

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2019

Bc. Jan Zítka



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

ZAŘÍZENÍ PRO MAGNETICKÉ MÍCHÁNÍ SUSPENZE S FEROMAGNETICKÝMI ČÁSTICEMI

DEVICE FOR MAGNETIC STIRRING OF SUSPENSION WITH FERROMAGNETIC PARTICLES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Zítka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Dalibor Červinka, Ph.D.

BRNO 2019

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. Jan Zítka

ID: 164797

Ročník: 2

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Zařízení pro magnetické míchání suspenze s feromagnetickými částicemi

POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Vytvořete funkční verzi magnetického obvodu zařízení navrženého v rámci semestrálního projektu.
2. Realizujte elektronické obvody napájecího měniče.
3. Ověřte funkčnost míchání feromagnetických částic.
4. Navrhněte alternativní řešení míchacího zařízení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] PATOCKA, Miroslav. Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice. 1. vyd. V Brně: VUTIUM, 2011, 564 s. ISBN 978-80-214-4003-6.

[2] Vorel P., Patocka M., Průmyslová elektronika, Vydání 1., skriptum FEKT VUT Brno, 2007

[3] SKALICKÝ, J. Navrhování elektrických pohonů. Navrhování elektrických pohonů. Brno: VUT FEKT, 2002.

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 22.5.2019

Vedoucí práce: Ing. Dalibor Červinka, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Ondřej Vitek, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Práce se zabývá návrhem a konstrukcí zařízení pro míchání feromagnetických částic v roztoku pomocí magnetického pole. Vychází z předchozí práce, ve které bylo zařízení zkonstruováno pro jednu mikrozkušavku (jeden vzorek). V této práci jsou navrženy tři varianty vylepšení zařízení pro míchání a separaci magnetizovatelných částic z hlediska množství vzorků (96), ve kterých může separace probíhat najednou. Jednotlivé návrhy jsou popsány a předběžně dimenzovány.

Pro konstrukci byla vybrána první varianta návrhu míchacího zařízení, která je odvozena od funkčního prototypu z bakalářské práce. Nejprve byl proveden návrh magnetického obvodu a napájecího měniče. Následně bylo toto zařízení zkonstruováno, ale jen pro jednu mikrozkušavku z důvodu testování funkčnosti. Třetí varianta návrhu byla realizována jen experimentálně, její konstrukce byla navržena v CAD programu a jednotlivé díly byly vytištěny na 3D tiskárně.

Jako alternativní řešení, které je kompromisem mezi čistě elektromagnetickou míchačkou a mechanickým mícháním, byl navržen a zkonstruován další prototyp pomocí 3D tiskárny a CNC zařízení. Ten využívá neodymové magnety a krokový motor. U prototypů byla ověřena schopnost míchání feromagnetických částic v roztoku.

Klíčová slova

magnetické pole; magnetizovatelné částice; míchání; separace; 3D tisk

Abstract

The aim of this work deals with the design and manufacture of a device for mixing of magnetic beads in solution by magnetic field. It is based on my previous bachelor thesis, where the device was created for one microtube (one sample). In this following work, the three improved variants for mixing and separation of 96 samples at one time were designed.

The first variant of device, derived from functional prototype from bachelor thesis, was manufactured. First, the magnetic circuit and power converter were designed. Subsequently, the device was manufactured just for one microtube due to functionality testing. The third variant was realized only experimentally, the construction was designed in CAD program, and individual parts were created using 3D printer.

As an alternative solution, which should be the compromise among electromagnetic and mechanical stirring, additional prototype was manufactured using 3D printer and CNC instrument. This prototype utilizes neodymium magnets and a stepper motor. The capability of magnetic beads mixing in solution was verified.

Keywords

magnetic field; magnetizable beads; mixing; separation; 3D print

Bibliografická citace:

ZÍTKA, Jan. Zařízení pro magnetické míchání suspenze s feromagnetickými částicemi [online]. Brno, 2019. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117519>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Dalibor Červinka.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma *Zařízení pro magnetické míchání suspenze s feromagnetickými částicemi* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 22. května 2019

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Daliboru Červinkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále děkuji Ing. Marcelu Jandovi, Ph.D. za poskytnutí přístupu k programu pro simulování magnetických polí a za cenné rady v této problematice, a také děkuji Ing. Kristýně Šmerkové, Ph.D. za pomoc a rady při vypracovávání těch částí diplomové práce souvisejících s bioanalýzou.

V Brně dne: 22. května 2019

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod.....	12
1.1	Fyzikální podstata míchání	13
1.2	Současný stav techniky	14
2	Zařízení pro míchání magnetizovatelných částic.....	15
2.1	Magnetický obvod zařízení	16
2.2	Silová část měniče.....	16
2.3	Program a řízení míchání	17
3	Návrhy magnetického obvodu zařízení.....	19
3.1	Návrh a výpočet úprav zařízení.....	19
3.1.1	Varianta 1.....	19
3.1.2	Varianta 2.....	22
3.1.3	Varianta 3.....	26
3.2	Úpravy napájecích měničů.....	29
3.3	Návrh magneticko-mechanické verze míchacího zařízení.....	29
4	Realizace Zařízení.....	34
4.1	Realizace návrhu varianty 1	34
4.1.1	Realizace magnetického obvodu	34
4.1.2	Realizace napájecího měniče	38
4.2	Zkušební realizace varianty vzduchová cívka.....	40
4.2.1	Ověření funkce míchání u pokusné realizace varianty 3	42
4.3	Realizace magneticko/mechanické verze míchacího zařízení	43
4.3.1	Ověření funkce magneticko-mechanické verze míchacího zařízení.....	45
4.4	Ověření funkce varianty 1	45
5	Závěr	48
6	Použitá Literatura	50

Seznam obrázků

Obr. 1-1 Graf ideálního průběhu indukce magnetického pole. V grafu je znázorněno, kde se v mikrozkumavce průběh mag. indukce nachází.	13
Obr. 2-1 Foto z testu míchaní se střídáním polarity jedné cívky.	15
Obr. 2-2 Schéma silové části měniče [2]	17
Obr. 2-3 Foto řídicí jednotky arduino DUE a uživatelského rozhraní.....	18
Obr. 3-1 Návrh segmentu zařízení. A-náhled, B-horní pohled se dvěma mikrozkumavkami.	20
Obr. 3-2 Počítané oblasti magnetického odporu jednoho polpáru první varianty. ..	20
Obr. 3-3 Graf závislosti Joulových ztrát na délce cívky první varianty.	22
Obr. 3-4 Návrh zařízení s 12 cívkami.	23
Obr. 3-5 Počítané oblasti magnetického odporu polpáru druhé varianty zařízení...	24
Obr. 3-6 Graf závislosti Joulových ztrát na délce cívky druhé varianty.....	25
Obr. 3-7 Návrh třetí varianty zařízení.	26
Obr. 3-8 Simulace magnetického pole při mag. napětí cívek 250 A a -50 A. [11] .	27
Obr. 3-9 Graf závislosti indukce magnetického pole na vzdálenosti.	27
Obr. 3-10 Návrh 8 variant tvarů pólů (rozměry jsou v mm).....	30
Obr. 3-11 Sestava zařízení bez krokového motoru.	31
Obr. 3-12 Spodní pohled na rozložení permanentních magnetů.	31
Obr. 3-13 Graf průběhu indukce mag. pole v místě znázorněném červenou přímkou na obr. 3-14.	32
Obr. 3-14 Rozložení indukce magnetického pole v programu Ansys. [11].....	32
Obr. 4-1 Návrh obráběcích operací v program Fusion 360.	35
Obr. 4-2 Foto obrábění pólů na 5-osé CNC fréze V2-10 (pocketNC).....	35
Obr. 4-3 Foto připraveného jádra na navinutí cívky.....	36
Obr. 4-4 A-Foto hotového mag. obvodu. B-Foto zkoušky připevnění jader k jhu..	37
Obr. 4-5 Schéma silové části měniče	38
Obr. 4-6 Návrh plošného spoje v programu Eagle.	39
Obr. 4-7 Rozložení indukce mag. pole u experimentálního řešení. [11]	40
Obr. 4-8 Graf rozložení indukce mag. pole na úsečce v mikrozkumavce.	41

Obr. 4-9 Konstrukce zařízení. A-vyrobené a sestavené díly, B-návrh mechanických částí.	42
Obr. 4-10 Foto při obrábění spodní části pólů pro magneto/mechanické verze míchacího zařízení.	43
Obr. 4-11 Foto magneticko-mechanické verze míchacího zařízení.....	44
Obr. 4-12 Záznam řídicího PWM signálu a proudu tekoucím cívkou. Červený průběh – PWM cívka A, zelený průběh – proud tekoucí cívkou s převodní konstantou 100 mV / 10 A.	45
Obr. 4-13 Zapojení míchacího zařízení při ověřování funkce s řídicí jednotkou Raspberry pi zero.	46
Obr. 4-14 Foto při pulsech proudu v jednotlivých cívkách. Pro znázornění je použita mikroskopavka o objemu 1,5 ml.	47

1 ÚVOD

V biochemickém a bioanalytickém odvětví jsou magnetizovatelné mikro a nanočástice používány pro izolaci různých biochemických struktur. Z tohoto hlediska je nejdůležitější právě povrch částice. Díky svým specifickým vlastnostem, je na povrch částice navázán jen příslušný analyt, který daná aplikace vyžaduje. Magnetizovatelné částice se v laboratorních podmínkách běžně využívají k separaci nukleových kyselin (DNA, RNA), proteinů (protilátek nebo antigenů) nebo i částí buněk. Pro účely této práce je však důležitější jádro částice, které s výhodou bývá magneticky vodivé. Protože jsou takové částice a roztoky využívající se pro extrakci relativně drahé a analyt často i vzácný, používá se jen malé množství těchto látek. Kapalný roztok je uložen v malé nádobě o objemu od 0,2 do 1,5 ml. V této nádobě pak roztok prochází fázemi míchání a přitahování. Fáze míchání může být zprostředkována mechanicky nebo pomocí magnetického pole. Mezi mechanické míchání patří opakovaný pohyb sem a tam, nebo využití ultrazvuku v podobě lázně nebo jehly, která se do roztoku ponoří. [1] [2] [3] [4] [5]

Magnetické míchání funguje na principu vytváření lokálních maxim indukce magnetického pole v prostorách nádoby. Díky změně těchto míst v prostoru, se částice pohybují v roztoku a tím se promíchávají. Pro fázi přitažení, se při užití mechanických míchacích zařízení využívají neodymové magnety, které se přiloží k nádobě. Po shluknutí magnetických částic ke stěně nádoby (k neodymovému magnetu) je roztok odčerpán a nahrazen jiným. Tomuto postupu si říká promývání, protože se tím odstraňují látky (nečistoty, interferenty), které naopak nemají být izolovány. Výhodou při užití elektromagnetického míchání je, že není potřeba permanentní magnet pro přitažení částic. Přitažení je dokázáno jen změnou programu.

Tato práce se zabývá vylepšením magnetické míchačky, proto je důležité pochopit princip tohoto zařízení. Stěžejní je uvědomit si fakt, že změnou směrů magnetického toku se pro částice nic nemění, vždy se přitáhnou do místa, kde je nejvyšší indukce magnetického pole.

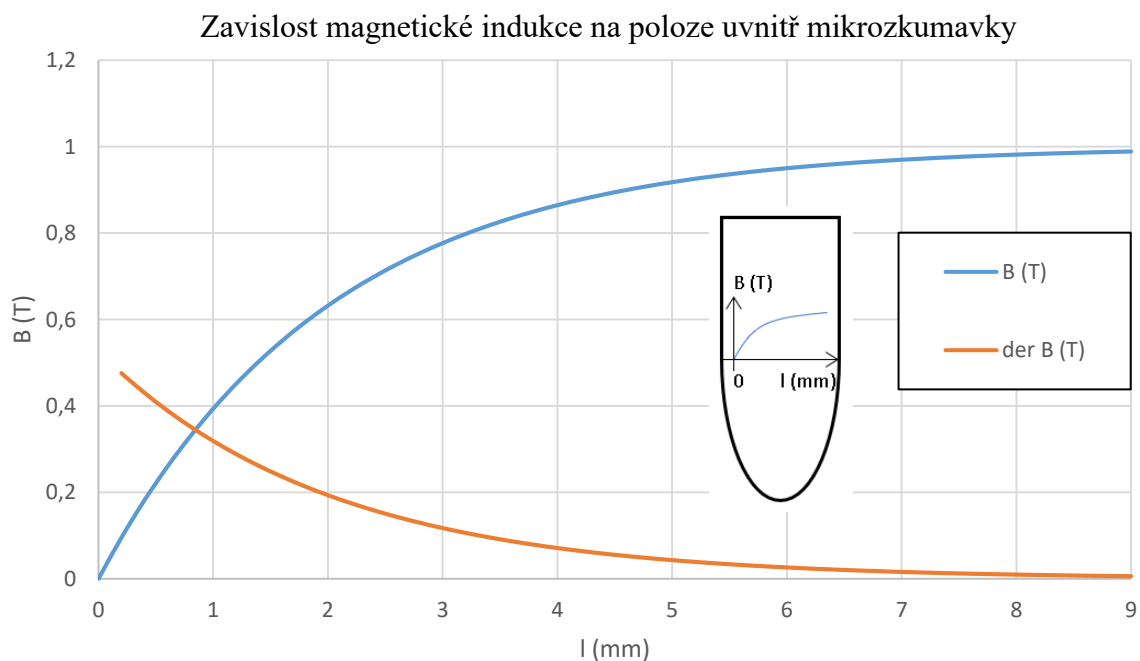
Výsledkem této práce by měly být různé varianty vylepšení předchozího zařízení. Nové zařízení musí mít možnost míchat 96 vzorků v prostorově omezené matici 8×12 . Je tedy snaha o znásobení akčních prvků a zachování užitenosti takového

zařízení. Takové zařízení by bylo vysoce uplatnitelné v biochemické praxi, kdy při jedné analýze by mohlo být měřeno více vzorků najednou tzv. “high throughput analysis“.

1.1 Fyzikální podstata míchání

Každá mikro nebo nano-částice má feromagnetické jádro a obal. Jejich velikosti jsou od 10 nm po 100 μm . Když se taková částice ocitne v magnetickém poli, tak lokálně zesílí účinek tohoto pole. Pokud by částice měly pouze tenký obal nebo ho neměly vůbec, dojde ke shluknutí těchto částic. To je způsobeno tím, že siločáry mag. pole jsou v částici blíže u sebe a je zde tedy vyšší indukce magnetického pole, než je v okolí částice. Pro biochemickou aplikaci zařízení pro míchání s feromagnetickými částicemi je tedy také důležitá tloušťka tohoto neferomagnetického obalu. [1]

Samotná podstata míchání pak vychází ze stejného principu, díky kterému se shluknou částice s malou tloušťkou obalu. V případě, že chceme rozpohybovat částice z místa A do místa B je nutné vytvořit takové magnetické pole, které způsobí prostorové zvyšování indukce magnetického pole ve směru k bodu B. Průběh této indukce mag. pole musí mít v blízkosti bodu A největší derivaci indukce magnetického pole na délce. V blízkosti bodu B je pak indukce mag. pole nejvyšší, ale derivace indukce mag. pole už může být nulová. To je z důvodu, že většinou je toto místo přetnuto stěnou mikroskopu a my nechceme, aby částice byly stlačovány k sobě. [6]



Obr. 1-1 Graf ideálního průběhu indukce magnetického pole. V grafu je znázorněno, kde se v mikroskopu průběh mag. indukce nachází.

Jedním z nejdůležitějších parametru při míchaní je tvar nádoby, ve které jsou částice míchány. Ta má velmi často hlavní podíl na tom, že částice se promíchávají v celém objemu mikrozkuřavky. [7]

1.2 Současný stav techniky

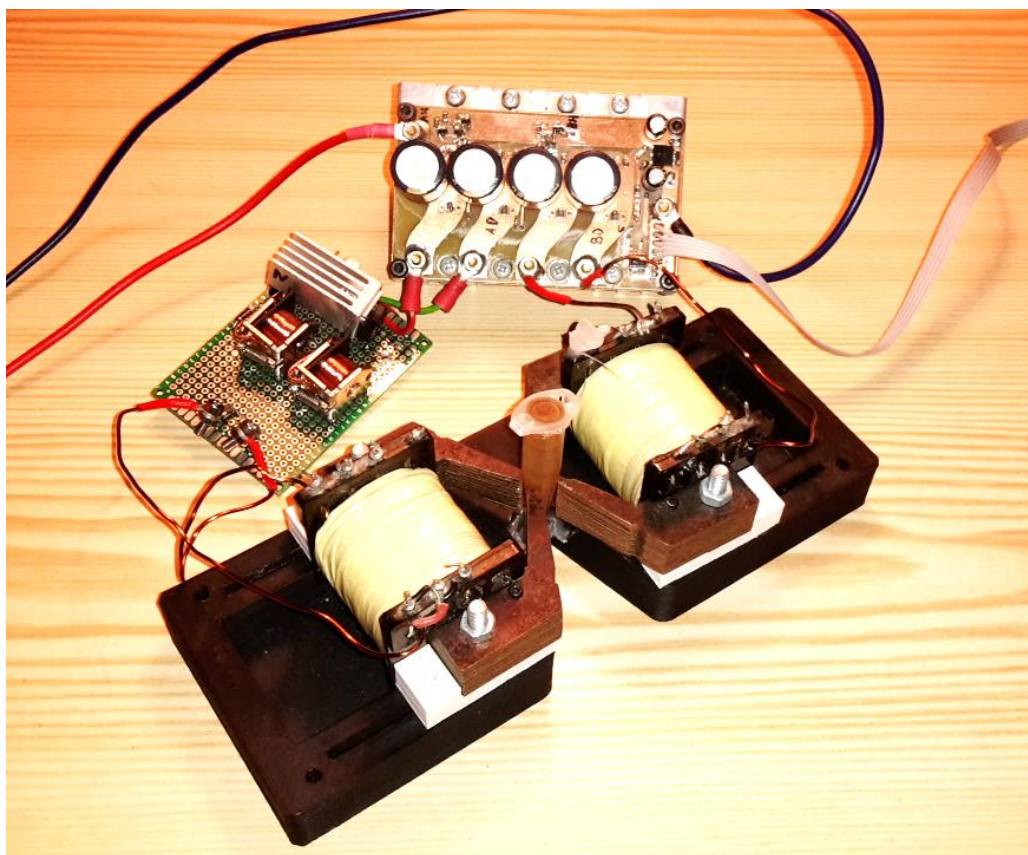
V současnosti neexistuje zařízení, které se komerčně vyrábí a dokáže míchat částicemi pouze za využití elektromagnetického pole. Existují zařízení, která míchají s částicemi mechanicky popř za využití permanentních magnetů. Experimentálně existuje zařízení, které dokáže hýbat částicemi jen za využití dvou vzduchových cívek. Bylo vyrobeno v Sandia Nationa Laboratories (USA). Velikost takového zařízení je však značná. Zařízení funguje na principu že spoji částice do řetězce a s tím otáčí v nádobě. Díky tomu se tekutina promíchává. Tento způsob míchání se zatím běžně nepoužívá.

Jako jediné rozměrově rozumné zařízení, které nyní existuje a je schopno čistě elektromagneticky míchat s částicemi, je prototyp vyrobený v předcházející bakalářské práci. [7]

2 ZAŘÍZENÍ PRO MÍCHÁNÍ MAGNETIZOVATELNÝCH ČÁSTIC

V bakalářské práci byl vyroben prototyp zařízení pro míchaní s magnetizovatelnými částicemi. Rozměry tohoto zařízení pro jeden vzorek byly jen o málo menší než rozměry, kterých chceme dosáhnout v nové verzi, přičemž zdokonalená verze bude pracovat až s 96 vzorky. Mikrozkumavky, které se budou vkládat do tohoto zařízení jsou omezeny maximálním objemem 0,5 ml. [7]

První verze byla navržena pro mikrozkumavky o objemu 1,5 ml. To, že druhá verze bude mít menší objem je vhodné, protože budou nižší nároky na dimenzování magnetického a silového obvodu. Množství vzorků je však tak značné, takže při snaze zachovat malé rozměry, byly zvoleny dvě strategie: (a) zvýšit chladicí výkon, (b) inovovat princip míchaní a zvýšit chladicí výkon.



Obr. 2-1 Foto z testu míchaní se střídáním polarity jedné cívky.

Na Obr. 2-1 je vidět zařízení s úpravou pro přepínání polaritu jedné cívky. Tento test potvrdil, že změna polaritu nemá vliv na přitažení částic. Míchání je stejné jak bez střídání polarit, tak se střídáním polaritu jedné cívky.

2.1 Magnetický obvod zařízení

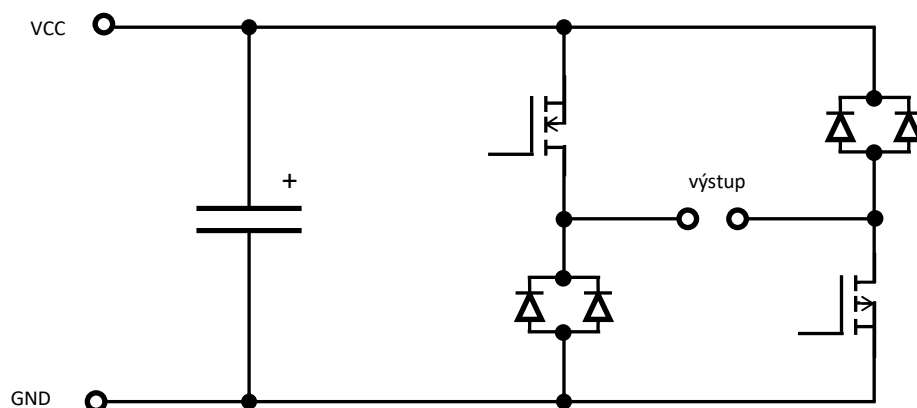
V zařízení pro míchání magnetizovatelnými částicemi jsou dvě cívky a dva stejné magnetické obvody. Ty jsou tvarovány tak, aby koncentrovaly magnetický tok do místa, kde je mikroskopická s magnetizovatelnými částicemi. Aby byly co nejmenší ztráty toku, jsou póly vytvarovány tak, že se zužují do tohoto místa.

Magnetický obvod byl vyroben ze dvou síťových transformátorů, které byly rozebrány a jednotlivé plechy nastříhány do požadovaného tvaru (Obr. 2-1). Cívky byly navinuty 211 závitů Cu drátem o průřezu $0,8 \text{ mm}^2$. Odpor jedné cívky byl $0,8 \Omega$ [1].

Pokusně byla míchačka provozována s magnetickým obvodem ve formě dvou šroubů M12, které byly nasměrovány k mikroskopické. Taková konfigurace byla funkční, ale částice se rozmíchávaly hůře a občas se i shlukovaly do blízkosti pólů. Tímto testem bylo zjištěno, že tvar magnetického obvodu nemá tak významný vliv, jak se předpokládalo. Šrouby M12 ale měly negativní vliv na ohřívání okolního vzduchu, součástek, a hlavně mikroskopické s roztokem. [7]

2.2 Silová část měniče

Byl navržen a vyroben dvoukvadrantový snižující měnič tvořený dvěma asymetrickými můstky. Proudové omezení měniče bylo provedeno jen zvolením vhodného napětí meziobvodu 24 V a výsledným odporem cívky $0,8 \Omega$. Výsledný maximální proud je tedy 30 A. Můstek je tvořený P kanál tranzistorem MOS-FET IRF 4905 s odporem $R_{\text{dson}} = 0,02 \Omega$ a proudem $I_{\text{ds}} = -74 \text{ A}$ a N kanál tranzistorem MOS-FET IRL3705 s odporem $R_{\text{dson}} = 0,01 \Omega$ a proudem $I_{\text{ds}} = 84 \text{ A}$. Pro rychlou demagnetizaci byly zvoleny Schottkyho diody MBR2060 s celkovým maximálním proudem, který teče součástkou 40 A a závěrným napětím 60 V. Kondenzátory meziobvodu mají hodnoty $C = 470 \mu\text{F}$ a $U_{\text{max}} = 63 \text{ V}$ a jsou na měniči 4krát. [7]

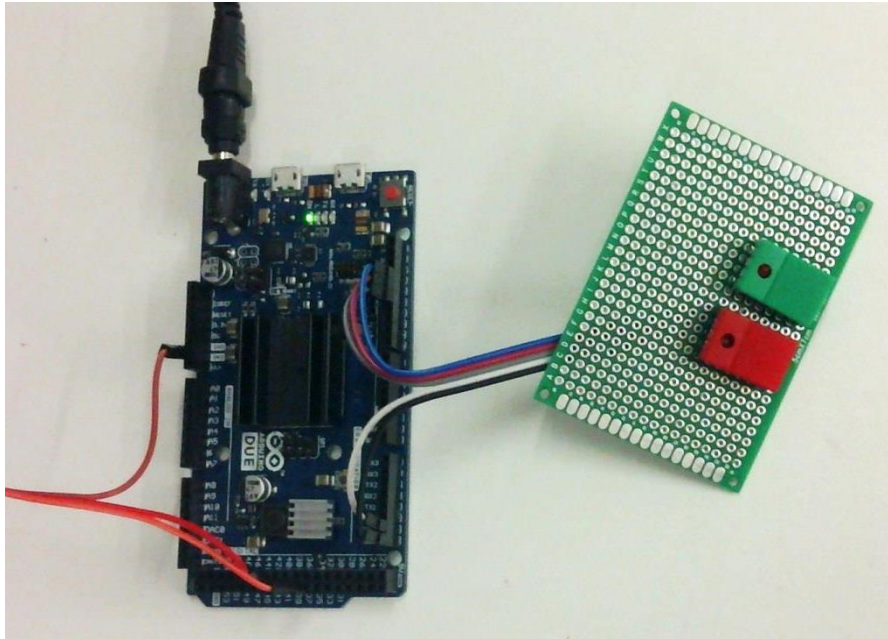


Obr. 2-2 Schéma silové části měniče [2]

Pro chlazení měniče je použit chladič o rozměrech 90×60 mm a s tloušťkou chladiče (i s žebry) 28 mm. Tepelný odpor chladiče je 3,6 K/W. Tepelně nejslabší články na měniči jsou Schottkyho diody, pro které je $I_{Dmax} = 23,63$ A, čemuž odpovídá střída $S_{max} = 62$ %. V programu míchaní se však používá střída 3,125 %. [7]

2.3 Program a řízení míchaní

Uživatel může zařízení pro míchaní magnetizovatelných částic ovládat pomocí dvou tlačítek a stav zařízení mu zobrazují dvě signální LED diody. Prvním tlačítkem se spíná program míchaní, kdy je vždy po dobu 22 ms sepnuta jedna cívka a po pauze 300 ms se spíná druhá cívka. Běh programu je signalizován svícením diody na daném tlačítku a program se vypne opětovným stisknutím tohoto tlačítka. Druhé tlačítko spouští program držení, který náhodně vybere jednu cívku a na ní udržuje konstantní proud, čímž přitáhne částice a drží je na jednom místě mikrozkuřavky. Uživatel má 30 s než se tento program sám vypne. Jako u prvního tlačítka je možné program předčasně vypnout opětovným zmáčknutím a běh programu je signalizován diodou u daného tlačítka. [7]



Obr. 2-3 Foto řídicí jednotky arduino DUE a uživatelského rozhraní.

Změna programu a případné ladění se provádí pomocí programu arduino IDE přes USB programovací port. [7] [8]

3 NÁVRHY MAGNETICKÉHO OBVODU ZAŘÍZENÍ

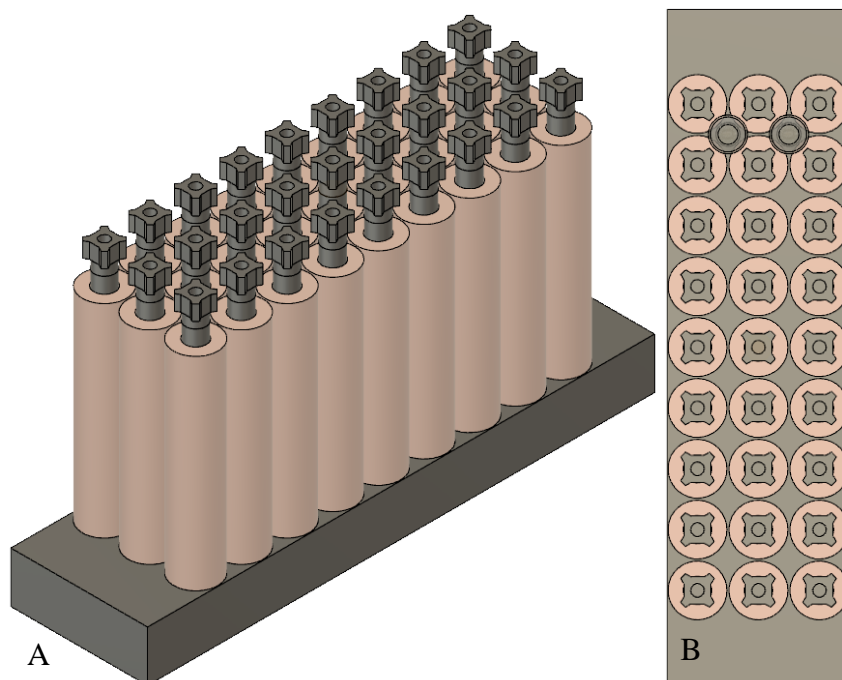
Nová verze zařízení pro míchaní magnetizovatelných částic musí mít rozměry, které budou odpovídat matici mikrozkuvek (96-jamková destička). Ta má 8×12 pozic pro mikrozkuvky, každá o objemu až 0,5 ml a rozteč mezi každou z nich je 9 mm. Jedním z dalších důležitých požadavků je, aby roztok v matici nebyl příliš zahříván. Nejlépe, aby roztok měl maximálně o 5 °C více než okolní teplota.

3.1 Návrh a výpočet úprav zařízení

V následujících třech kapitolách jsou probírány návrhy zařízení, které pro míchaní feromagnetickými částicemi využívají pouze elektromagnetickou energii.

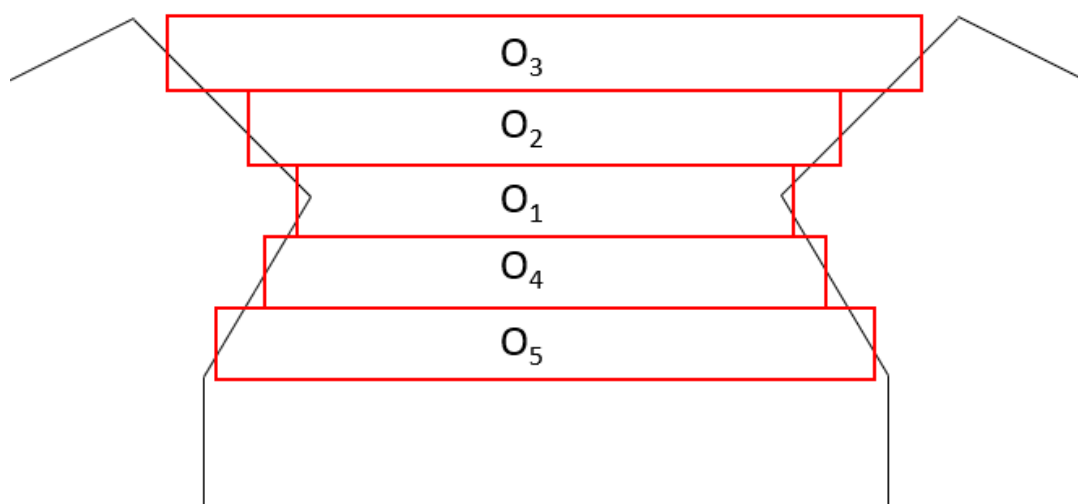
3.1.1 Varianta 1

V této variantě jde o znásobení stejného funkčního principu, který byl použit v zařízení první verze. Jsou tedy potřeba vždy dvě cívky na jednu mikrozkuvku a dva polpáry. Protože má matrice malou rozteč, 9 mm, je jeden pól použit pro 4 mikrozkuvky. Dále bude použito stejného pro všechny elektromagnety. Důvodem je opět malá rozteč matrice, ale také fakt, že není nutné používat transformátorové plechy, což bylo ověřeno v bakalářské práci. Materiál, který bude použit, musí mít velkou permeabilitu a relativně snadnou opracovatelnost na soustruhu či fréze.



Obr. 3-1 Návrh segmentu zařízení. A-náhled, B-horní pohled se dvěma mikrozkučkami.

Při pohledu na jednu mikrozkučku je vidět, že každý pól u stěny této nádoby má jednu cívku. Budící cívka jednoho polpáru je tedy rozdělena ve dvě. Podle tohoto jsou všechny cívky v sloupci (9 cívek, Obr. 3-1B) zapojené tak, že sousedící vodiče dvou přilehlých cívek mají směr proudu souhlasný, a tím po celém sloupci vytváří střídavě sever a jih. Návrh byl vytvořen v programu Fusion 360. [9]



Obr. 3-2 Počítané oblasti magnetického odporu jednoho polpáru první varianty.

Při výpočtu magnetického napětí je nejdříve spočten magnetický odpor polpáru. A to tím způsobem, že je prostor mezi póly rozdělen do jednotlivých oblastí (viz Obr. 3-2). Pak je magnetický odpor jedné oblasti:

$$R_1 = \frac{l_1}{S_1 \times \eta_0} = \frac{4,2}{0,6 \times 4 \times \pi \times 10^{-7}} = 5,5704 \times 10^9 \text{ H}^{-1}$$

Celkový magnetický odpor pak je:

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_{\text{celk}}} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} = \left(\frac{1}{5,5704} + \frac{1}{3,9789} + \frac{1}{4,5094} + \frac{1}{3,7914} + \frac{1}{4,0977} \right) \times \frac{1}{10^9} = \\ &= 1,1604 \times 10^{-9} \text{ H} \rightarrow R_{\text{celk}} = 86,1772 \times 10^9 \text{ H} \end{aligned}$$

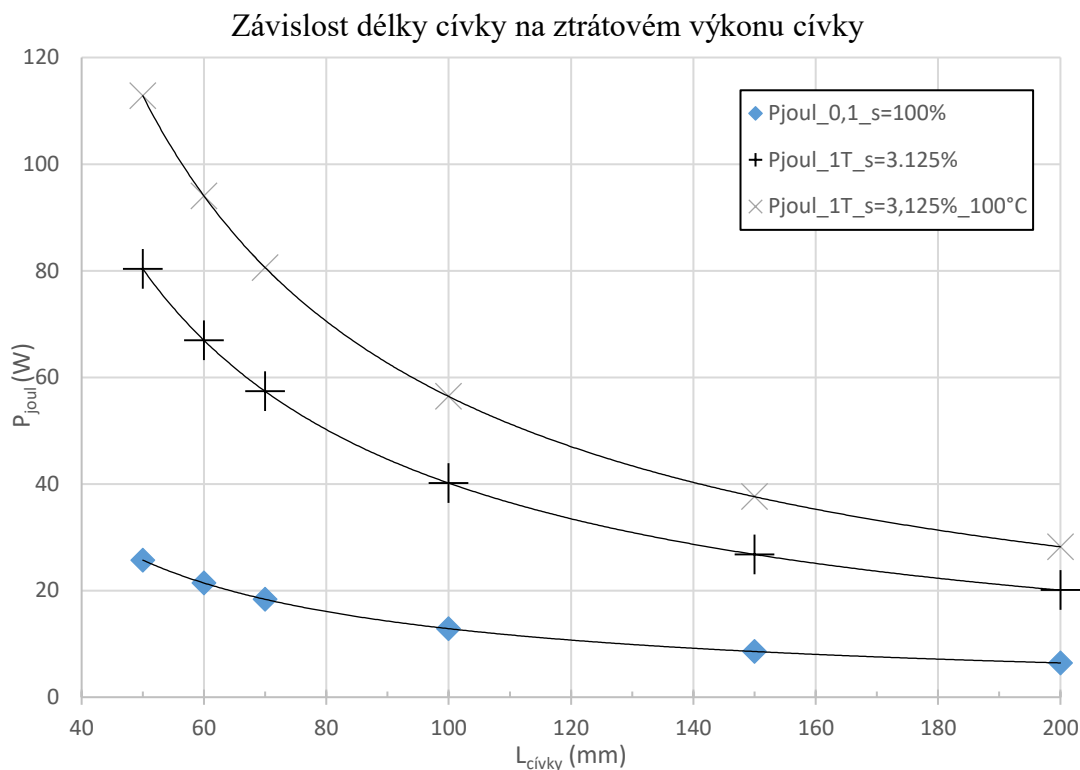
Indukce magnetického pole byla stejně jako v bakalářské práci stanovena na 0,1 T. Dále byl stanoven magnetický tok z celkové plochy dílčích částí a indukce magnetického pole:

$$\Phi_{\text{celk}} = B_n \times S_{\text{celk}} = 0,1 \times 42 \times 10^{-7} = 4,2 \times 10^{-7} \text{ Wb}$$

Z magnetického odporu a toku bylo spočítáno magnetické napětí:

$$F_{m,1/4} = R_{\text{celk}} \times \Phi_{\text{celk}} = 86,1772 \times 10^7 \times 4,2 \times 10^{-7} = 361,944 \text{ A}$$

Z výsledného magnetického napětí a rozměrů uložení cívky je možné vypočítat počet závitů. Tloušťka cívky je omezena roztečí matrice, ale délka cívky je rozměr, který lze měnit. Proto byl proveden výpočet Joulových ztrát v závislosti na délce cívky.



Obr. 3-3 Graf závislosti Joulových ztrát na délce cívky první varianty.

Z Obr. 3-3 lze stanovit, jak se budou měnit Joulovy ztráty jedné cívky při zvětšování délky cívky. Závislost je mocninná. Pro výpočet byl použit koeficient plnění cívky 0,6, tloušťka cívky 2,5 mm, průměr vodiče 1 mm, odpor mědi při 20 °C $1,78 \times 10^{-8} \Omega/m$ a odpor mědi pro 100 °C $2,5 \times 10^{-8} \Omega/m$. Bylo také uvažováno s přetížením úměrným pro vytvoření indukce magnetického pole 1 T ve vzduchové mezeře. Dále je počítáno s tím, že jedna cívka je použita pro 4 nádoby a magnetické napětí je tedy čtyřnásobné. Celkové tepelné ztráty při 20 °C a střídě 3,125 % jsou 1117 W. Při teplotě 100 °C budou Joulovy ztráty trojnásobné.

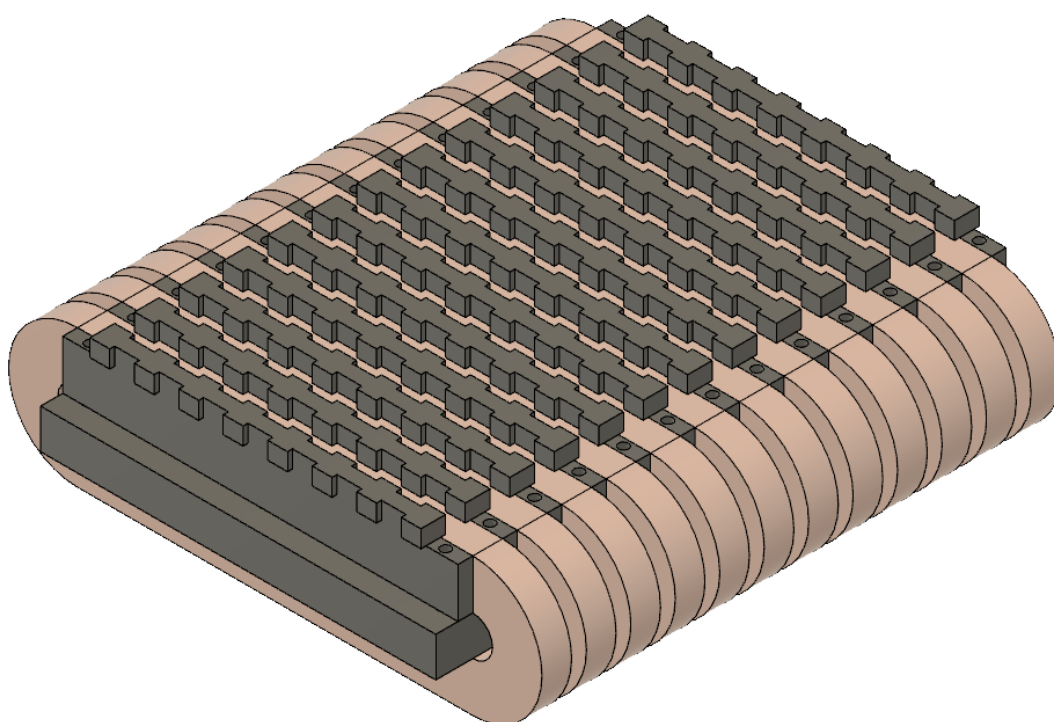
Protože rozměr výšky cívky je možné volit relativně velkoryse, bude zvolena délka cívky 200 mm. Je nutné si uvědomit, že cívka se dělí na dvě, výška jedné poloviny tedy bude 100 mm. [6]

3.1.2 Varianta 2

Tato varianta využívá tvar mikrozkuřavky a dynamiku částic v roztoku. Pro danou nádobu je vždy jen jedna cívka, a proto je zde jen jeden pólpár. To ovšem způsobí, že maxima indukce magnetického pole se v prostoru nestřídají, ale jsou vždy ve stejný čas

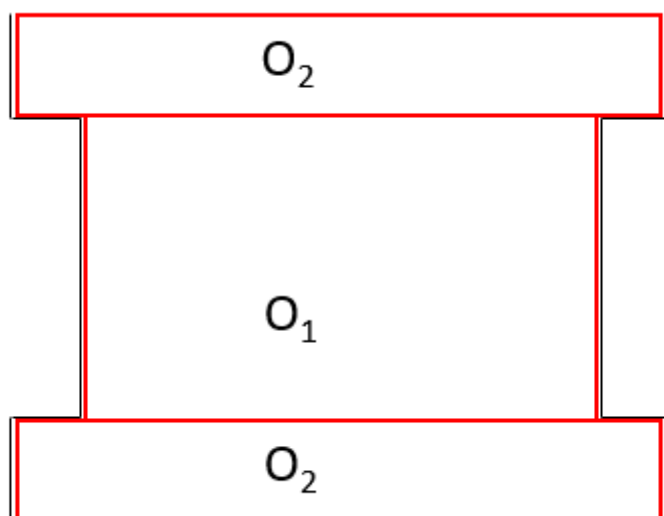
ve stejném místě mikrozkumavky. Protože podobná varianta byla z logických důvodů zamítnuta při zpracování bakalářské práce, nebyl proveden návrh ani realizace takové možnosti. V této práci je však taková konfigurace technicky méně náročná, protože místo 117 cívek, které byly nutné pro předchozí variantu, je jich potřeba jen 12. Také konstrukce je menší, a tedy i snáze vyrobitelná.

Aby tato varianta fungovala, je nutné se zaměřit více na dynamiku částic a roztoku, ve kterém se nacházejí, a na tvar pólových nástavců. Válcový tvar mikrozkumavky je pak velmi důležitou vlastností, která bude využita.



Obr. 3-4 Návrh zařízení s 12 cívkami.

Pro prvotní dimenzování velikosti cívek je brán v úvahu jen obyčejný pólový nástavec. Předpokládá se, že pro správnou funkci míchaní bude potřeba jiný tvar pólů. K tomu přispívá i konstrukční řešení zařízení, které výměnu pólů usnadňuje. Výhodou u tohoto návrhu je možnost vychýlení matrice do jedné ze stran, což je předpokládáno za užitečnou vlastnost při testování schopnosti míchaní.



Obr. 3-5 Počítané oblasti magnetického odporu polpáru druhé varianty zařízení.

Stejně jako u první varianty, je spočten magnetický odpor a z něj a z indukce magnetického pole ve vzduchové mezeře dostaneme magnetické napětí. Při výpočtu jsou uvažovány oblasti z Obr. 3-5.:

$$R_{1,2} = \frac{l_{1,2}}{S_{1,2} \times \eta_0} = \frac{4}{14 \times 4 \times \pi \times 10^{-7}} = 2,2736 \times 10^8 \text{ H}^{-1}$$

Celkový magnetický odpor pak je:

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_{\text{celk}_2}} &= \frac{1}{R_{1,2}} + \frac{1}{R_{2,2}} = \left(\frac{1}{2,2736} + \frac{1}{2,7284} \right) \times \frac{1}{10^8} = \\ &= 8,0635 \times 10^{-9} \text{ H} \rightarrow R_{\text{celk}_2} = 1,2402 \times 10^8 \text{ H} \end{aligned}$$

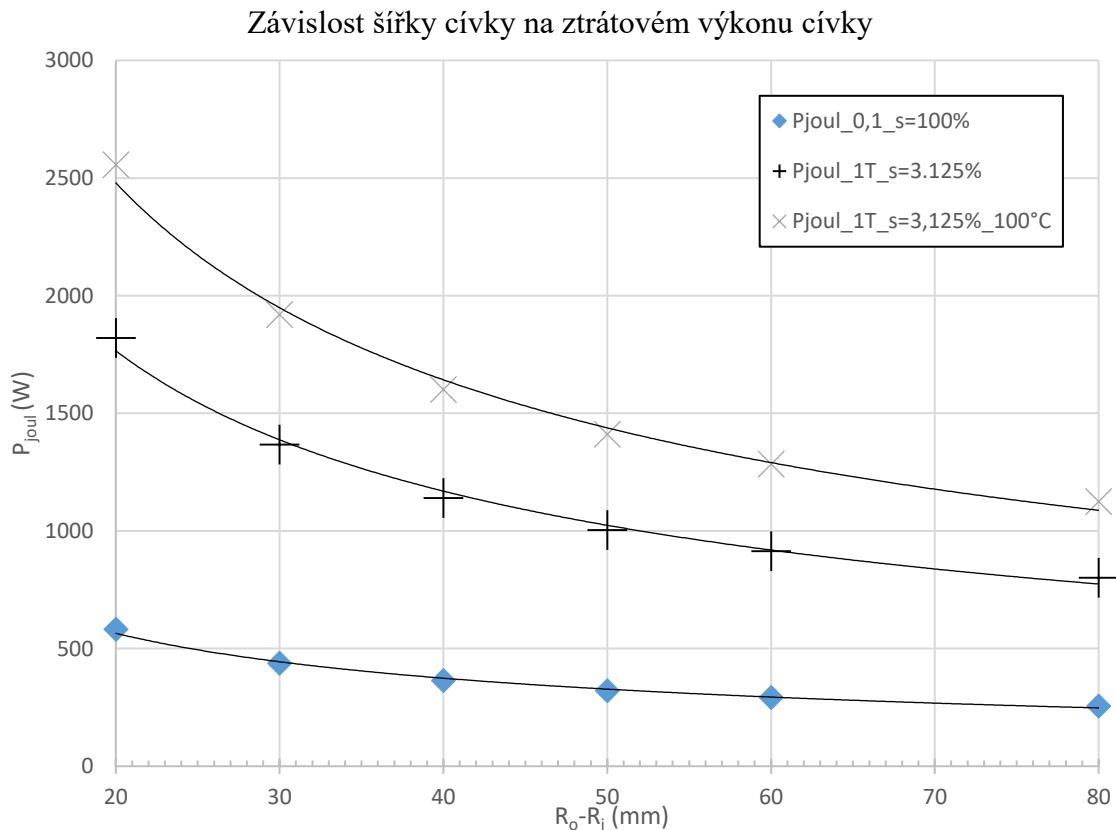
Indukce magnetického pole je zvolena stejně jako ve variantě 1, tedy 0,1 T. Z toho byl stanoven magnetický tok:

$$\Phi_{\text{celk}_2} = B_n \times S_{\text{celk}_2} = 0,1 \times 31,5 \times 10^{-6} = 3,15 \times 10^{-6} \text{ Wb}$$

Poté pro jeden z osmi pólparů pro jednu cívku bylo vypočteno magnetické napětí:

$$F_{m_{1/8_2}} = R_{\text{celk}_2} \times \Phi_{\text{celk}_2} = 1,2402 \times 10^8 \times 3,15 \times 10^{-6} = 390,65 \text{ A}$$

Jedna cívka tak musí vytvořit magnetické napětí o velikosti 3125 A pro vytvoření indukce mag. pole 0,1T ve vzduchové mezeře pro všech osm pólů o předpokládaném tvaru. Jako u předchozí varianty, i u této byla provedena optimalizace tvaru cívky a počtu závitů.



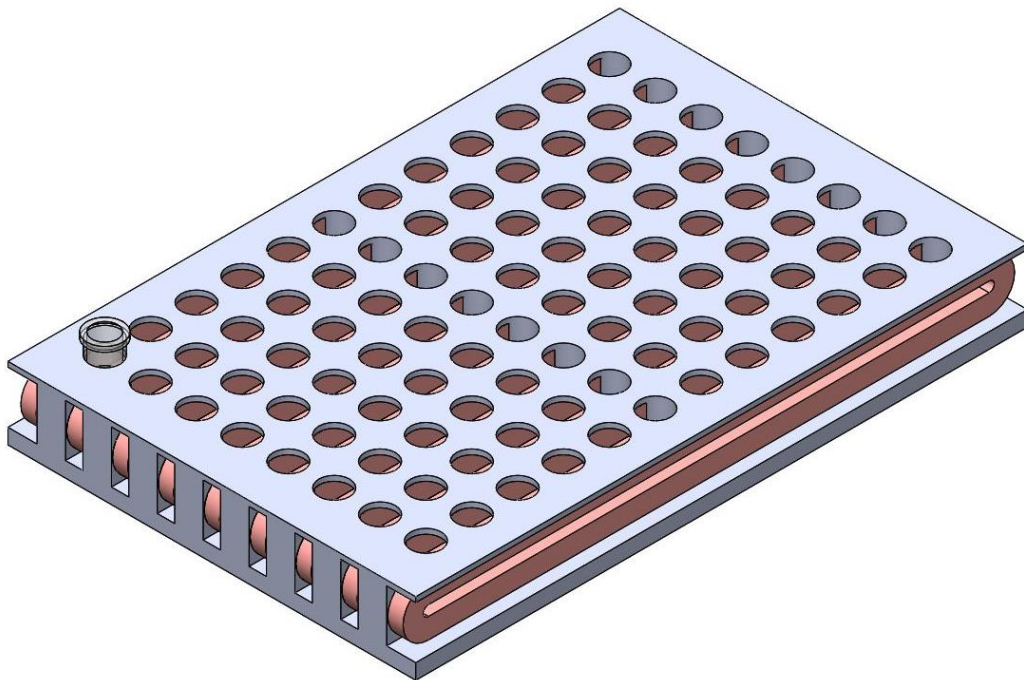
Obr. 3-6 Graf závislosti Joulových ztrát na délce cívky druhé varianty.

Z Obr. 3-6 lze opět vypořizovat stejnou závislost na zvětšení velikosti cívky jako u optimalizace předchozí varianty. Nyní je však zvětšována tloušťka cívky, a ne její délka v ose směru magnetického toku. Jako parametry pro výpočet byly zvoleny stejné jako v první variantě s jedinou výjimkou, že je jedna cívka použita pro osm pólpárů. Celkové tepelné ztráty při 20 °C a střídě 3,125 % jsou 9610 W. Při teplotě 100 °C budou Joulovy ztráty 13,5 KW. [6]

3.1.3 Varianta 3

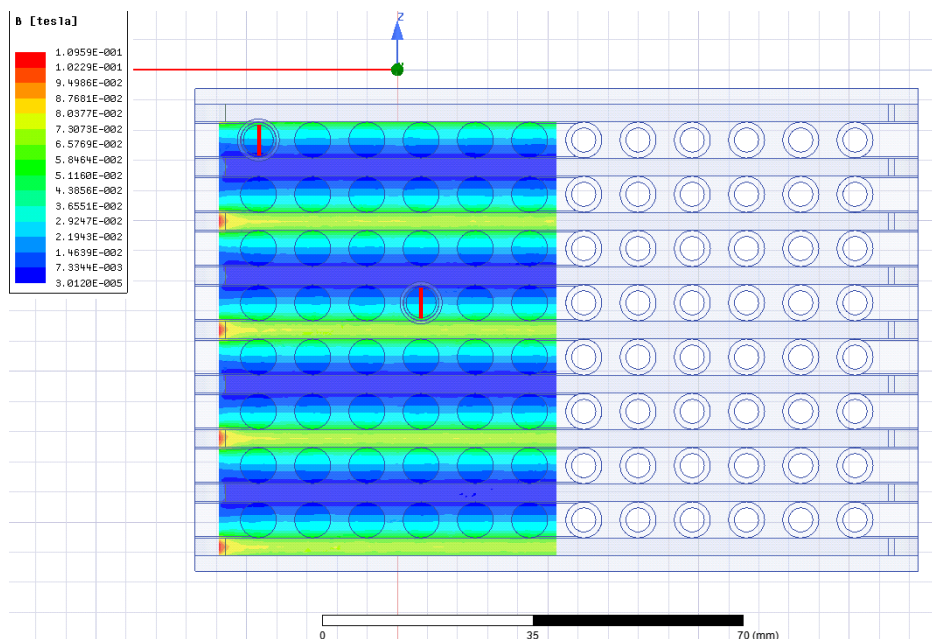
U této varianty je snaha míchat částicemi pouze pomocí cívek bez magnetického obvodu. Důsledkem toho, že není přítomen magnetický obvod, kterým by bylo usměrňováno magnetické pole do prostoru mikrozkušavky, bude snaha o vysoký pulsní proud cívkou. Dále je snaha tvarem a polohou cívky toto pole co nejlépe nasměrovat.

Už v bakalářské práci byl pokus takovýmto způsobem pohybovat částicemi. Kvůli nízkému proudu a tvaru cívky se pokus nezdařil, a experiment dále pokračoval úspěšným směrem, který využíval magnetický obvod pro směřování magnetického pole. K tomuto návrhu bylo nyní opět přihlédnuto.



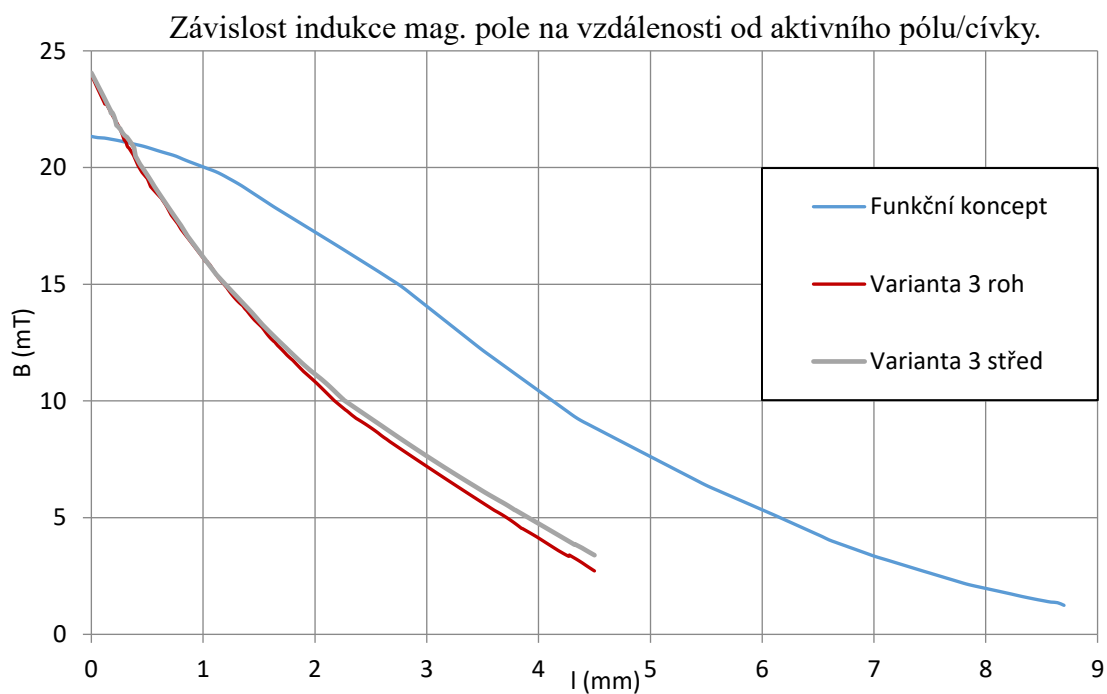
Obr. 3-7 Návrh třetí varianty zařízení.

Návrh zařízení, který je zobrazen na Obr. 3-7, se skládá z 9 cívek a duralové konstrukce, která vymezuje prostor pro mikrozkušavky, drží cívky ve správné pozici a zároveň odvádí teplo. Protože rozměry cívek jsou už pevně dané rozměry matrice a výškou mikrozkušavky, není potřeba optimalizace na velikost cívky. Na druhou stranu, důsledkem malých rozměrů cívky jsou velmi značné Joulovy ztráty. Návrh byl vytvořen v programu Solidworks. [10]



Obr. 3-8 Simulace magnetického pole při mag. napětí cívek 250 A a -50 A. [11]

Simulací byl ověřen průběh indukce magnetického pole v mikrozkumavce a porovnán s výsledkem simulace z fungujícího zařízení. Magnetické napětí jedné cívky bylo 250 A a -50 A. Protilehlá cívka byla orientována vždy nesouhlasně (Obr. 3-8). [11]



Obr. 3-9 Graf závislosti indukce magnetického pole na vzdálenosti.

Na Obr. 3-9 je znázorněno porovnání velikosti indukce magnetického pole v závislosti na vzdálenosti od stěny mikrozkumavky, která je nejbližší k aktivní cívce ke stěně, která je nejdále. Tato úsečka je kolineární s osou cívky a vymezena zmíněnými vnitřními stěnami mikrozkumavky.

V grafu jsou tři průběhy. První, modře značená závislost, je ze simulace mag. pole zařízení pro míchaní magnetických částic z bakalářské práce v programu FEMM. Úsečka, na které se indukce mag. pole počítala, je ve stejné části mikrozkumavky jako u zbylých dvou závislostí. Z grafu jde také vidět, že tato mikrozkumavka je větší. [12]

Zbylé dvě závislosti náležejí dvěma pozicím pro mikrozkumavky v navrhovaném zařízení (červené úsečky na Obr. 3-8). Jejich průběhy indukce mag. pole se až na mírné rozcházení ve větších vzdálenostech dají pokládat za shodné, proto lze předpokládat, že způsob míchaní v jakékoliv pozici v zařízení bude stejný. Při porovnání závislosti varianty 3 střed (šedý průběh) se závislostí funkčního konceptu je vidět, že derivace indukce mag. pole $B(T)$ na vzdálenosti se v blízkosti maxima snižuje a u závislosti varianty 3 je derivace naopak největší. To není ideální, protože částice, které se už nacházejí v tomto místě, není třeba tlačit k sobě. S tím je nutné u biochemických testů počítat, protože stlačování částic s navázanými analyty může mít negativní důsledek a je potřeba na toto téma udělat speciální biochemický test [11].

Pro buzení cívky funkčního konceptu bylo magnetické napětí 470 A a pro buzení cívky varianty 3 bylo 250 A a -50 A. Protože mikrozkumavka u varianty 3 je skoro poloviční, je jasné, že vzduchová cívka bude z hlediska magnetického napětí nejnáročnější. Tato hodnota ale je pro 12 mikrozkumavek. Dále je při přetížení nutné magnetické napětí funkčního konceptu 10násobné, nicméně u varianty 3 bylo simulací ověřeno, že je nutné více jak 40násobné, tedy 10 kA a -2 kA. Pro jednu mikrozkumavku je mag. napětí 833 A a -166,7 A (tedy 1 kA dohromady), což je výrazně více než u variant 1 a 2.

Cívka má okno 3×4 mm, což je vhodné pro čtyři měděné přípojnice o tloušťce do 1 mm a šířce 3 mm. Proudová hustota, spočítaná pro magnetické napětí 10 kA, což odpovídá přiblížení se maximální indukci mag. pole v mikrozkumavce 1 T, je 3472 A/mm^2 . Což je nerealistická hodnota v případě použití měděných vodičů a při pokojové teplotě. Cívky tak budou muset být navinuty supravodivým materiálem. Pro

porovnání s ostatními variantami byly vypočítány celkové Joulovy ztráty na 17,3 kW při teplotě 20 °C, dosažení indukce mag. pole 1 T a při použití měděného vodiče.

3.2 Úpravy napájecích měničů

Zařízení by mělo mít možnost snížení počtu míchaných vzorků. Proto by měly být v zařízení jednotlivé oblasti, které jsou spínané adekvátním párem můstků. Není to však nutnost. Díky testu změny polarity cívky při míchaní bylo potvrzeno, že změna polarity nemá viditelný vliv na míchaní částic. Proto budou u všech variant snižující měniče pracující ve dvou kvadrantech.

Oproti funkčnímu zařízení z bakalářské práce, musí být proud měničem řízený a měnič musí mít nadproudovou ochranu. U varianty 1 a 2 by teoreticky bylo možné udělat způsob ochrany před nadproudem volbou napětí meziobvodu tak, aby netekl proud větší, než snese nejslabší prvek měniče. Ale u varianty 3 je tato možnost nemyslitelná kvůli extrémním proudům, které mají téct cívkami, a také díky tomu, že ke konstrukci cívek jsou uvažovány supravodivé materiály.

Pro první variantu s délkou cívky 100 mm, byl spočten odpor cívky 0,0931 Ω při 20 °C a při použití Cu vodiče o průměru 1 mm. Požadavek na proud tekoucí jednou cívkou je 60 A. Protože matrice bude mít 117 cívek, jsou vhodné kombinace zapojení relativně omezené na nešikovné násobky 13, 9 nebo 3. Pro finální realizaci celého zařízení by návrh měniče měl mít napájecí napětí 48 V a jednotlivé cívky zapojit do série. V této práci však volíme napětí 24V, protože budeme spínat menší zátěž (jen jednu pozici míchacího zařízení).

Měnič druhé varianty bude tvořen spínacími prvky tak, aby byly použity nejlépe vyhovující spínací prvky. Požadovaný maximální proud je 289 A, a proto bude více tranzistorů a diod paralelně.

Návrh měniče pro třetí variantu je podobný jako pro druhou variantu. Jen proud jednou cívkou je mnohem větší.

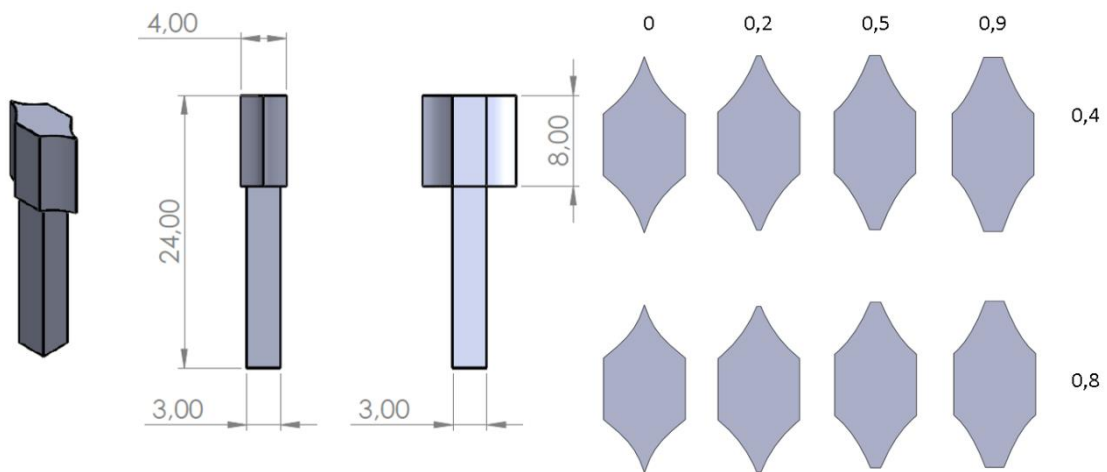
3.3 Návrh magneticko-mechanické verze míchacího zařízení

Zařízení pro míchaní feromagnetických částic je unikát. Funkční prototyp, který byl vyroben v bakalářské práci je jediný svého druhu, a to sebou nese otázku proč? Velmi pravděpodobné je, že kombinace zájmu o takové zařízení a technická náročnost výroby

je neprofitabilní. Zájem o takové zařízení však může vzniknout poté, až bude správně navrženo a vyrobeno. Proto byla navržena alternativní verze míchacího zařízení, které snižuje technickou náročnost.

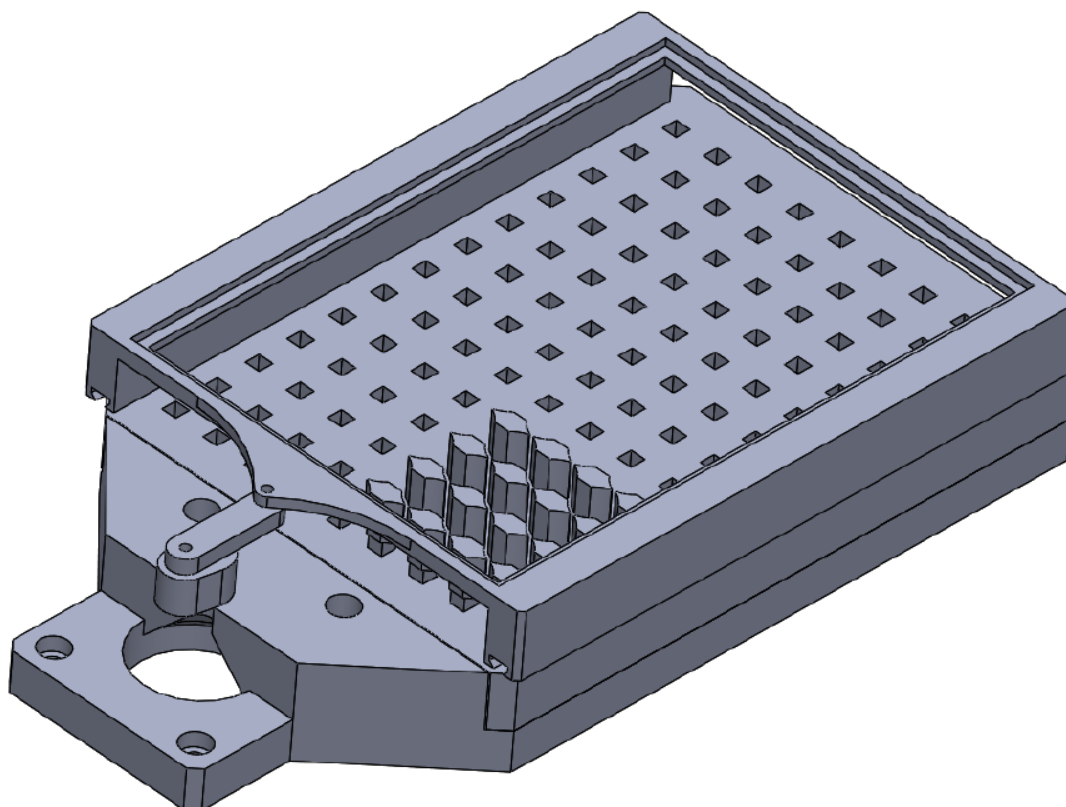
Využití silných permanentních magnetů, pólů pro koncentrování magnetického pole a zdroj mechanického pohybu je kompromisní řešení mezi stávajícím stavem techniky a čistě elektromagnetickým způsobem míchaní feromagnetických částic.

Jako první byl navržen pól, který vede magnetický tok z neodymových magnetů a koncentruje jej do vzduchové mezery.



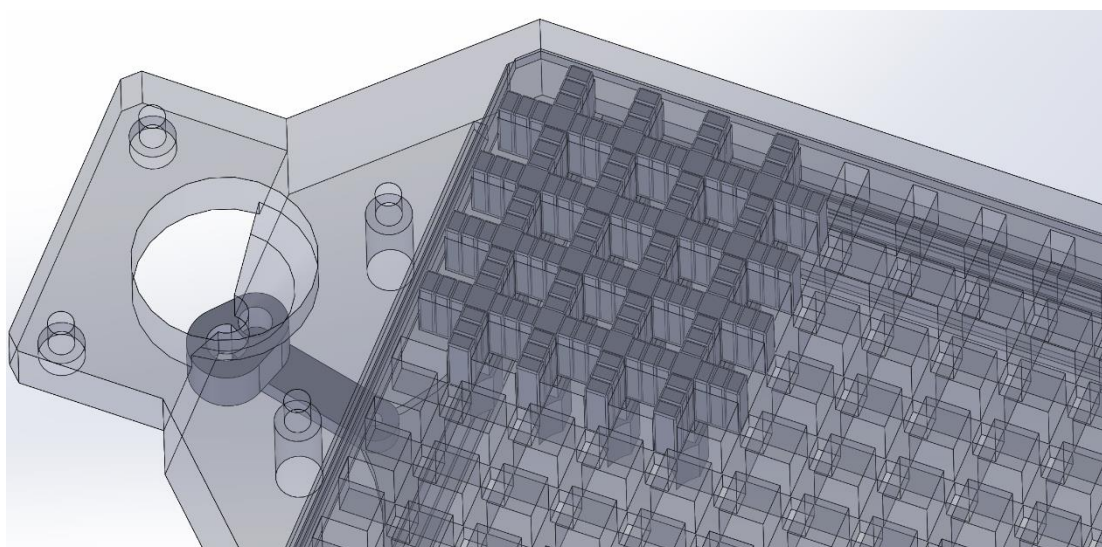
Obr. 3-10 Návrh 8 variant tvarů pólů (rozměry jsou v mm).

Na Obr. 3-10 je vidět tvar tohoto pólu. Spodní část je čtvercového tvaru o délce strany 3 mm. Na tyto čtyři plochy pak budou umístěny magnety o rozměrech $10 \times 3 \times 2$ mm. Bylo navrženo 8 variant horní části pólu s dvěma velikostmi mezery mezi sebou 0,4 a 0,8 mm a 4 varianty tloušťky hrotu pólu. Ty byly buď ostré nebo tupé se šířkou hrany 0,2, 0,5 a 0,9 mm.



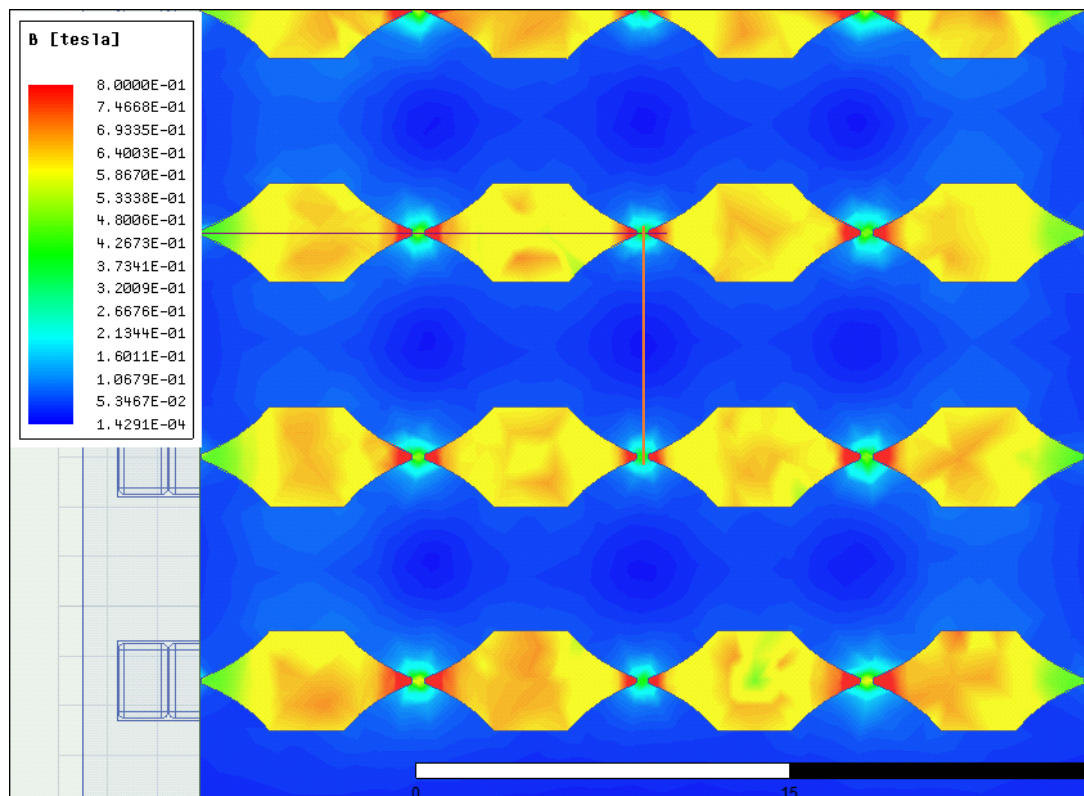
Obr. 3-11 Sestava zařízení bez krokového motoru.

Dále byly navrženy díly pro uchycení motoru, přeměnu rotačního pohybu na lineární a díly pro uložení matrice s mikrozkmavkami. Nejdůležitější byl díl pro uchycení pólu a permanentních magnetů. Všechny díly byly navrženy tak, aby bylo možné je vytisknout na 3D tiskárně technologií FDM (Fused Deposition Modeling). Na Obr. 3-11 jde vidět sestava pólů a všech tisknutelných dílů.

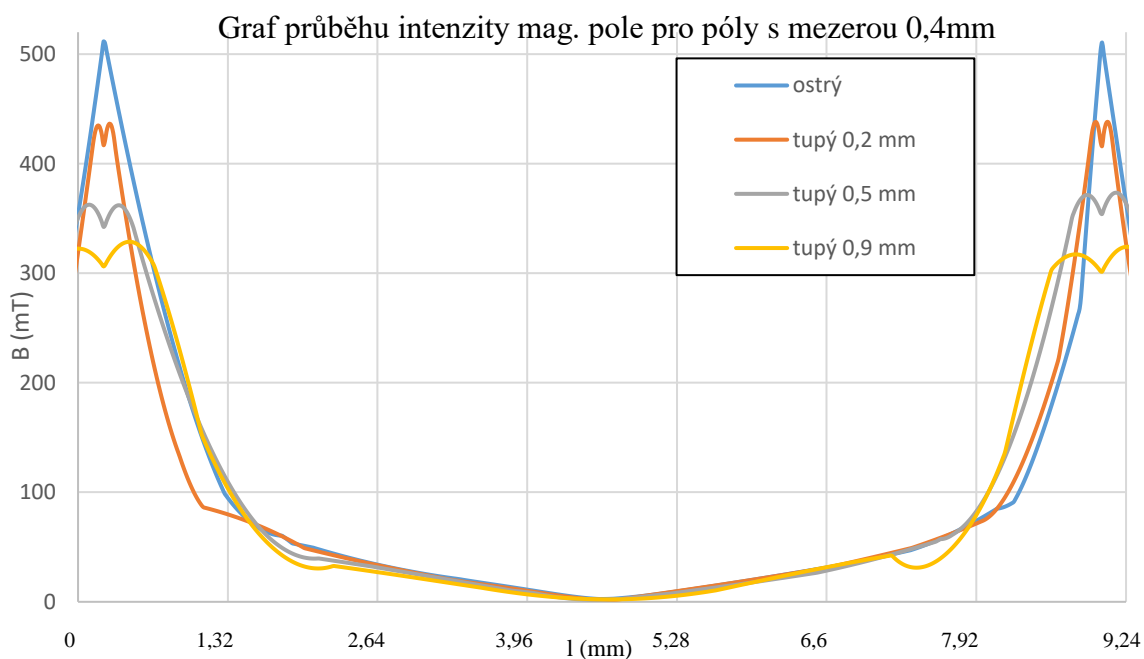


Obr. 3-12 Spodní pohled na rozložení permanentních magnetů.

Na Obr. 3-12 je znázorněno, že magnety jsou rozmístěny tak, aby do každého pólu buď směřoval, nebo z něj vycházel směr magnetizace permanentních magnetů.



Obr. 3-14 Rozložení indukce magnetického pole v programu Ansys. [11]



Obr. 3-13 Graf průběhu indukce mag. pole v místě znázorněném červenou přímkou na obr. 3-14.

Bylo provedeno srovnání všech osmi variant tvaru pólů. Varianty s mezerou 0,8 mm měly max. indukci mag. pole 308 mT, proto jsou v Obr. 3-13 porovnávány už jen tvary s mezerou mezi póly 0,4 mm. Z průběhu indukce mag. pole nelze říci, že by nějaký pól byl lepší. U ostrého typu je sice nejvyšší indukce mag. pole, ale zároveň se mikroskopická nedostane k tomuto maximu tak blízko. Proto byl pro experimentální konstrukci vybrán typ s tupou hranou o velikosti 0,2 mm. Vycházelo se také z prostorového grafu (Obr. 3-12) zobrazení indukce mag. pole. Průběh indukce mag. pole není ideální, proto se pro správné míchaní počítá s mechanickými impulzy při pohybu matrice s mikroskopickými.

4 REALIZACE ZAŘÍZENÍ

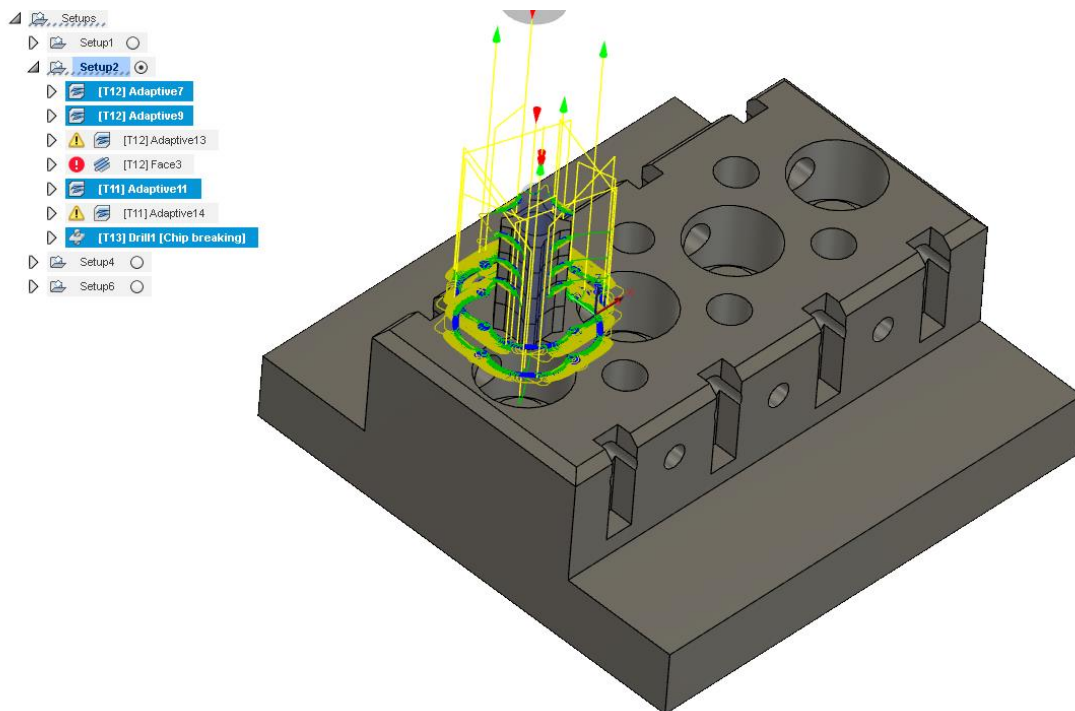
4.1 Realizace návrhu varianty 1

K realizaci zařízení byla vybrána varianta 1. Důvodem byly: relativně jednoduchá vyrobiteľnosť, najnižší nároky na proudovú hustotu a najmenší negatívny vliv při zvětšování cívek (snižování proudové hustoty). Tato varianta vychází z konstrukce zařízení v předchozí bakalářské práci a má tedy již odzkoušený průběh indukce mag. pole v prostoru mikrozkuřavky (Obr. 3-9). [7]

4.1.1 Realizace magnetického obvodu

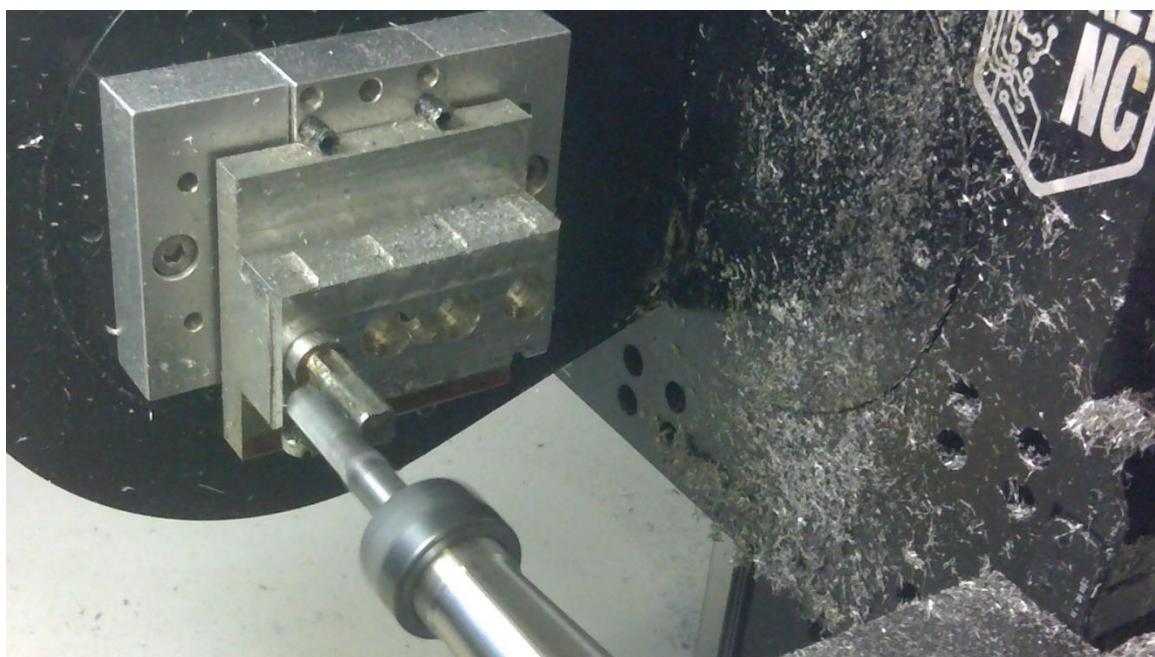
Magnetický obvod by vyroben z konstrukční oceli, která je běžně používána ve strojírenství. Tento materiál je snadno dostupný, relativně snadno opracovatelný a levný.

Magnetický obvod se skládá z jha, jádra elektromagnetu a pólových nástavců. Zařízení by mělo mít 117 jader a pólových nástavců. Pro účely této práce byly vyrobeny 4 pólové nástavce a jádra pro jednu pozici v zařízení.



Obr. 4-1 Návrh obráběcích operací v program Fusion 360.

Návrhy pólových nástavců v CAD (computer-aided design) části programu Fusion 360 byly převedeny do CAM (computer-aided manufacturing) části programu (Obr. 4-1), a zde byly navrženy obráběcí operace. K tomuto účelu byl navrhnut i díl pro uchycení polotovarů. Ten byl stejným způsobem jako pólové nástavce vyroben na CNC zařízení V2-10 (pocketNC). [9]



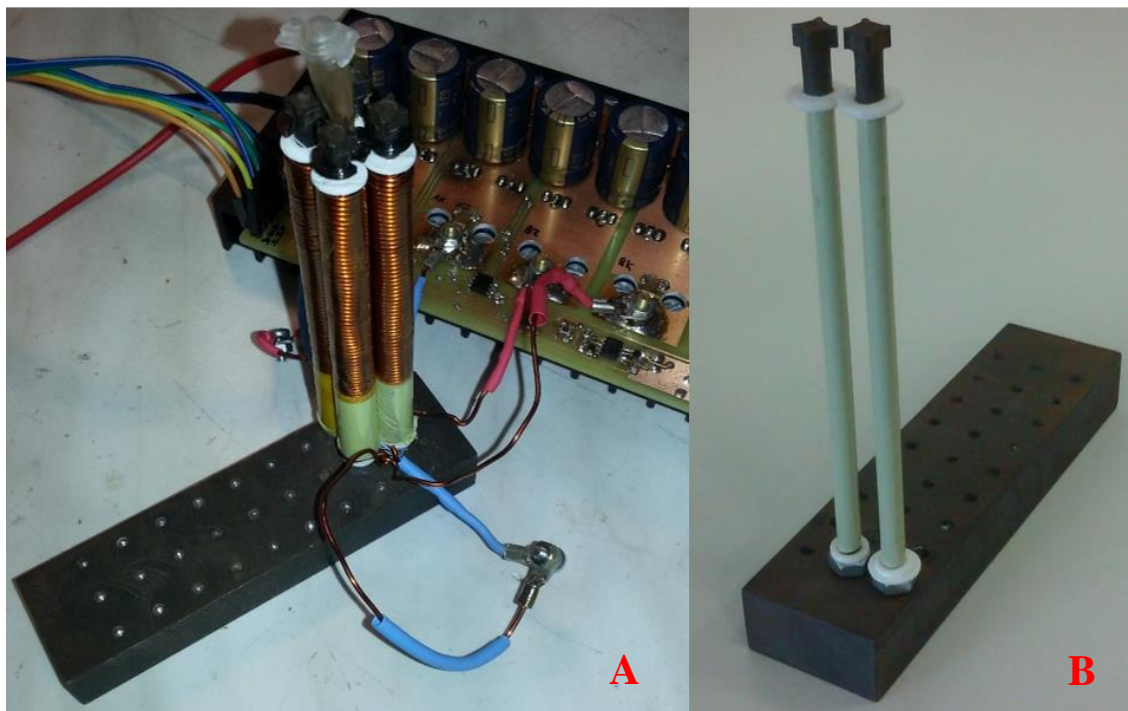
Obr. 4-2 Foto obrábění pólů na 5-osé CNC fréze V2-10 (pocketNC).

Pro jádro cívky byly využity kulatiny o průměru 4 mm. Na nich byl vytvořen závit M4 a na druhé straně bylo soustruhem odebráno 0,5 mm pro následné nalisování pólu.



Obr. 4-3 Foto připraveného jádra na navinutí cívky.

Jho bylo obrobena ručně na fréze a jádra cívek byly ručně obrobena na soustruhu. Součásti pak byly načerněny, aby nedocházelo k oxidaci povrchu. Pro jádra byly vytištěny na 3D tiskárně čela z materiálu ABS (akrylonitrilbutadienstyren). Jádro bylo zaizolováno tenkou páskou na vinutí a opatřeno kontra matkou (Obr. 4-3).

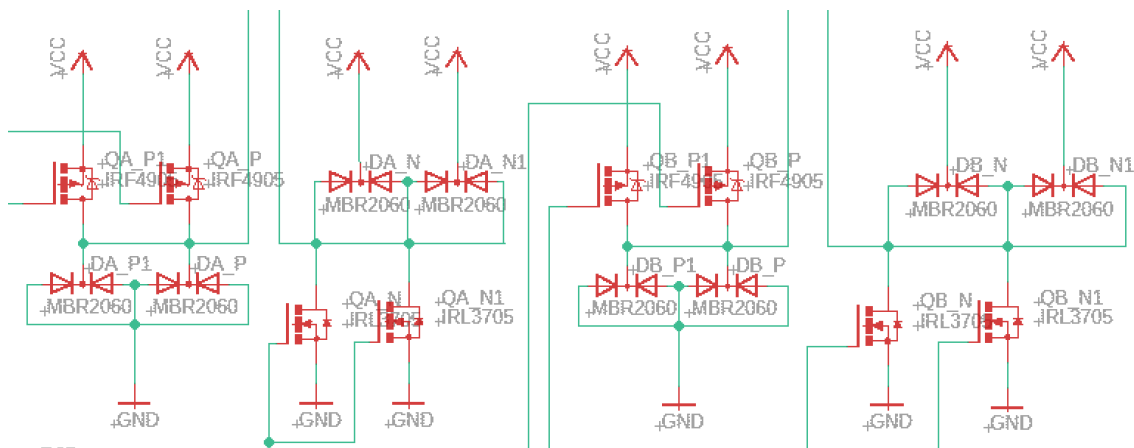


Obr. 4-4 A-Foto hotového mag. obvodu. B-Foto zkoušky připevnění jader k jhu.

Dále bylo každé jádro navinuto Cu drátem s průměrem 1 mm o 75 závitů. Jádra pak byla přišroubována ke jhu a cívky byly uspořádány tak, aby vždy dva páry cívek byly sériově zapojeny (Obr. 4-4). Vývody byly opatřeny očky pro připojení k měniči.

4.1.2 Realizace napájecího měniče

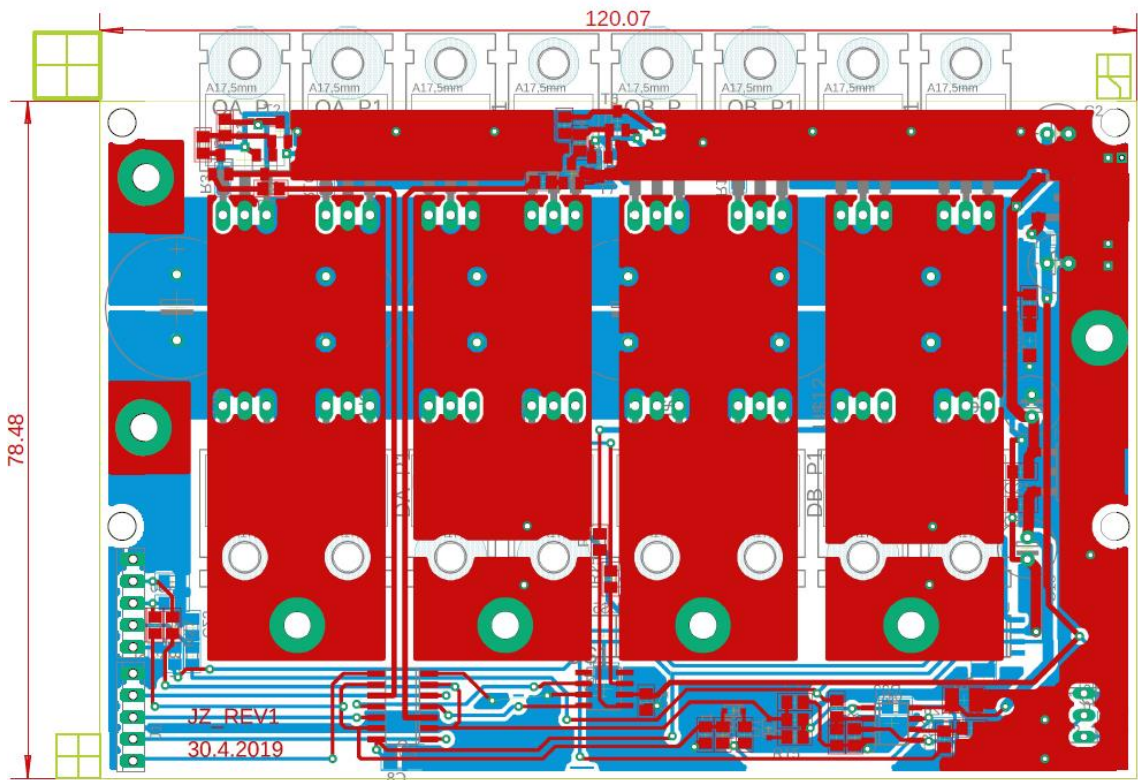
Plošný spoj měniče byl navrhnout podobně jako tomu bylo v bakalářské práci. Byla přidána nadproudová ochrana, a tedy i snímání proudu. Jako spínací prvky byly zvoleny tranzistory MOS-FET p-kanál IRF4905 s proudem $I_d = 74$ A a odporem při sepnutí $R_{dson} = 0,02 \Omega$ a tranzistory MOS-FET n-kanál IRF3205 s proudem $I_d = 110$ A a odporem při sepnutí $R_{dson} = 8$ m Ω . Diody byly zvoleny MBR60H s proudem $I_f = 60$ A (pro celou součástku). Všechny součástky byly vždy dvakrát a paralelně. Kondenzátorů bylo použito 6 s kapacitou 470 μ F s max napětím 63 V. [13] [14] [15]



Obr. 4-5 Schéma silové části měniče

Pro buzení horních tranzistorů bylo použito zapojení sledovače tak, aby při napájecímu napětí 24 V byly tranzistory spínány -15 V vůči napájecímu napětí. Dolní tranzistory byly buzeny budičem MIC4427, který je budil 15 V z regulátoru MC7815. [16] [17]

Pro měření proudu byly použity bočníky CSS2515R od firmy Bourns s odporem 500 $\mu\Omega$. Pro snímání úbytku napětí, resp. proudu tekoucím bočníkem byl použit obvod INA240 se zesílením 50 V/V. Tento proud byl komparován s referenčním napětím odpovídající 100 A v komparátoru TS862IDT. Ten při případném nadproudu vytvoří 0 V na jednom ze vstupů AND hradla HEF4081BT a tím se PWM signál z druhého vstupu nedostane na výstup tohoto hradla. Ten je spojený se vstupem budičů tranzistorů. [18] [19] [20] [21]



Obr. 4-6 Návrh plošného spoje v programu Eagle.

V programu Eagle byl navržen plošný spoj měniče tak, aby mezi tranzistory, diodami a kondenzátory byla minimální indukčnost tzv „sandwichové zapojení“. Na návrhu Obr. 4-6 jde vidět, že při návrhu byla jednou z priorit minimalizace velikosti plošného spoje.

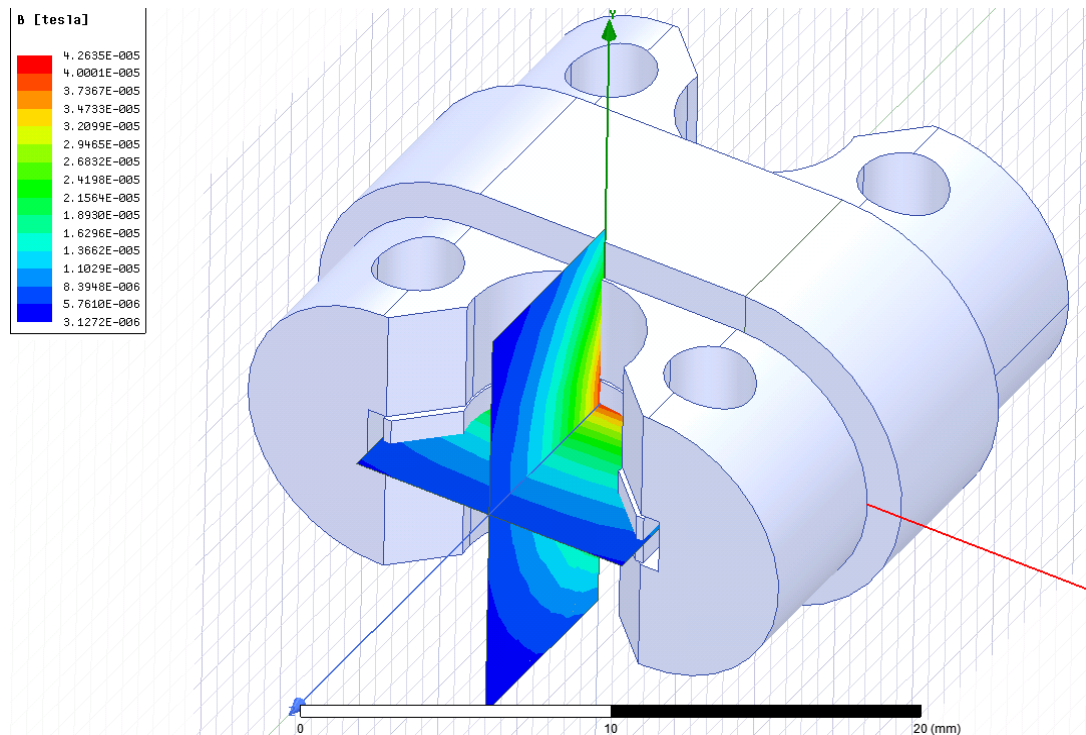
Následně byla vyrobena maska pro osvětlení oboustranného fotopozitivního cuprextitu. Ta byla spolu s cuprextitem vložena do osvitové jednotky AKTINA S (Walter Lemmen) a byla osvětlena UV zářením po dobu 90 s. Následně byla deska ponořena do hydroxidu sodného, který je součástí přístroje Etching CENTER V3000 (Walter Lemmen), kde byla po dalších 90 s vyvolána. Poté byla deska umístěna do jiné části tohoto přístroje, kde se v leptací lázni s chloridem železitým vyleptala. Doba leptání byla 180 s a leptací lázeň měla teplotu 50°C. Po omytí desky byl pomocí acetonu odstraněn fotocitlivý povlak a deska byla posprejována kalafunou s lihem, aby bylo zabráněno oxidaci mědi. Dále byla deska osazena pomocí pájecí stanice DD (JBC).

Pro chlazení tranzistoru MOS-FET a Schottkyho diod byl použit chladič CHL20B s tepelným odporem 1,8 °K/W. Ten byl zvolen z toho důvodu, že rozměrově byl ideální a jeho tepelný odpor byl dvarát menší než u měniče použitého u prvního prototypu.

Mezi součástky a chladič byla použita silikonová podložka s tepelným odporem 0,3 °K/W a pro zlepšení tepelného spojení byla aplikována teplovodivá pasta. [22]

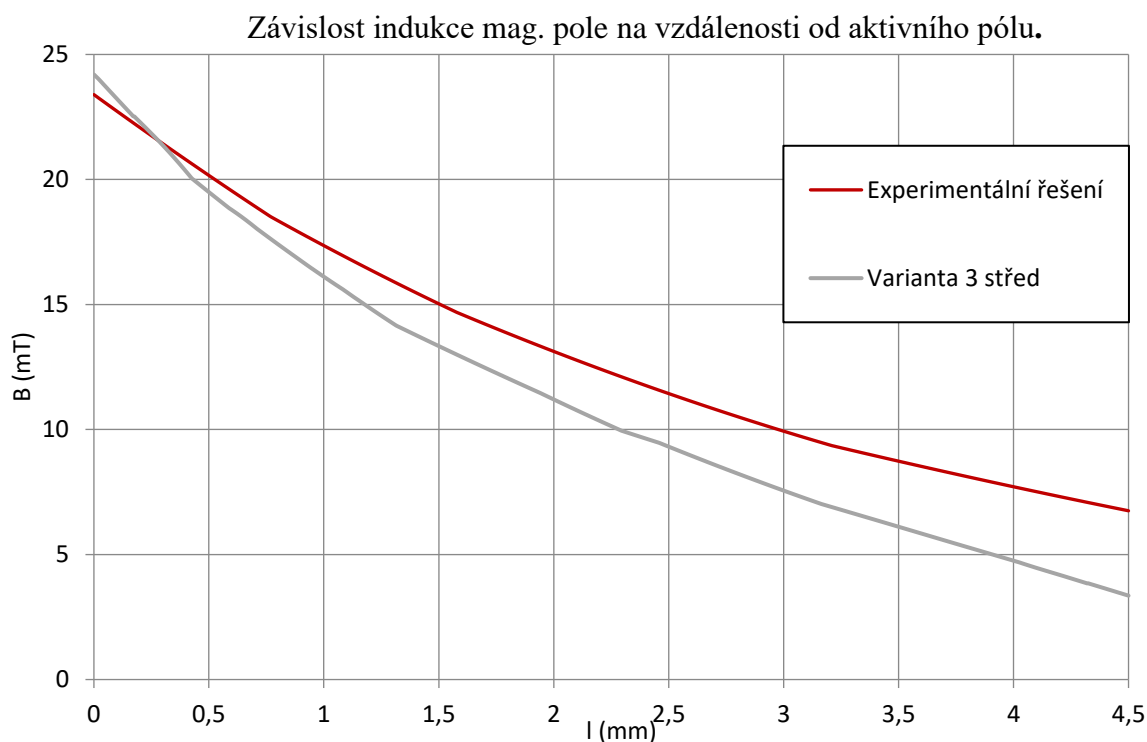
4.2 Zkušební realizace varianty vzduchová cívka

Pokusně byla realizována třetí varianta. Konstrukce byla simulována v programu ANSYS. [11]



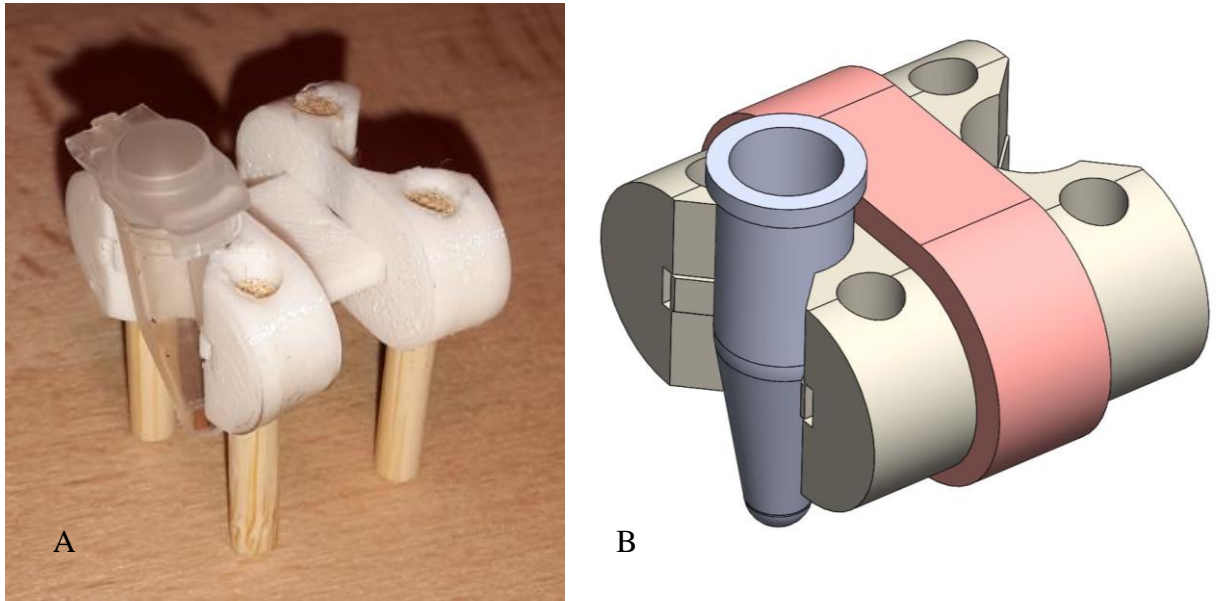
Obr. 4-7 Rozložení indukce mag. pole u experimentálního řešení. [11]

Na Obr. 4-7 je zobrazeno experimentální zařízení v prostředí programu ANSYS a dvě plochy, které se vzájemně kříží. Na těchto plochách je vykresleno rozložení indukce mag. pole při buzení cívky mag. napětím 600 A [11].



Obr. 4-8 Graf rozložení indukce mag. pole na úsečce v mikrozkumavce.

Tam, kde se plochy kříží (na Obr. 4-7) je střed cívky. Na ose této cívky je pak kolineárně umístěna úsečka, která začíná od vnitřní stěny mikrozkumavky k druhé vnitřní stěně mikrozkumavky. Na ní je vykreslen graf na Obr. 4-8, který popisuje rozložení indukce mag. pole uvnitř mikrozkumavky. Červený průběh patří modelu experimentálního řešení při mag. napětí cívky 425 A a šedý průběh patří modelu návrhu třetí varianty roh (Obr. 3-9) při mag. napětí cívky 250 A. Průběhy jsou podobné, proto výsledek této realizace bude porovnatelný pro větší zařízení.



Obr. 4-9 Konstrukce zařízení. A-vyrobené a sestavené díly, B-návrh mechanických částí.

V programu Solidworks byly navrženy díly pro konstrukci zařízení. Díly jsou navrženy tak, aby nebylo potřeba šroubů. Celý model je vidět na Obr. 4-9, kde je jak návrh modelu v CAD programu, tak vyrobená a sestavená konstrukce bez navinuté cívky. Díly byly vyrobeny metodou 3D tisku z materiálu PLA [10].

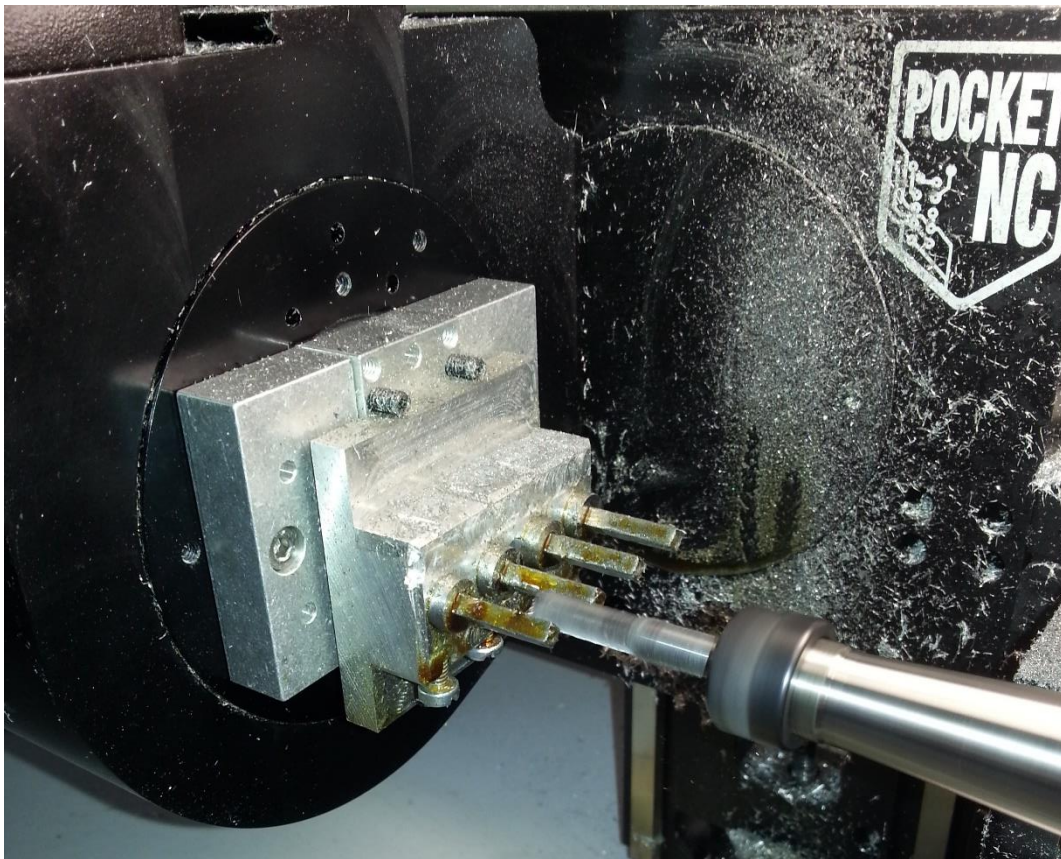
Cívka byla navinuta 20 závitů a má odpor 0,041 Ω . Jako spínací prvek byl použit měnič z bakalářské práce a programově byla omezena střída, aby proud nepřesáhl 40 A.

4.2.1 Ověření funkce míchaní u pokusné realizace varianty 3

Pro pokusné ověření byla cívka napájena z regulovaného zdroje a bylo pozorováno, zda dokáže přitáhnout částice. I při zvyšování proudu na 40 A nebylo dosaženo viditelného přitažení částic k cívce.

4.3 Realizace magneticko/mechanické verze míchacího zařízení

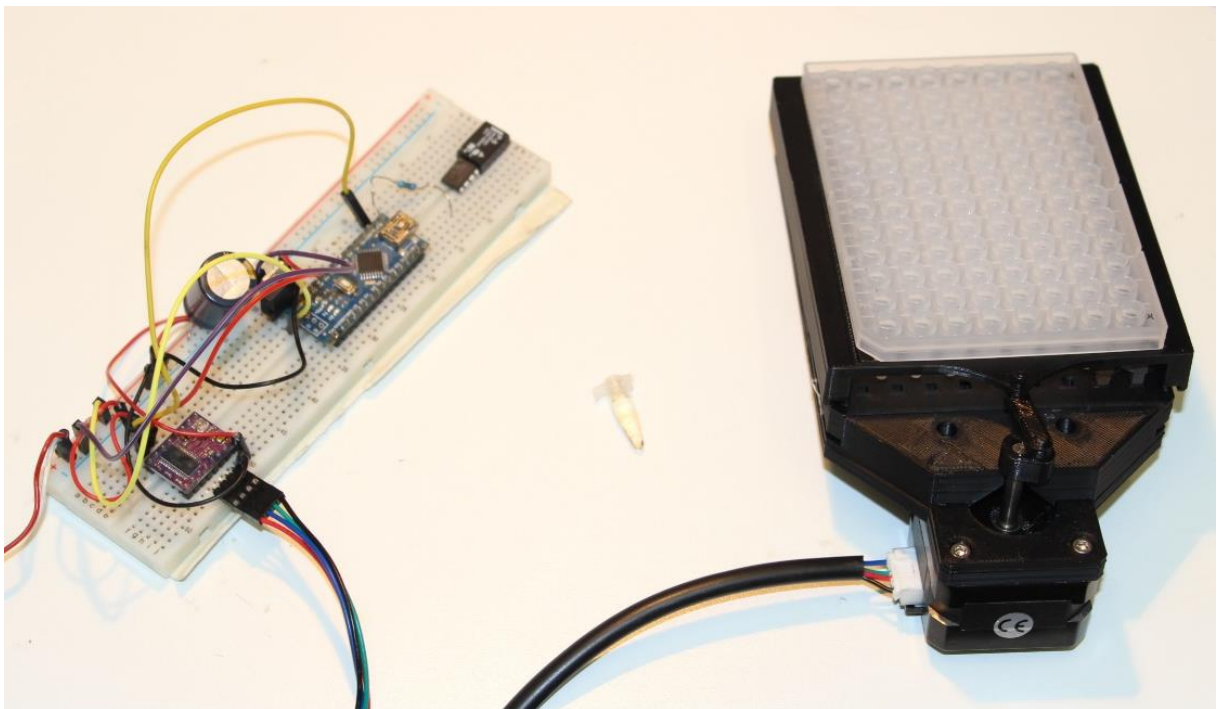
Navržené tvary pólů byly v CAD programu Fusion 360 postoupeny CAM zpracování pro vytvoření obráběcích operací. Díky přípravku pro uchycení bylo možné všechny čtyři póly zpracovat najednou. Jako první byly na soustruhu vyrobeny polotovary pro uchycení do uchycovacího přípravku. Měly tvar dvou spojených soustředných válců, první s průměrem 9 mm a délkou 8 mm, a druhý s průměrem 5 mm a délkou 16 mm. Obrobky byly pak uchyceny do přípravku a osoustruženy první sadou operací, která vytvořila z válce o průměru 5 mm hranol s čtvercovou základnou o tvaru 3×3×15 mm. Takto obrobený polotovar byl vyjmut a umístěn do druhé části uchycovacího přípravku, kde byl obroben válec o průměru 9 mm do tvaru navrhovaného pólu. [9]



Obr. 4-10 Foto při obrábění spodní části pólů pro magneto/mechanické verze míchacího zařízení.

Pomocí 3D tiskárny od firmy Trilab byly vytištěny mechanické prvky sestavy. Jako materiál byl použita struna o průměru 1,75 mm černého PLA. Výjimkou byl díl pro uchycení permanentních magnetů, který byl vytištěn na tiskárně profi3Dmaker (Aroja) z černého materiálu ABS. Obě 3D tiskárny používají technologii tisku FDM. Materiál ABS byl zvolen z důvodů lepší opracovatelnosti než PLA. Pólové nástavce a magnety byly umístěny do dílu určeného pro jejich uchycení. Dále byly lepidlem přichyceny kolejnice k tomuto dílu. Na tyto kolejnice byl umístěn vozík sloužící pro uložení matrice s mikrozkumavkami a ten byl připojen pomocí táhel s krokovým motorem.

Krokový motor má základní krok $1,8^\circ$ s tím, že je použit driver krokového motoru DRV8825, který byl zapojen tak, že bylo využito mikrokrokování 1/32. Zapojení elektroniky bylo jen zkušební na nepájivém poli a k řízení byla použita vývojová deska Arduino nano. [23]



Obr. 4-11 Foto magneticko-mechanické verze míchacího zařízení.

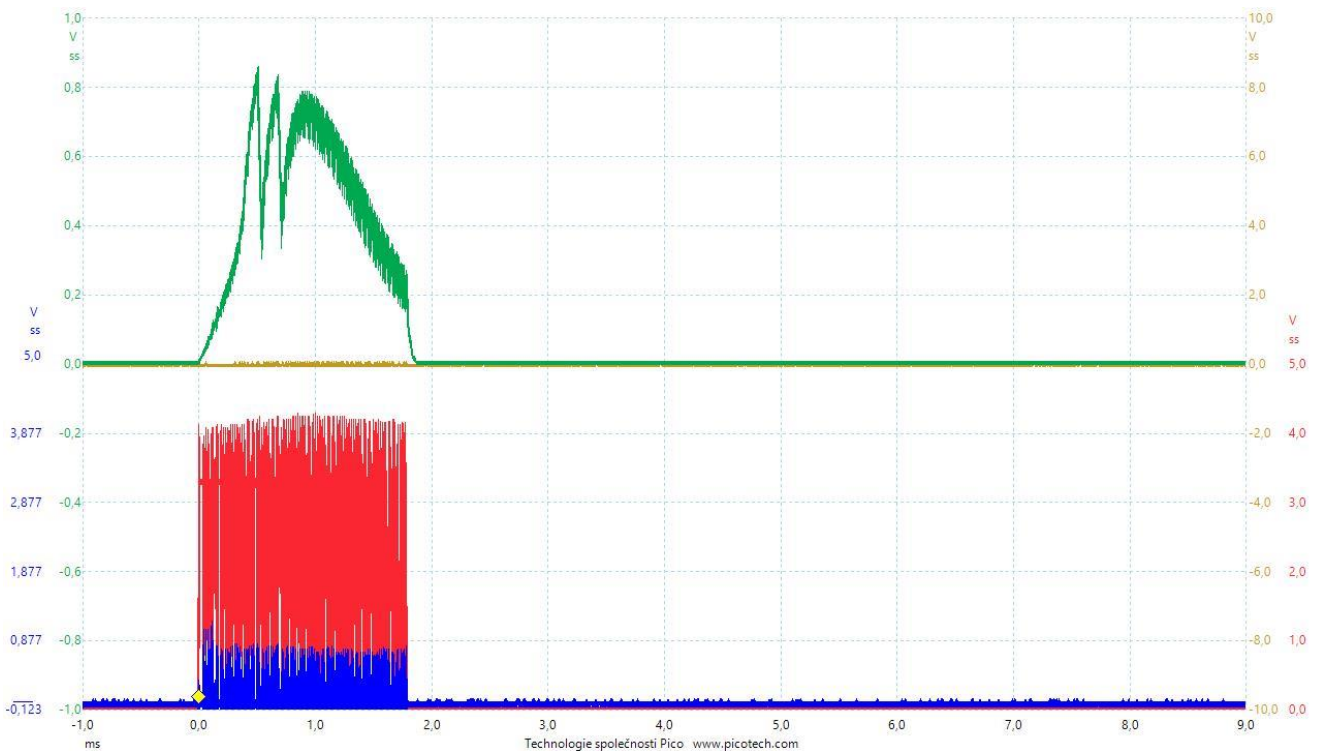
4.3.1 Ověření funkce magneticko-mechanické verze míchacího zařízení

Byly vypracovány tři různé programy pro pohyb krokového motoru. Pomocí těchto programů bylo vždy pohybováno s mikrozkumavkami největším možným zrychlením od a k pól páru. V některých případech mikrozkumavky i narážely do pól páru s úmyslem oddálit částice z protější stěny.

Částice však měly tendenci zůstat na protější stěně a míchaní tak bylo méně efektivní než u prvního míchacího zařízení feromagnetických částic.

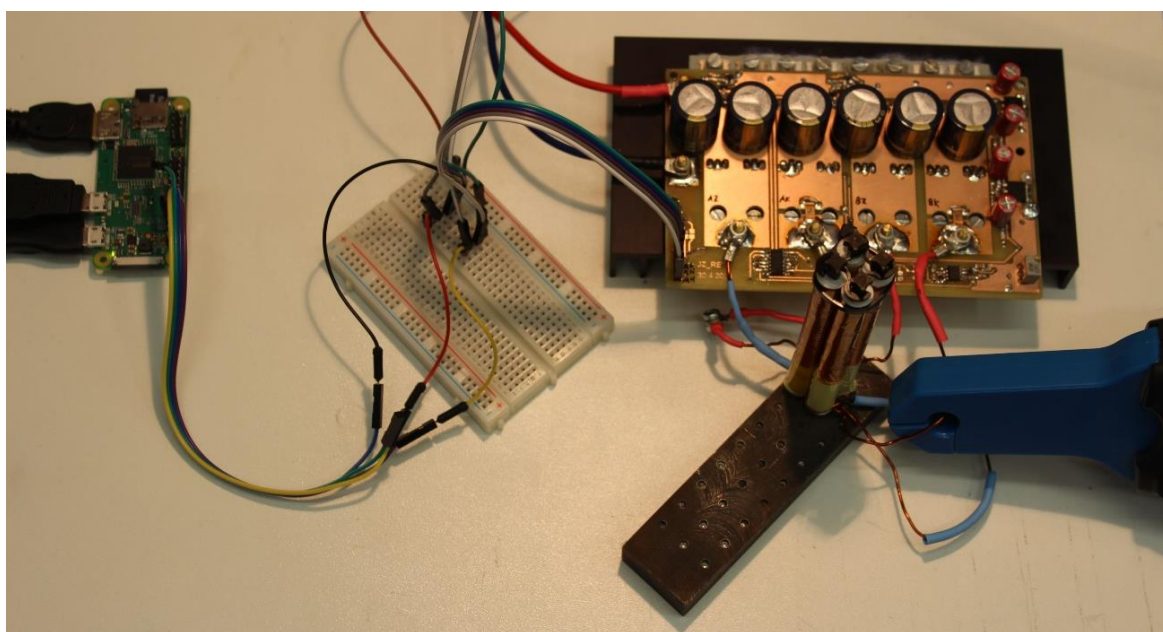
4.4 Ověření funkce varianty 1

První test byl proveden na odzkoušení, zda funguje nadproudová ochrana. Jako zátěž byla zvolena cívka vyrobená v bakalářské práci z důvodu větší indukčnosti a tím menšího zvlnění proudu. Během testu se postupně zvyšovala střída PWM signálu o frekvenci 20 KHz, a když proud snímaný bočnickem byl nad nastaveným maximálním proudem 40 A, nadproudová ochrana zareagovala. Ta však při normálním režimu reagovat nebude a proud cívkou bude řízen.



Obr. 4-12 Záznam řídicího PWM signálu a proudu tekoucím cívkou. Červený průběh – PWM cívka A, zelený průběh – proud tekoucí cívkou s převodní konstantou 100 mV / 10 A.

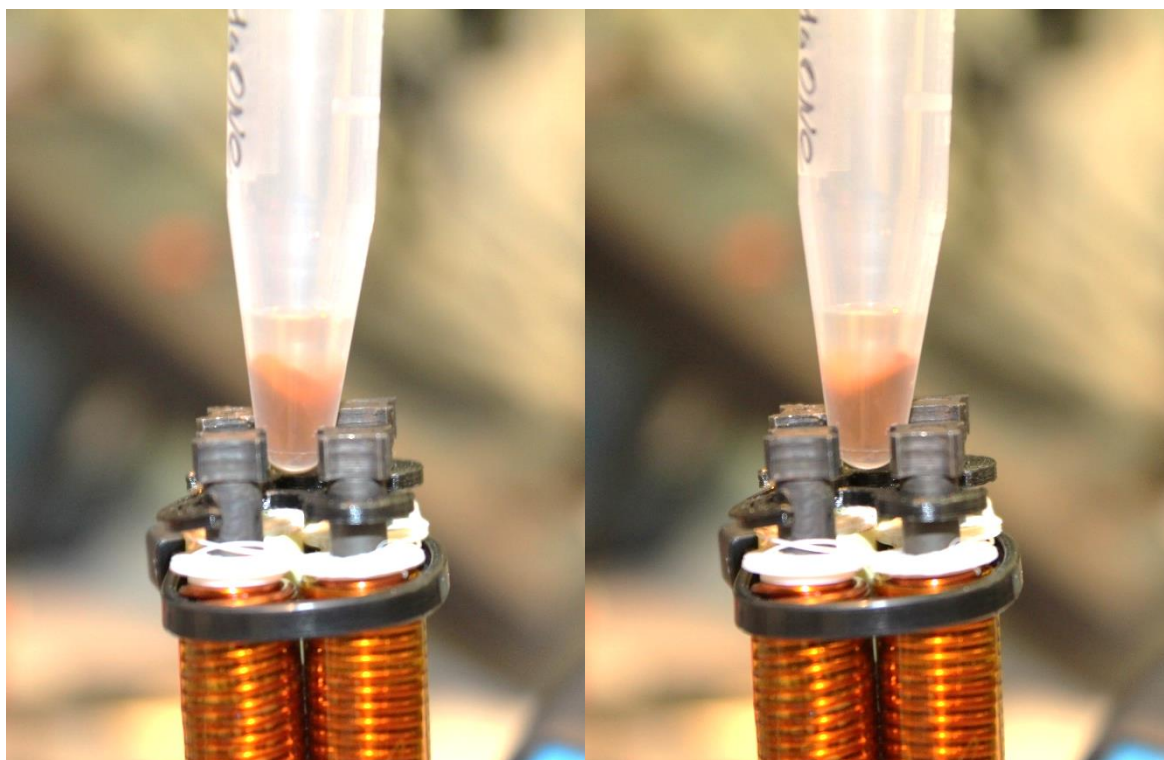
Dále bylo provedeno ověření, zda zařízení funguje. Z toho důvodu byl na zařízení Beaglebone black naprogramován jednoduchý skript, který střídavě spíná obě cívky s pauzami mezi sepnutími 300 ms a dobou proudového pulsu 2 mS. Aby puls byl co nejstrmější, začíná se se střídou 100 % a každou periodu pulsu se snižuje o 1 %. Při dosažení 70 % střídavy je do 2 ms tato střída udržována. Frekvence PWM byla nastavena na 80 KHz. Nadproudová ochrana byla nastavena na 90 A. Během testu se několikrát stalo, že nadproudová ochrana musela zareagovat. Po odladění programu už ale nikdy nezareagovala. [24]



Obr. 4-13 Zapojení míchacího zařízení při ověřování funkce s řídicí jednotkou Raspberry pi zero.

Po ověření míchání bylo zhodnoceno, že míchání feromagnetických částic není tak kvalitní jako u prvního prototypu. Velká část částic zůstávala v blízkosti pólů a permanentní magnetismus je tak udržel navzdory silám způsobeným protějším pólpárem.

Řízení bylo zkoušeno také pomocí jednotky Raspberry pi zero, mezi jejíž výhody patří linuxové prostředí a možnost bezdrátového vzdáleného ladění programu. Tato deska je však nevhodná kvůli nemožnosti přesně časovat délky pulsu. Potom byla vybrána jednotka Beaglebone black, která v procesoru má tzv. PRU (programmable real-time unit). Ty dokáží přesně časovat. [24] [25]



Obr. 4-14 Foto při pulzech proudu v jednotlivých cívkách. Pro znázornění je použita mikrozkušavka o objemu 1,5 ml.

Dále byl míchací program laděn pomocí GUI (graphical user interface), které bylo externě vytvořeno v programu Netbeans. V něm byly laděny doby pulsu proudu, maximální střída pulsu a další parametry. Díky tomu byl zvolen program, který dokázal rozpohybovat částice podobným způsobem jako tomu je u míchačky magnetizovatelných částic z bakalářské práce.

Oproti tomuto zařízení je zde patrná jistá neefektivnost míchání zapříčiněná v hardwarové části zařízení. Důvodem může být tvar pólů, nebo to, že nejsou dostatečně blízko u sebe. Nebo nevhodností spojení jader s jhem pomocí závitu. Zařízení bude tak dále testováno a hardwarová část míchačky bude měněna tak, aby míchání bylo stejně nebo více efektivní než u prvního míchacího zařízení feromagnetických částic.

5 ZÁVĚR

Na základě výsledku dřívější bakalářské práce byly provedeny tři návrhy na konstrukci dalších zařízení. Každý z nich musí mít 96 pozic s pevně danou roztečí 9 mm a s rozložením 8×12 .

První varianta vychází přímo z výsledného zařízení z bakalářské práce. Prakticky se v něm jedná jen o znásobení počtu pozic. Zařízení je omezeno ve dvou osách, ale výška cívek je volitelná. Tento rozměr velmi ovlivňuje celkovou výšku zařízení a Joulovy ztráty cívky. Byla zvolena minimální výška cívky 200 mm. Pro jednu mikrozkumavku vychází magnetické napětí 361,9 A.

Návrh druhé varianty zařízení má pro každou nádobu pouze jeden pól pár oproti první variantě. Je to zkušební návrh, který využívá tvaru mikrozkumavky a dynamiku mikročástic, resp. nanočástic v roztoku. Bylo provedeno dimenzování velikosti cívek. Pro tuto variantu vyšlo magnetické napětí pro jednu mikrozkumavku 390,7 A.

Třetí návrh zařízení je tvořen 9 vzduchovými cívkami, které jsou nasměrovány do nejtěsnější blízkosti mikrozkumavky. Konstrukce tohoto zařízení je nejmenší díky tomu, že tvar cívek je pevně omezen maticí a velikostí mikrozkumavek. Díky výsledkům simulace magnetického pole, byla vyrobena experimentální konstrukce zařízení.

Jako alternativní magneticko-mechanická verze míchacího zařízení bylo navrženo a vyrobeno zařízení, které využívá k míchání permanentních magnetů a krokového motoru. Póly tohoto zařízení byly navrženy a vyrobeny na CNC zařízení spolu s pólovými nástavci vyrobenými pro variantu 1.

Pro realizaci byla vybrána varianta číslo 1. Byl vyroben magnetický obvod a navinuty 2 cívky o 150 závitů, resp. 4 cívky o 75 závitů. Byl navrhnut a vyroben měnič s nadproudovou ochranou s proudovým omezením nastaveným na 100 A. Následně byla ověřena funkce nadproudové ochrany a bylo také ověřeno, zda zařízení dokáže míchat feromagnetickými částicemi. Míchání bylo méně efektivní oproti prototypu z bakalářské práce. Částice měly tendenci zůstat u pólů.

Dalším krokem bude zlepšování míchání částic. Jedním z důvodů, proč míchání není stejně účinné jako u předchozí verze, je způsob připojení jader ke jhu pomocí závitů. Dále to může být způsobeno umístěním matrice, popř. tvarem pól páru. Díky

tomu, že od začátku bylo zařízení navrhováno tak, aby bylo možné udělat úpravy v co největším rozsahu, bude následující optimalizace jednoduchá. Po zajištění efektivnějšího míchaní částic budou vyrobeny zbylé cívky a vyrobeno celé zařízení o 117 cívkách.

6 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] *Springer handbook of nanomaterials*. 1st edition. New York: Springer, 2013. ISBN 9783642205941.
- [2] NATAROV, Valentin, Dzmitry KOTSIKAU, Vladimir SURVILO, Andrei GILEP a Vladimir PANKOV. Facile bulk preparation and structural characterization of agglomerated γ -Fe₂O₃/SiO₂ nanocomposite particles for nucleic acids isolation and analysis. *Materials Chemistry and Physics*. 2018, **219**, 109-119. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2018.08.011>. ISSN 0254-0584. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S025405841830676X>
- [3] CAI, Shuang, Bin LUO, Peipei JIANG, Xiaoxi ZHOU, Fang LAN, Qiangying YI a Yao WU. Immuno-modified superparamagnetic nanoparticles via host–guest interactions for high-purity capture and mild release of exosomes. *Nanoscale*. 2018, **10**(29), 14280-14289. DOI: 10.1039/C8NR02871K. ISSN 2040-3364. Dostupné také z: <http://xlink.rsc.org/?DOI=C8NR02871K>
- [4] TOLDRÀ, Anna, Karl B. ANDREE, Edgar BERTOMEU, Ana ROQUE, Noèlia CARRASCO, Ignasi GAIRÍN, M. Dolores FURONES a Mònica CAMPÀS. Rapid capture and detection of ostreid herpesvirus-1 from Pacific oyster *Crassostrea gigas* and seawater using magnetic beads. *PLOS ONE*. Public Library of Science, 2018, **13**(10), 0205207---. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0205207>
- [5] SHARMA, Antareep, Alfred Iing Yoong TOK, Chleo LEE, Rajaseger GANAPATHY, Palaniappan ALAGAPPAN a Bo LIEDBERG. Magnetic field assisted preconcentration of biomolecules for lateral flow assaying. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2019, **285**, 431-437. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.01.073>. ISSN 0925-4005. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400519301005>
- [6] PATOČKA, Miroslav. *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice*. 1. vyd. V Brně: VUTIUM, 2011. ISBN 9788021440036.
- [7] ZÍTKA, Jan. *Zařízení pro magnetické míchání magnetizovatelných částic v roztoku*. 2017.

- [8] Arduino: Arduino IDE. *Arduino* [online]. 2017 [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>
- [9] *Fusion 360*: Autodesk®. 2018. b.r.
- [10] *Solidworks*. Tennessee: Dassault systems, 2019.
- [11] ANSYS®: *Electromagnetic suits*. Release 18.0. b.r.
- [12] D.C., Meker. Finite Element Method Magnetics: Version 4.2. In: *Www.femm.info* [online]. b.r. [cit. 2016-12-30].
- [13] INTERNATIONAL RECTIFIER, . *HEXFET® Power MOSFET: IRF4905PbF* [online]. In: . 2003 [cit. 2016-12-30]. Dostupné z: http://www.farnell.com/datasheets/2043028.pdf?_ga=1.90516634.1284865501.1482782474
- [14] *HEXFET® Power MOSFET* [online]. In: . 2001 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irf3205.pdf>
- [15] *Switch-mode Power Rectifier 100 V, 60 A* [online]. In: . 2017 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/308/MBR60H100CT-D-95563.pdf>
- [16] MICROCHIP, . *Dual High-Speed Power MOSFET Drivers: TC4427COA* [online]. In: . 2014 [cit. 2016-12-30]. Dostupné z: http://www.farnell.com/datasheets/2124379.pdf?_ga=1.136243121.1284865501.1482782474
- [17] *Positive Voltage Regulators* [online]. In: . 2013 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/308/mc7800-d-1193434.pdf>
- [18] *Current Sense Resistor: CSS2H-2512* [online]. In: . 2018 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/54/ss2h-2512-1302652.pdf>
- [19] *Current-Sense Amplifier: Current-Sense Amplifier With Enhanced PWM Rejection* [online]. In: . 2018 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <http://www.ti.com/general/docs/suppproductinfo.tsp?distId=26&gotoUrl=http%3A%2F%2Fwww.ti.com%2Flit%2Fgpn%2Fina240>
- [20] *Rail-to-rail micropower BiCMOS comparators* [online]. In: . 2012 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/389/ts861-957384.pdf>

- [21] *Quad 2-input AND gate* [online]. In: . 2015 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/916/HEF4081B-1544570.pdf>
- [22] *CHLADIČE PRO POLOVODIČE: CHL20B* [online]. In: . 2007 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.072-451.1.pdf>
- [23] *Stepper Motor Controller IC* [online]. In: . 2010 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8825.pdf>
- [24] *BeagleBone Black System Reference Manual* [online]. In: . 2013 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/BBB_SRM.pdf
- [25] *Raspberry Pi Zero v1.3* [online]. In: . b.r. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: https://cdn.sparkfun.com/assets/learn_tutorials/6/7/6/PiZero_1.pdf