Po naplnění nádoby magnetickou kapalinou byla nádoba uzavřena vrstvou silikonu. Na *Obr. 3.4.3* je vidět, že magnetická kapalina zůstala pod horní vrstvou silikonu.



*Obr. 3.4.3 – Uzavření silikonové nádoby s magnetickou kapalinou pomocí vrstvy silikonu – řez*

Pro další návrh silikonového váčku byla testována směs magnetické kapaliny a silikonu. První testy ukázaly, že silikon po smíchání s magnetickou kapalinou zatuhne a směs si zachová magnetické vlastnosti. Podrobněji se touto problematikou zabývá následující kapitola. Vlastní tělo váčku bylo tedy možné odlévat ze směsi magnetické kapaliny a silikonu a tím podstatně zlepšit magnetické vlastnosti váčku. Postup výroby silikonového váčku je zobrazen na *Obr. 3.4.4*. Pro výrobu silikonových váčků byl využit i silikon Ecoflex 00-10, který je v porovnání se silikonem Ecoflex 00-30 měkkší a výsledný váček je tedy více flexibilní.



Obr. 3.4.4 – Výroba silikonového váčku

- A. horní díl formy vytlačující kapsu pro magnetickou kapalinu
- B. plastová fólie pro zarovnání silikonu v oblasti okraje váčku
- C. silikonový váček odlévaný ze směsi magnetické kapaliny a silikonu
- D. melinexová fólie zalévaná do těla váčku
- E. spodní díl formy

### **III.5 Úchopový systém využívající směs magnetické kapaliny a silikonu**

Základem těchto úchopových systémů byla flexibilní směs magnetické kapaliny a silikonu. Prvotní testy dokázaly, že silikon ztuhne i po smíchání s magnetickou kapalinou a výsledná směs si zachová magnetické vlastnosti. Pro výrobu jednotlivých konceptů byly využity dva typy adičních dvousložkových silikonů Ecoflex 00-10 a Ecoflex 00-30.

Pro zajištění co nejlepších magnetických vlastností úchopového systému bylo potřeba najít optimální poměr magnetické kapaliny a silikonu. K tomuto účelu byla magnetická kapalina míchána se silikonem Ecoflex 00-10. Čím více magnetické kapaliny bylo do silikonu přimícháno, tím lepší byly její magnetické vlastnosti a tím větší sílu byl úchopový systém schopen vyvinout. S rostoucím množstvím magnetické kapaliny výsledná směs ale více lepila, hůře držela tvar a při překročení určité hranice už silikon ani neztluhl. Pro nalezení optimální směsi byla tedy vyrobena řada silikonových vzorků s postupně se zvyšujícím množstvím přidané magnetické kapaliny. Jednotlivé vzorky byly testovány vložením do magnetického pole permanentního magnetu. Podrobná specifikace uspořádání a výsledků měření silových účinků směsi magnetické kapaliny a silikonu je uvedena v příloze B.

Tabulka 3.5.1: Směs magnetické kapaliny a silikonu

Množství magnetické kapaliny	Hmotnost složek silikonu	Silové účinky po vložení do magnetického pole ( $B = 31 \text{ mT}$ )	Zatuhnutí silikonu
0.1 ml	7 g	0.29 mN	úplné
0.15 ml		1.38 mN	úplné
0.3 ml		3.54 mN	úplné
0.4 ml		9.72 mN	úplné
0.5 ml		11.10 mN	úplné
0.6 ml		12.48 mN	úplné
0.8 ml		10.51 mN	úplné
1.0 ml		15.23 mN	úplné
1.4 ml		18.96 mN	úplné
1.6 ml		21.32 mN	úplné
1.8 ml		20.63 mN	částečné
2.0 ml		27.21 mN	částečné
2.2 ml		26.72 mN	bez zatuhnutí

Tímto způsobem byl nalezen optimální poměr magnetické kapaliny a silikonu pro výrobu jednotlivých úchopových systémů.



Obr. 3.5.1 – Vzorok směsi magnetické kapaliny a silikonu  
A: 0.1 ml / 7 g, B: 0.15 ml / 7 g, C: 0.3 ml / 7 g, D: 0.4 ml / 7 g



Obr. 3.5.2 – Vzorok směsi magnetické kapaliny a silikonu  
A: 0.4 ml / 7 g, B: 0.5 ml / 7 g, C: 0.6 ml / 7 g, D: 0.8 ml / 7 g, E: 1.0 ml / 7 g



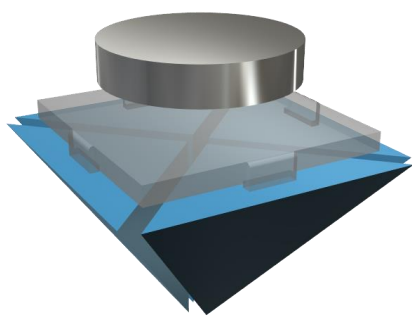
*Obr. 3.5.3 – Vzorok směsi magnetické kapaliny a silikonu (popis zprava)  
A: 1.4 ml / 7 g, B: 1.6 ml / 7 g, C: 1.8 ml / 7 g, D: 2.0 ml / 7 g, E: 2.2 ml / 7 g*

V rámci dalšího vývoje byl pro přidavné změkčení silikonu využit změkčovač pro adiční silikony Slacker. Přidáním změkčovače byl silikon sice měkčí, ale více lepil a byl více náchylný na roztržení. [17]

### III.5.1 Koncept 1: „Beak“

Základem tohoto konceptu jsou čtyři na sebe pasující ramena odlitá ze směsi magnetické kapaliny a silikonu. V každém rameni je zapuštěn proužek z flexibilní plastové fólie kotvící rameno ke společné základně. Koncept je založen na sevření úchopového systému po vložení do magnetického pole.

Za normálních okolností je chapadlo mírně pootvřené. Po přiložení permanentního magnetu k zadní straně úchopového systému dojde k přitažení jednotlivých ramen a chapadlo se sevře. Ramena byla nejprve vyráběna ze směsi 1.8 ml magnetické kapaliny / 7 g silikonu Ecoflex 00-10. Tato směs měla velmi dobré magnetické vlastnosti, ale hůře držela tvar a způsobovala slepování jednotlivých ramen. Lepších vlastností bylo dosaženo při použití směsi 1.6 ml magnetické kapaliny / 7 g silikonu, která měla dostatečně dobré magnetické vlastnosti pro sevření úchopového systému a omezila slepování ramen. Pro další návrh by bylo vhodné jednotlivá ramena po odlití pokrýt tenkou vrstvou čistého silikonu a zamezit tím jejich slepování. Pro otevření úchopového systému je možná i varianta prstencového magnetu, které po přiložení k zadní straně způsobí oddálení ramen. Tento koncept splnil očekávání a po dalším vývoji má velký potenciál pro využití v reálné aplikaci.



Obr. 3.5.1 – Koncept 1: Beak – zavřený stav v přítomnosti magnetického pole permanentního magnetu

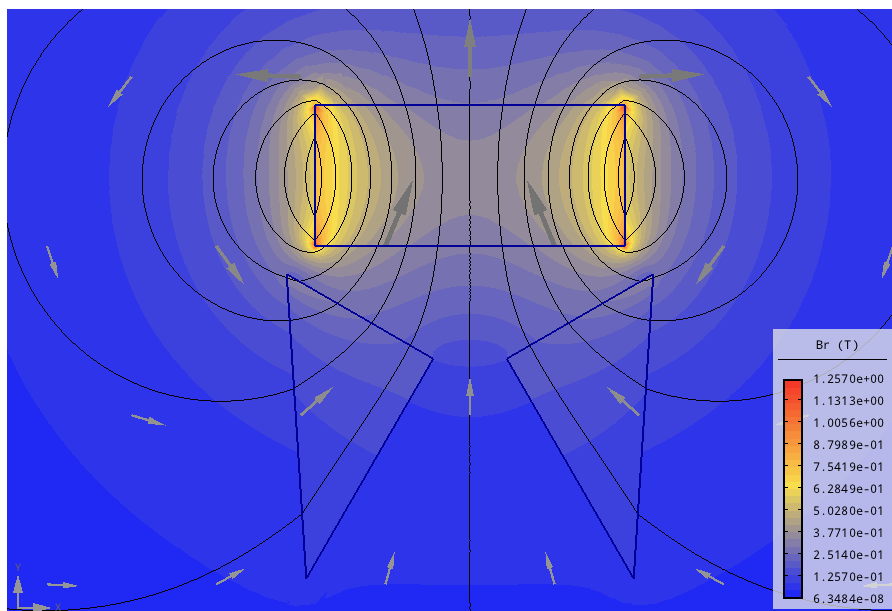


Obr. 3.5.2 – Koncept 1: Beak – otevřený stav

## Model úchopového systému

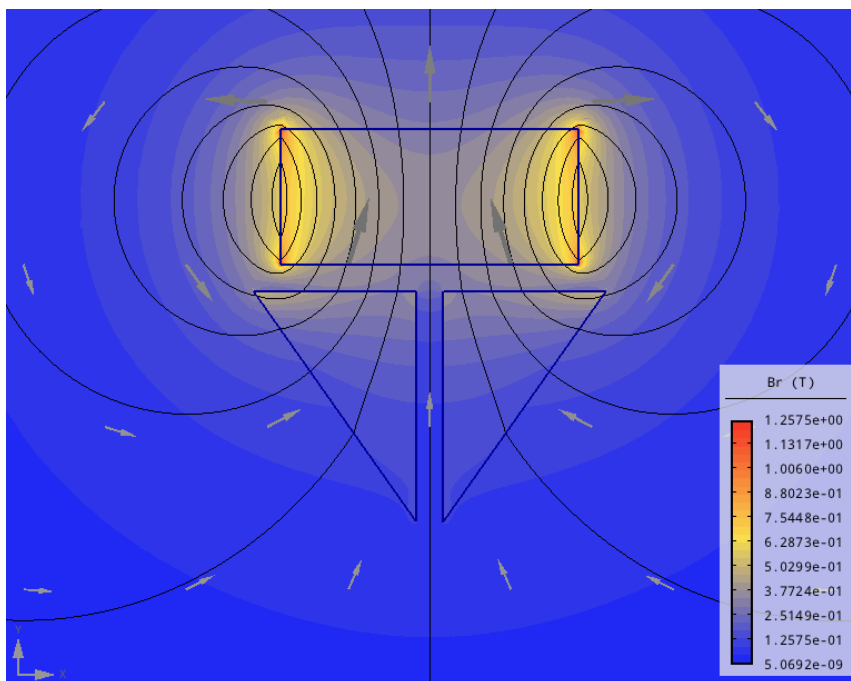
Pro ověření funkčnosti tohoto konceptu byl sestaven model v simulačním prostředí Agros2D. Sestavený model je pouze orientační a nelze z něj tak usuzovat kvalitativní parametry prototypu. Základ modelu úchopového systému tvořila dvě trojúhelníková ramena z materiálu s  $\mu_r = 2$  simulující směs magnetické kapaliny a silikonu. V prostoru nad rameny byl umístěn model vertikálně orientovaného neodymového permanentního magnetu ( $\mu_r = 1.2$ ,  $B_r = 1.45$ ). Jako okolní prostředí byl simulován vzduch ( $\mu_r = 1$ ). Celková délka modelu byla vzhledem k možnostem simulačního prostředí uvažována 1 m. Získané hodnoty bylo z toho důvodu nutné přepočítávat na skutečnou délku úchopového systému 25 mm.

Byla provedena simulace otevřeného a uzavřeného úchopového systému, ke kterému byl přiložen permanentní magnet. Byla sledována síla, jakou permanentní magnet přitahuje jednotlivá ramena ve směru osy  $x$  a  $y$ . *Obr. 3.5.3* a *Obr. 3.5.4* znázorňují magnetickou indukci v okolí úchopového systému.



*Obr. 3.5.3 – Magnetická indukce v okolí otevřeného úchopového systému*





Obr. 3.5.4 – Magnetická indukce v okolí uzavřeného úchopového systému

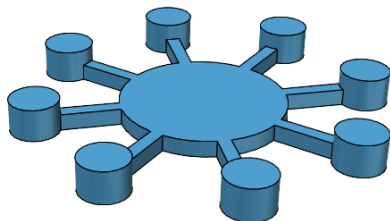
Tab. 3.5.1 – Síla působící na rameno úchopového systému

Otevřený stav	$F_x$	0.46 N
	$F_y$	2.60 N
Uzavřený stav	$F_x$	0.79 N
	$F_y$	5.25 N

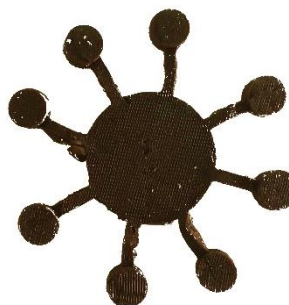
Z tabulky je patrné, že rameno modelu úchopového systému je schopné vyvinout sílu více než 5 N v zavřeném stavu a více než 2 N v plně otevřeném stavu, což je dostatečná síla pro uchopení objektu a dokládá funkčnost tohoto konceptu a jeho velký potenciál.

### III.5.2 Koncept 2: „Gekon“

Základ tohoto konceptu tvoří osm chapadel vyrobených ze směsi magnetické kapaliny a silikonu. Chapadla spojuje centrální kruhová část vyztužená plastovou fólií.

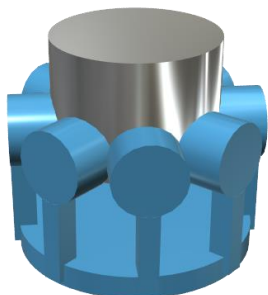


Obr. 3.5.5 – Koncept 2: Gekon

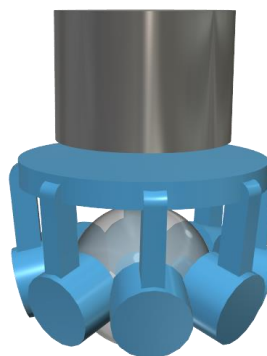


Obr. 3.5.6 – Koncept 2: Gekon – prototyp

Úchopový systém může pracovat ve dvou variantách. První varianta předpokládá přítomnost permanentního magnetu před uchopovaným objektem. Chapadla úchopového systému obalí daný objekt a chytanou se permanentního magnetu (Obr. 3.5.7). Druhá varianta funguje na podobném principu jako předchozí koncept. Přiložení permanentního magnetu k zadní části úchopového systému způsobí přitažení jednotlivých chapadel a sevření uchopovaného objektu (Obr. 3.5.8). Při testování této varianty ale často docházelo k přitahování chapadel v opačném směru. Pro budoucí návrh by tedy bylo nutné omezit možný pohyb chapadel tak, aby byla magnetickým polem přitahována pouze ve směru úchopu.



Obr. 3.5.7 – Koncept 2: Gekon  
Varianta I



Obr. 3.5.8 – Koncept 2: Gekon  
Varianta II

Koncept byl odlévaný ze směsi 0.8 ml magnetické kapaliny / 7 g silikonu Ecoflex 00-10 pro první variantu a 1.6 ml magnetické kapaliny / 7 g silikonu Ecoflex 00-10 pro druhou variantu. Použití odlišných směsí vychází ze skutečnosti, že jsou u první varianty vyšší nároky na pevnost směsi a naopak nižší nároky na její magnetické vlastnosti vzhledem k přímému kontaktu permanentního magnetu s chapadly úchopového systému.

### III.5.3 Plánovaný vývoj

Pro budoucí návrhy úchopových systémů se jako optimální jeví využít dvě různé směsi silikonu a magnetické kapaliny na vnitřní část a na obal. Obal úchopového systému by tvořila tenká vrstva silikonu s menším množstvím přidané magnetické kapaliny. Obal by tak dobře držel tvar a nelepil by. Vnitřní část úchopového systému by tvořila směs s velkým podílem magnetické kapaliny pro zajištění magnetických vlastností úchopového systému. Do této směsi by mohl být navíc přidán změkčovač pro zvýšení flexibilních vlastností systému. Výhodou použití směsi silikonu a magnetické kapaliny pro vnitřní část úchopového systému oproti čisté magnetické kapalině je skutečnost, že v případě poškození obalu nedojde k úniku magnetické kapaliny do okolního prostředí. Navíc tímto způsobem nedochází k degradaci magnetické kapaliny a ke změně vlastností systému.

Další možností je využití směsi dvousložkové adiční silikonové pěny Soma Foama a magnetické kapaliny. Při smíchání dvou složek silikonové pěny dojde ke dvojnásobnému nebo čtyřnásobnému zvětšení objemu podle typu pěny. Silikonovou pěnu by bylo možné smíchat s magnetickou kapalinou před jejím zatuhnutím nebo naplnit již ztuhlou silikonovou pěnu. Směs silikonové pěny s magnetickou kapalinou by pak mohla tvořit vnitřní část úchopových systémů. Testy se silikonovou pěnou nebyly zatím provedeny.

V rámci dalšího vývoje by pro vytváření směsi se silikonem bylo vhodné využít suchých magnetických nanočástic obalených povrchově aktivními látkami zabraňujícími jejich shlukování. Tímto způsobem by tak součástí nebyla nosná kapalina, která ve směsi nemá žádnou funkci. Při výrobě směsi suchých magnetických nanočástic a silikonu by bylo nutné zajistit jejich rovnoměrné rozložení. Směs by se tedy po dobu zpracovatelnosti silikonu, tj. předtím než začne silikon tuhnout (EcoFlex 00-10: 45 min), musela periodicky promíchávat.

## ZÁVĚR

První část diplomové práce je zaměřena na současně vyvíjené aplikace magneticky řízených robotů a jejich úchopových systémů. Oblast magneticky řízených robotů je nově rozvíjející se odvětví pro přesné polohování robotů obvykle velmi malých rozměrů pro využití v řadě technických a lékařských oborů. Malá velikost robotů znemožňuje, aby mohly nést vlastní zdroj energie, a proto je manipulace zajištěna pomocí vnějšího magnetického pole. Vzhledem k velikosti robotů jde většinou o roboty pasivní, jejichž úchopový systém tvoří vlastní tělo robota. Cílem této diplomové práce bylo navrhnout magneticky ovládaný úchopový systém využívající magnetickou kapalinu, který by dále rozšiřoval možnosti takto ovládaných robotů.

Druhá část práce se zaměřuje na magnetické kapaliny a jejich rozdělení z hlediska vlastností a aplikace. Pro každou skupinu magnetických kapalin je uveden příklad konkrétní magnetické kapaliny s typickými vlastnostmi pro danou skupinu.

Třetí část práce řeší vlastní návrh úchopového systému využívající magnetickou kapalinu. Jednotlivé návrhy lze rozdělit do dvou hlavních oblastí: úchopové systémy využívající flexibilní váček naplněný magnetickou kapalinou a úchopové systémy využívající směs magnetické kapaliny a silikonu.

Úchopové systémy využívající flexibilní váček s magnetickou kapalinou pracují na principu uchopení objektu mezi vlastní flexibilní váček a zdroj magnetického pole. Vzhledem k flexibilitě váčku úchopový systém částečně nebo zcela obalí uchopovaný objekt a snadněji se tak vypořádá s jeho případnými nerovnostmi. Zároveň má úchopový systém tzv. „human touch“ vlastnost a je tedy méně náchylný k poškození nebo rozdrčení uchopovaného objektu. Flexibilní váčky byly vyráběny z latexového materiálu nebo byly odlévány ze silikonu. Výroba flexibilních váček prošla poměrně rozsáhlým

vývojem tak, aby bylo možné kapalinu ve váčku dostatečně utěsnit, váček co nejvíce miniaturizovat a využít maximum jeho objemu.

Funkční prototyp úchopového systému využívající latexový váček s magnetickou kapalinou byl implementován na magneticky řízený systém MagSnail, kde ukazoval velký potenciál při uchopení a manipulaci s objektem a po dalším vývoji by bylo tento systém možné použít v reálné aplikaci. Nevýhodou váčků vyráběných z latexového materiálu bylo vysychání magnetické kapaliny uvnitř váčku, ke kterému s největší pravděpodobností docházelo vlivem vzájemné reakce magnetické kapaliny a latexového materiálu a v důsledku kterého docházelo k výraznému zhoršení vlastností úchopového systému. Pro další návrh by bylo vhodné pokrýt vnitřní stěnu materiálem, který by fyzicky odděloval latexový materiál od magnetické kapaliny a částečně nebo úplně zamezil její degradaci. V rámci implementace na systém MagSnail byla kromě úchopového systému vyvinuta deska s magnetickou kapalinou stabilizující pohyb magneticky ovládaného mikro-robotu a umožňující manipulaci s mikro-robotem umístěným vzhůru nohama.

Vzhledem k tomu, že další miniaturizace latexového váčku byla s dostupnými nástroji problematická, byl vyvinut flexibilní váček ze silikonu. Využití silikonu přinášelo možnost odlévání požadovaného tvaru a výběr typu silikonu s ohledem na požadované vlastnosti. Tímto způsobem bylo možné dále zmenšit velikost úchopového systému.

Pro další návrhy systému bylo využito směsi magnetické kapaliny a silikonu. Po smíchání magnetické kapaliny se silikonem se ukázalo, že směs ztuhne a zachová magnetické vlastnosti magnetické kapaliny. Tímto způsobem byl vytvořen flexibilní materiál s magnetickými vlastnostmi, který se stal základem vyráběných úchopových systémů. Větší koncentrace magnetické kapaliny v silikonu sice zlepšovala magnetické vlastnosti směsi, současně ale způsobovala, že směs lepila a hůře držela tvar. Na základě těchto

skutečností bylo provedeno experimentální testování pro nalezení optimálního poměru magnetické kapaliny a silikonu.

Z navrhovaných úchopových systémů má pravděpodobně největší potenciál koncept „Beak“ tvořený čtyřmi rameny ovládanými pomocí magnetického pole permanentního magnetu. Po dalším vývoji by tento systém mohl být použit v reálné aplikaci. Hlavní výhodou tohoto systému je flexibilita úchopových ramen umožňující přizpůsobení se tvaru uchopovaného objektu a jednoduchost jeho ovládní a s tím spojené nízké náklady na jeho výrobu.

Dalším krokem ve vývoji úchopových systémů by mělo být testování směsi magnetické kapaliny a silikonové pěny a především míchání silikonu se suchými magnetickými nanočásticemi obalenými ochranným detergentem. Tímto způsobem by mělo být možné vyrobit směs s požadovanými magnetickými vlastnostmi, jejíž součástí již nebude nosná kapalina.

Navržené úchopové systémy ovládané pomocí magnetického pole ukazují obrovský potenciál a mnoho možností využití v reálných aplikacích.

# SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ

- [1] ETH Zurich: Multi-Scale Robotics Lab. *Eidgenössische Technische Hochschule Zürich* [online]. [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: [www.msrl.ethz.ch](http://www.msrl.ethz.ch)
- [2] Minimally-invasive eye surgery on the horizon as magnetically-guided microbots approach clinical trials. *Robohub* [online]. 2013 [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: <http://robohub.org/minimally-invasive-eye-surgery-on-the-horizon-as-magnetically-guided-microbots-move-toward-clinical-trials/>
- [3] NELSON, Bradley J.; KALIAKATSOS, Ioannis K.; ABBOTT, Jake J. Microrobots for minimally invasive medicine. *Annual review of biomedical engineering*, 2010, 12: 55-85.
- [4] Steerable, Motorized Cyborg Spermrobots Take on. *IEEE Spectrum* [online]. [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: <http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/medical-robots/spermrobots-take-on-infertility>
- [5] *IFW Dresden: Institute for Integrative Nanosciences (IIN)* [online]. 2016 [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: <https://www.ifw-dresden.de/institutes/iin/>
- [6] Bionic semen: 'Spermobot' could speed up slow swimmers for fertility revolution. *RT* [online]. [cit. 2017-03-17]. Dostupné z: <https://www.rt.com/news/329054-sperm-micromotor-spermobot-device/>
- [7] Medical Microbots Take a Fantastic Voyage Into Reality. *IEEE Spectrum* [online]. IEEE [cit. 2017-03-25]. Dostupné z: <http://spectrum.ieee.org/robotics/medical-robots/medical-microbots-take-a-fantastic-voyage-into-reality>
- [8] HAGIWARA, Masaya, et al. High performance magnetically driven microtools with ultrasonic vibration for biomedical innovations. In: *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on*. IEEE, 2011. p. 3453-3454.
- [9] Meet the World's First Completely Soft Robot. *MIT Technology Review* [online]. 2016 [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <https://www.technologyreview.com/s/603046/meet-the-worlds-first-completely-soft-robot/>
- [10] KUTHAN, Jiří. *Elektromagnetický systém pro polohování magnetických těles*. Plzeň, 2017. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [11] *FerroTec* [online]. USA, 2001 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <https://ferrofluid.ferrotec.com/>



- [12] Ferrofluid in Art. In: *The Ferrofluid* [online]. 2016 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <http://theferrofluid.com/ferrofluid-in-art/>
- [13] MAYER, Daniel. Magnetické kapaliny a jejich použití: (1. část). *Elektro*, 2007, 17(3), s. 78-79. ISSN 1210-0889.
- [14] MAYER, Daniel. Magnetické kapaliny a jejich použití: (2. část). *Elektro*, 2007, 17(4), s. 4-8. ISSN 1210-0889.
- [15] STEJSKAL, Jan. *Proudění magnetické kapaliny s aplikací Binghamova modelu*. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [16] *Silikony s.r.o.* [online]. Plzeň, 2017 [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <https://www.silikonysro.cz/>
- [17] *Smooth-On* [online]. USA, 2017 [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <https://www.smooth-on.com/>
- [18] BUTTER, Karen, et al. Direct observation of dipolar chains in iron ferrofluids by cryogenic electron microscopy. *Nature materials*, 2003, 2.2: 88-91.

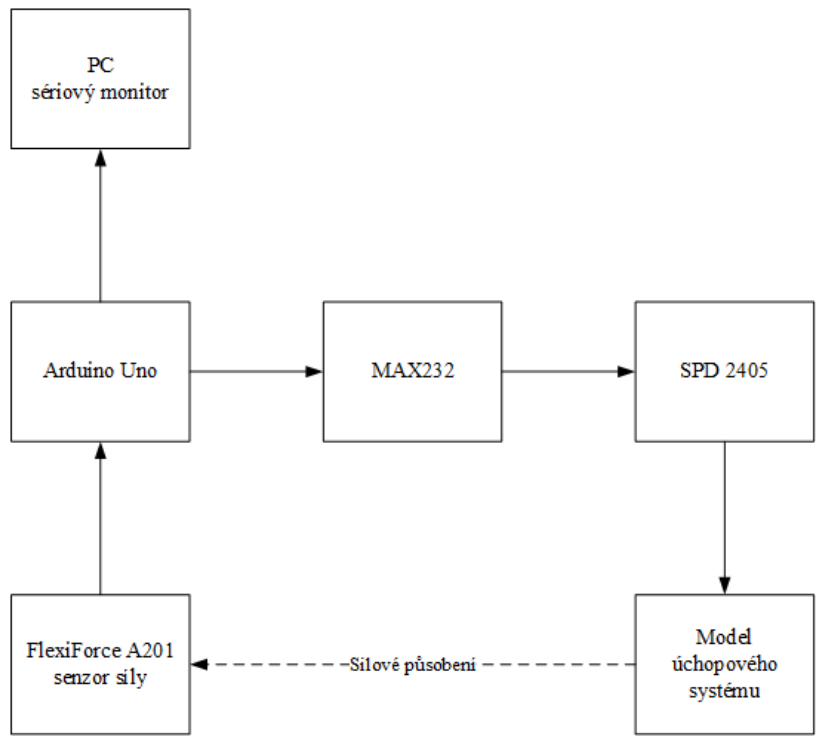
# PŘÍLOHY

## PŘÍLOHA A. Měření silových účinků flexibilního váčku

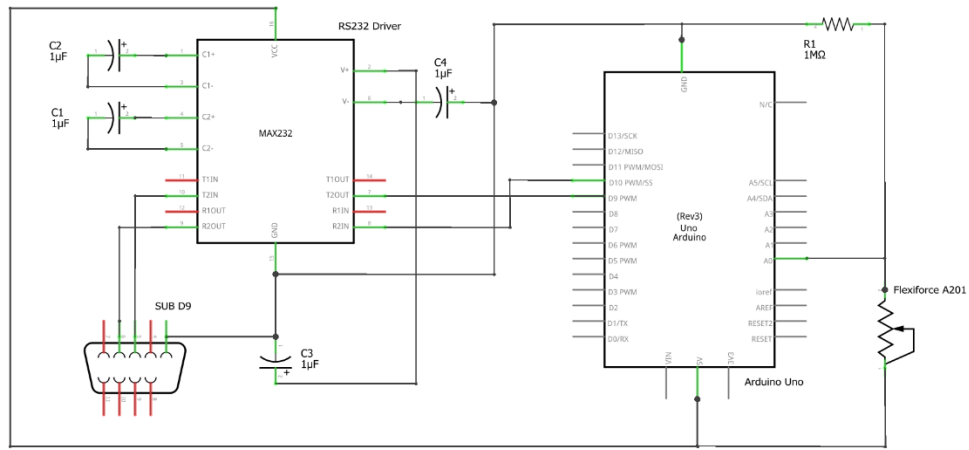
Cílem měření je zjistit jak velkou sílu je schopen latexový váček s magnetickou kapalinou vyvinout po vložení do magnetického pole permanentního magnetu nebo elektromagnetu. K měření síly byl využit senzor FlexiForce A201 společnosti Tekscan s rozsahem 0 – 4,4 N ovládaný pomocí kontroléru Arduino.

Senzor síly byl zapojen dle doporučení výrobce v sérii s rezistorem 1 M $\Omega$  a napájen 5 V. Aplikací síly na měřicí plochu senzoru docházelo ke změně jeho odporu a tím ke změně napětí na součástce. Napětí na senzoru bylo snímáno na analogovém vstupu A0 Arduino kontroléru. Snímané napětí bylo převáděno z hodnoty 0 – 5 V na digitální hodnotu 0 – 1023 pomocí AD převodníku a zasíláno do počítače pomocí sériového rozhraní.

Pro řízení napájení elektromagnetu byl ke kontroléru připojen programovatelný DC zdroj SPD2405 přes sériové rozhraní RS232. Pro zajištění komunikace mezi kontrolérem a zdrojem byl použit řadič MAX232 společnosti Texas Instrument. Zasíláním definovaných instrukcí tak bylo možné na zdroji nastavit požadovaný proud a napětí.



Obr. A.1 – Blokové schéma zapojení měření



Obr. A.2 – Schéma zapojení MAX232 řadiče

Senzor síly vykazoval několik negativních vlastností, na základě kterých bylo potřeba měření upravit. V první řadě senzor vykazoval značnou setrvačnost a pro ustálení hodnoty tedy bylo potřeba počkat minimálně 3 s nebo vytvořit softwarovou validaci čtených hodnot. V druhé řadě byl senzor velmi nepřesný v případě nerovnoměrného zatížení. K tomuto účelu byla tedy vyrobena tvrdá plastová destička pokrývající měřící plochu senzoru zajišťující rovnoměrné rozložení síly.

### **Softwarová validace**

Vzhledem ke značné setrvačnosti senzoru musely být měřené hodnoty softwarově validovány. Jako platný výsledek byl považován aritmetický průměr  $\bar{x}$  celkem 100 naměřených hodnot měřených po 10 ms intervalech, jejichž směrodatná odchylka  $\sigma$  byla menší než 1.

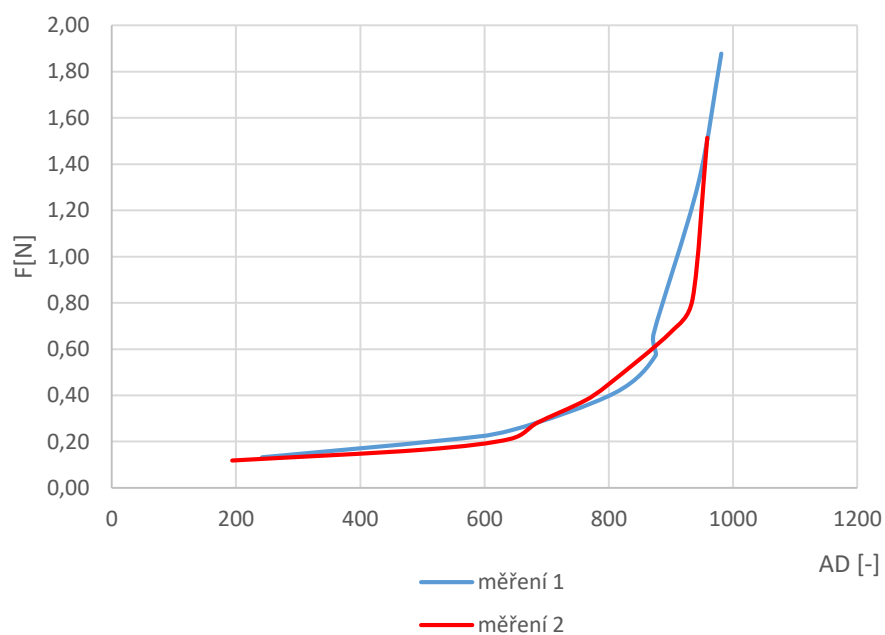
(A.1):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

## Kalibrace senzoru FlexiForce A201

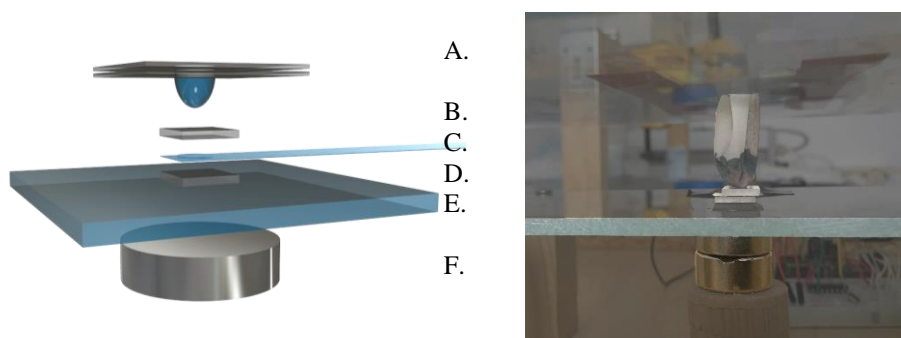
Pro přiřazení snímané hodnoty napětí příslušné síle bylo potřeba provést kalibraci senzoru. Kalibrace byla provedena aplikací známé síly a odečítáním softwarově validované hodnoty získané pomocí AD převodníku ze snímaného napětí na analogovém vstupu kontroléru. Tímto způsobem byla sestavena kalibrační křivka. Pro ověření správnosti výsledků bylo měření provedeno dvakrát.

Graf A.1 - Kalibrační křivka senzoru FlexiForce A201



## Měření s permanentním magnetem

Jako zdroj magnetického pole působícího na magnetickou kapalinu v latexovém váčku byly použity dva neodymové magnety ( $B_r = 1.14 \text{ T}$ ,  $\mu_r = 1.2$ ) umístěné nad sebou. Mezi permanentními magnety a vlastním váčkem byla umístěna pracovní deska se senzorem síly a dvě plastové destičky zajišťující rovnoměrné rozložení síly na měřící ploše senzoru. Magnetická indukce v oblasti špičky latexového váčku se pohybovala kolem 180 mT.

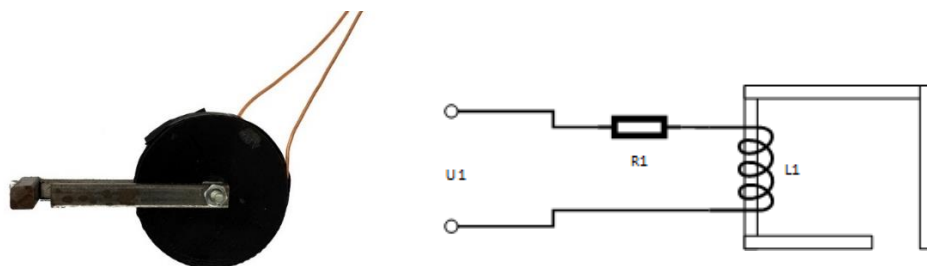


Obr. A.3 – Měření silových účinků flexibilního váčku s magnetickou kapalinou

- A. latexový váček umístěný mezi dvě melinexové fólie
- B. horní plastová destička zajišťující rovnoměrné zatížení senzoru (výška 2 mm)
- C. senzor FlexiForce A201 (výška 0,2 mm)
- D. spodní plastová destička zajišťující rovnoměrné zatížení senzoru (výška 2 mm)
- E. pracovní deska (výška 4,2 mm)
- F. permanentní magnet ( $B = 500 \text{ mT}$  v těsné blízkosti povrchu)

## Měření s elektromagnetem

Pro testování vlivu elektromagnetického pole na flexibilní váček byl sestaven model úchopového systému tvořený cívkou se 70 závitů s železným jádrem se vzduchovou mezerou 5 mm, do které byl umístěn flexibilní váček a senzor FlexiForce A201.



Obr. A.4 – Model úchopového systému

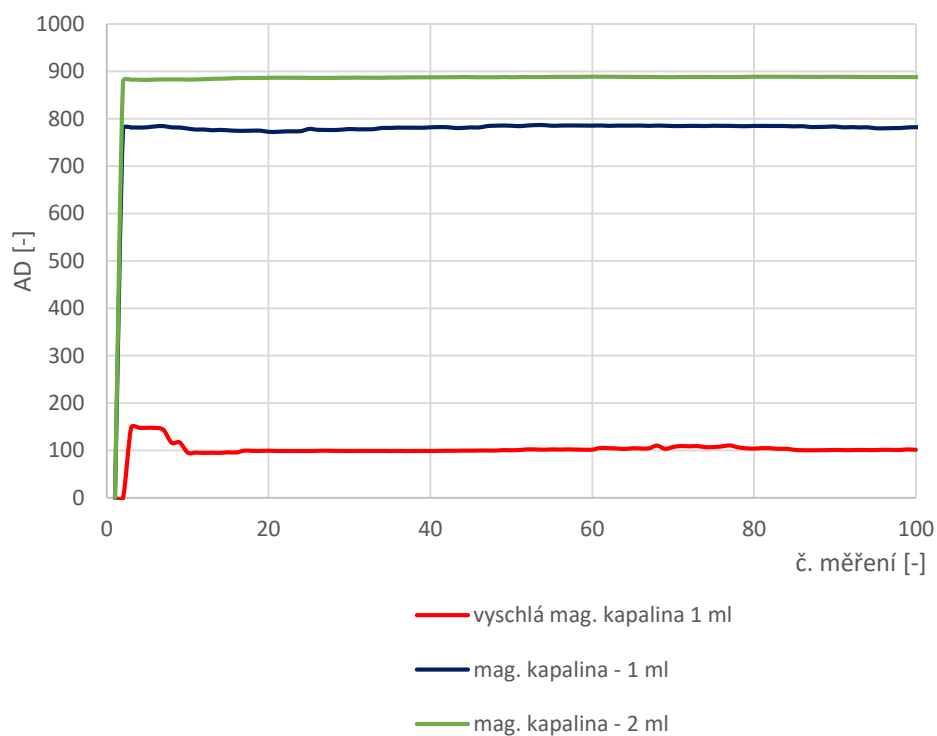
Arduino kontrolér byl naprogramován tak, aby v první řadě nastavil hodnotu proudu a napětí programovatelného zdroje na definovanou úroveň. Vlivem magnetické indukce ve vzduchové mezeře jádra cívky elektromagnetu by začala magnetická kapalina ve flexibilním váčku tlačit na senzor síly. Tak by došlo ke změně odporu senzoru síly a tím ke změně napětí na analogovém vstupu kontroléru. Pomocí softwarové validace by kontrolér počkal na ustálení měřené hodnoty, kterou by pak zobrazil. Tímto způsobem by bylo možné postupně nastavovat hodnoty napětí a proudu v celém rozsahu programovatelného zdroje a měřit sílu, kterou flexibilní váček vyvíjí.

## Výsledky měření

Následující grafy zobrazují výsledky 100 po sobě jdoucích měření. Z grafů je patrné, že i přes softwarovou validaci výsledků hodnota na začátku mírně kolísá. Po počátečním ustálení se hodnota mění už jen minimálně.

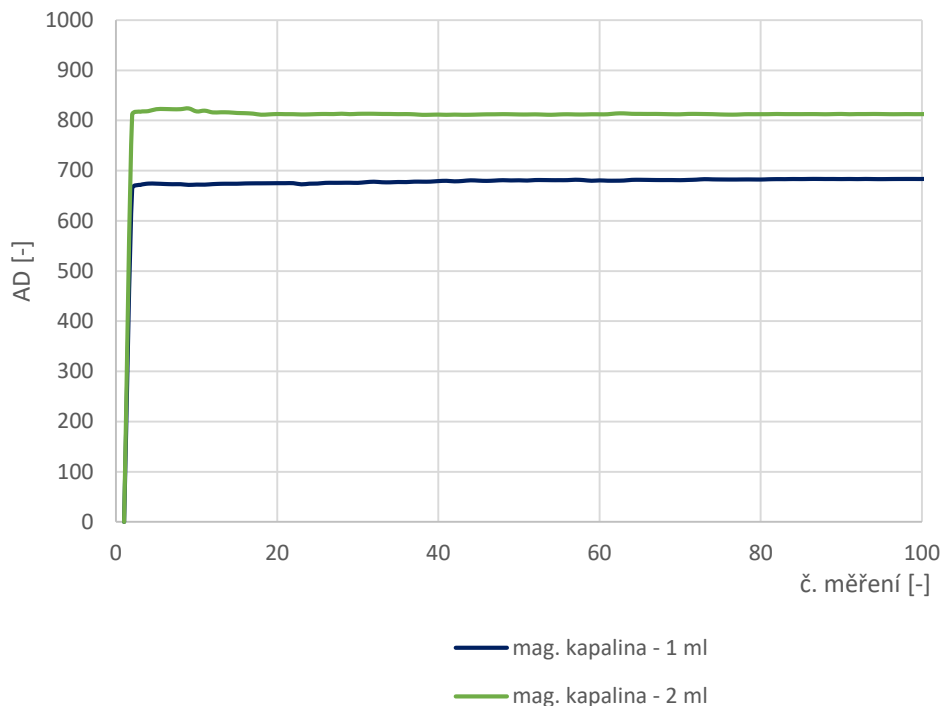
Pro měření silových účinků latexového váčku v magnetickém poli permanentního magnetu byly použity dva materiály: latex z latexové rukavice a latex z prezervativu.

Graf A.2 - Silové účinky latexový váček (prezervativ)





Graf A.3 - Silové účinky latexový váček (rukavice)



Z grafů je patrné, že latexový váček s vyschlou magnetickou kapalinou je schopný vyvinout mnohem menší sílu než váček s kapalinou nevyschlou. To je s největší pravděpodobností způsobené tím, že zaschnutí kapaliny způsobí částečné zatuhnutí flexibilního váčku. Vlastní pohyb shluků magnetických částic vyschlé magnetické kapaliny je uvnitř flexibilního váčku navíc značně omezen, což dále snižuje výslednou sílu, kterou je flexibilní váček schopen vyvinout. U latexových váčků z latexové rukavice a z prezervativu jsou naměřené síly srovnatelné. Latexový váček vyrobený z prezervativu je schopen vyvinout sílu o něco vyšší vzhledem k větší flexibilitě, je ale náchylnější na protržení. Množství magnetické kapaliny významným způsobem ovlivňuje sílu, kterou je váček schopen vyvinout.

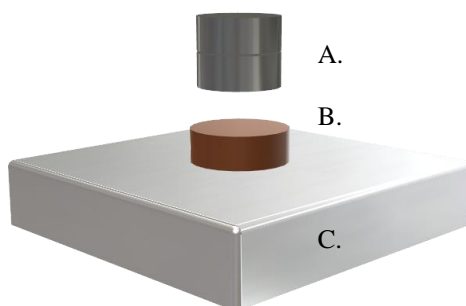
Měření silových účinků latexového váčku v magnetickém poli elektromagnetu se ukázalo jako liché. Magnetická indukce ve vzduchové mezeře dosahovala při nastavení maximálního možného proudu 5 A pouze přibližně 11 mT a flexibilní váček tak nebyl schopen vyvinout dostatečnou

sílu měřitelnou senzorem FlexiForce A201. Pro návrh úchopového systému využívaný u mikro-robotů se tedy jeví jako optimální využití permanentního magnetu.

## PŘÍLOHA B. Měření silových účinků směsi magnetické kapaliny a silikonu

Cílem měření bylo zjistit, jak velkou sílu jsou schopné vyvinout vzorky směsi magnetické kapaliny a dvousložkového adičního silikonu EcoFlex 00-10 po vložení do magnetického pole permanentního magnetu. Testována byla řada vzorků s postupně se navyšujícím množstvím magnetické kapaliny ve směsi.

Základním principem měření byla změna měřené hmotnosti v přítomnosti magnetického pole. Pro vážení jednotlivých vzorků bylo využito laboratorní váhy. Jako zdroj magnetického pole byly použity dva na sebe položené neodymové magnety ( $B_r = 1.14 \text{ T}$ ,  $\mu_r = 1.2$ ). Uspořádání měření je zobrazeno na Obr. B.1.



Obr. B.1 – Měření silových účinků směsi magnetické kapaliny a silikonu

- A. *permanentní magnet*
- B. *vzorek směsi magnetické kapaliny a silikonu*
- C. *laboratorní váha*

Vzorek byl nejprve zvážen bez přítomnosti magnetického pole. Hmotnost silikonových složek byla u všech vzorků 7 g. Celková hmotnost vzorků se ale lišila v důsledku rozdílného množství přidané magnetické kapaliny. Poté byly přiloženy neodymové magnety do vzdálenosti 4 cm od povrchu laboratorní váhy. Vzdálenost 4 cm byla určena experimentálně tak, aby nemohlo dojít ke zvednutí měřeného vzorku. Magnetická indukce na

povrchu měřeného vzorku se pohybovala kolem 31 mT. Magnetické pole permanentních magnetů začalo po přiložení přitahovat měřený vzorek, čímž došlo ke snížení hodnoty hmotnosti na laboratorní váze. Síla, kterou byl vzorek přitahován, byla přímo úměrná rozdílu hmotností před a po vložení do magnetického pole.

(B.1)

$$\begin{aligned}
 F_1 &= F_2 + F_p \\
 m_1 \cdot g &= m_2 \cdot g + F_p \\
 F_p &= (m_1 - m_2) \cdot g
 \end{aligned}$$

$m_1$	hmotnost vzorku	$F_p$	přitažná síla
$m_2$	hmotnost zvážená po přiložení magnetického pole	$g$	gravitační zrychlení

Z rozdílu hmotností bylo zapotřebí navíc odečíst chybu  $m_{ER}$  způsobenou přitahováním vlastní vážící desky laboratorní váhy (0.34 g).

(B.2)

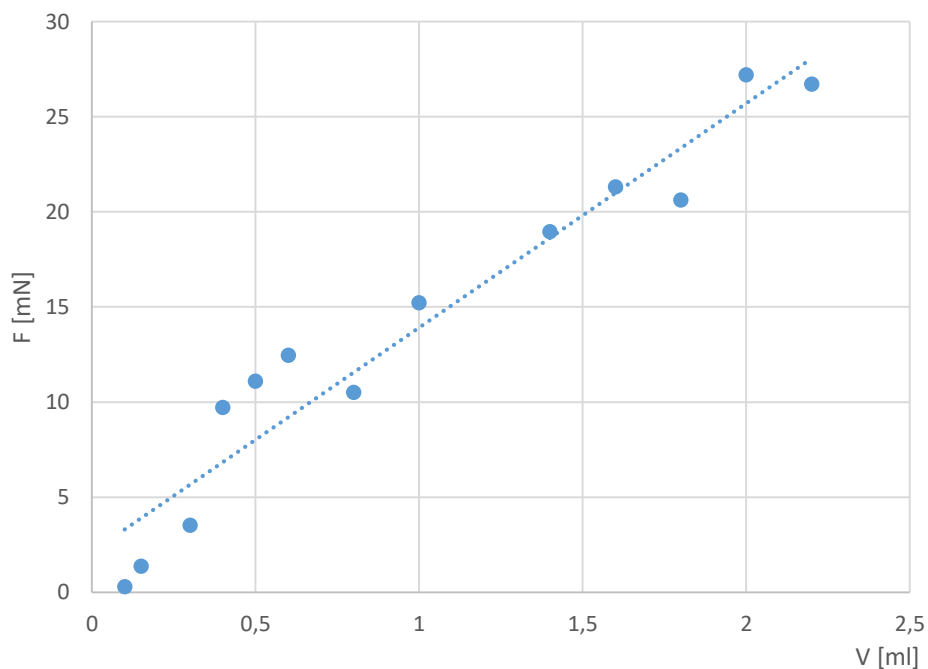
$$F_p = (m_1 - m_2 - m_{ER}) \cdot g$$

## Výsledky měření

Tab. B.1 – Silové účinky směsi magnetické kapaliny a silikonu

Množství magnetické kapaliny	Hmotnost složek silikonu	Rozdíl hmotnosti [g]	Přitažná síla [mN]
0.1 ml	7 g	0.03	0.29
0.15 ml		0.14	1.38
0.3 ml		0.36	3.54
0.4 ml		0.99	9.72
0.5 ml		1.13	11.10
0.6 ml		1.27	12.48
0.8 ml		1.07	10.51
1.0 ml		1.55	15.23
1.4 ml		1.93	18.96
1.6 ml		2.17	21.32
1.8 ml		2.10	20.63
2.0 ml		2.77	27.21
2.2 ml		2.72	26.72

Graf B.1 - Silové účinky magnetické směsi a silikonu



Z grafů je patrné, že množství magnetické kapaliny ve směsi významným způsobem ovlivňuje sílu, kterou je pak směs v magnetickém poli přitahována. Nevýhodou vyšší koncentrace magnetické kapaliny je skutečnost, že pak směs více lepí a hůře drží tvar. Při koncentraci 2.2 ml magnetické kapaliny / 7 g silikonu již pak směs již vůbec nezatuhla.

## PŘÍLOHA C. Vývojové fáze výroby flexibilního váčku

Následující obrázky znázorňují některé z vývojových prototypů flexibilního váčku pro magnetickou kapalinu. Mnohé z prototypů nebylo možné zachovat, protože došlo k jejich nenávratnému poškození při plnění magnetickou kapalinou.

### Výroba latexového váčku



Obr. C.1 – Latexový váček 1.0

**Materiál:** latex (prezervativ)

**Výroba:** lepení mezi dvě PET fólie nanesené lepidlem na plast

**Uzavření:** utěsnění plnicího otvoru lepidlem



Obr. C.2 – Latexový váček 1.1

**Materiál:** latex (prezervativ)

**Výroba:** lepení a lisování mezi dvě PET fólie nanesené lepidlem na plast

**Uzavření:** uzavření plnicího otvoru pomocí lepicí pásky



Obr. C.3 – Latexový váček 1.2

**Materiál:** latex (prezervativ)

**Výroba:** lepení a lisování mezi dvě melinexové fólie naleptané pomocí acetonu a nanesené epoxidovým lepidlem, plnění v přítomnosti magnetického pole

**Uzavření:** lepení a lisování třetí melinexové fólie



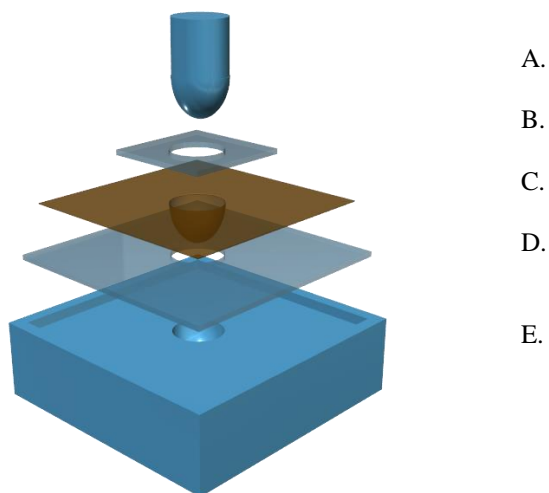
Obr. C.4 – Latexový váček 1.3

**Materiál:** latex (rukavice)

**Výroba:** lepení a lisování mezi dvě melinexové fólie naleptané pomocí acetonu a nanesené epoxidovým lepidlem, plnění v přítomnosti magnetického pole

**Uzavření:** lepení a lisování třetí melinexové fólie

### Výroba silikonového váčku



Obr. C.5 – Konečný postup výroby silikonového váčku

- A. horní díl formy vytlačující kapsu pro magnetickou kapalinu
- B. plastová fólie pro zarovnání silikonu v oblasti okraje váčku
- C. silikonový váček odlévaný ze směsi magnetické kapaliny a silikonu
- D. melinexová fólie zalévaná do těla váčku
- E. spodní díl formy





Obr. C.6 – Silikonový váček 1.0

**Materiál:** silikon EcoFlex 00-30

**Výroba:** odlévání silikonového váčku

**Uzavření:** lepení a lisování silikonového váčku na melinexovou fólii nanesenou epoxidovým lepidlem



Obr. C.7 – Silikonový váček 1.1

**Materiál:** silikon EcoFlex 00-30

**Výroba:** odlévání silikonového váčku, přidána melinexová fólie pro zarovnání silikonu v oblasti okraje váčku a melinexová fólie zalévána do těla váčku

**Uzavření:** lepení melinexové fólie epoxidovým lepidlem



Obr. C.8 – Silikonový váček 1.2

**Materiál:** silikon EcoFlex 00-30

**Výroba:** odlévání silikonového váčku, přidána melinexová fólie pro zarovnání silikonu v oblasti okraje váčku a melinexová fólie zalévána do těla váčku

**Uzavření:** lepení melinexové fólie epoxidovým lepidlem, zalití silikonem



Obr. C.9 – Silikonový váček 1.3

**Materiál:** silikon EcoFlex 00-10

**Výroba:** odlévání silikonového váčku

**Uzavření:** zalití silikonem



Obr. C.10 – Silikonový váček 1.4

**Materiál:** silikon EcoFlex 00-10

**Výroba:** odlévání silikonového váčku, přidána melinexová fólie pro zarovnání silikonu v oblasti okraje váčku a melinexová fólie zalévána do těla váčku

**Uzavření:** zalití silikonem



Obr. C.11 – Silikonový váček 1.5

**Materiál:** směs silikonu EcoFlex 00-10 a magnetické kapaliny

**Výroba:** odlévání silikonového váčku, přidána melinexová fólie pro zarovnání silikonu v oblasti okraje váčku a melinexová fólie zalévána do těla váčku

**Uzavření:** zalití silikonem



*Obr. C.12 – Silikonová nádoba  
s magnetickou kapalinou*

**Materiál:** silikon EcoFlex 00-30

**Výroba:** odlévání silikonové  
nádoby pro magnetickou kapalinu

**Uzavření:** zalití silikonem

## PŘÍLOHA D. Silikony – technická specifikace

### EcoFlex Series

	Mixed Viscosity (ASTM D-2393)	Specific Gravity (g/cc) (ASTM D-1475)	Specific Volume (cu. in./lb.) (ASTM D-1475)	Pot Life (ASTM D-2471)	Cure Time	Shore Hardness (ASTM D-2240)	Tensile Strength (ASTM D-412)	100% Modulus (ASTM D-412)	Elongation at Break % (ASTM D-412)	Die B Tear Strength (ASTM D-624)	Shrinkage (in./in.) (ASTM D-3566)
Ecoflex® 5	13,000 cps	1.07	25.8	1 min.	5 min.	5A	350 psi	15 psi	1000%	75 pli	< .001 in./in.
Ecoflex® 00-50	8,000 cps	1.07	25.9	18 min.	3 hours	00-50	315 psi	12 psi	980%	50 pli	< .001 in./in.
Ecoflex® 00-30	3,000 cps	1.07	26.0	45 min.	4 hours	00-30	200 psi	10 psi	900%	38 pli	< .001 in./in.
Ecoflex® 00-20	3,000 cps	1.07	26.0	30 min.	4 hours	00-20	160 psi	8 psi	845%	30 pli	< .001 in./in.
Ecoflex® 00-10	14,000 cps	1.04	26.6	30 min.	4 hours	00-10	120 psi	8 psi	800%	22 pli	< .001 in./in.

\*All values measured after 7 days at 73°F/23°C

### Dragon Skin Series

	Mixed Viscosity (ASTM D-2389)	Specific Gravity (g/cc) (ASTM D-1475)	Specific Volume (cu. in./lb.) (ASTM D-1475)	Pot Life (ASTM D-2471)	Cure Time	Shore A Hardness (ASTM D-2240)	Tensile Strength (ASTM D-412)	100% Modulus (ASTM D-412)	Elongation at Break % (ASTM D-412)	Die B Tear Strength (ASTM D-624)	Shrinkage (in./in.) (ASTM D-3566)
Dragon Skin® 10 Very Fast	23,000 cps	1.07	25.8	4 min.	30 min.	10A	475 psi	22 psi	1000%	102 pli	< .001 in./in.
Dragon Skin® 10 Fast	23,000 cps	1.07	25.8	8 min.	75 min.	10A	475 psi	22 psi	1000%	102 pli	< .001 in./in.
Dragon Skin® 10 Medium	23,000 cps	1.07	25.8	20 min.	5 hours	10A	475 psi	22 psi	1000%	102 pli	< .001 in./in.
Dragon Skin® 10 Slow	23,000 cps	1.07	25.8	45 min.	7 hours	10A	475 psi	22 psi	1000%	102 pli	< .001 in./in.
Dragon Skin® 20	20,000 cps	1.08	25.6	25 min.	4 hours	20A	550 psi	49 psi	620%	120 pli	< .001 in./in.
Dragon Skin® 30	30,000 cps	1.08	25.7	45 min.	16 hours	30A	500 psi	86 psi	364%	108 pli	< .001 in./in.

### Soma Foama Series

	A:B Mix Ratio by Volume	A:B Mix Ratio by Weight	Mixed Viscosity (cps) (ASTM D-2393)	Specific Gravity (g/cc) (ASTM D-1475)	Specific Volume (cu. in./lb.)	Color	Pot Life (Cream Time) (ASTM D-2471)	Handling Strength	Cure Time	Approx. Volumetric Expansion	Lbs. / Cu. Foot = Kgs. / Cu. Meter
Soma Foama® 15	2:1 pbv	100:47pbw	10,000	0.24	115	White	30 secs	20 mins	1 hr	4 times	15 lb/ft <sup>3</sup> = 240 kg/m <sup>3</sup>
Soma Foama® 25	1:1 pbv	1:1 pbw	10,000	0.40	69	White	90 secs	20 mins	1 hr	2-3 times	25 lb/ft <sup>3</sup> = 400 kg/m <sup>3</sup>