



# Vliv magnetického pole Halbachovy soustavy na chování elektrod v kapalině

## Diplomová práce

*Studijní program:*

N2612 Elektrotechnika a informatika

*Studijní obor:*

Mechatronika

*Autor práce:*

**Bc. Jakub Jaroš**

*Vedoucí práce:*

Ing. Lubomír Slavík, Ph.D.

Ústav mechatroniky a technické informatiky





## Zadání diplomové práce

# Vliv magnetického pole Halbachovy soustavy na chování elektrod v kapalině

*Jméno a příjmení:* Bc. Jakub Jaroš  
*Osobní číslo:* M18000163  
*Studijní program:* N2612 Elektrotechnika a informatika  
*Studijní obor:* Mechatronika  
*Zadávací katedra:* Ústav mechatroniky a technické informatiky  
*Akademický rok:* 2020/2021

### Zásady pro vypracování:

1. Vytvořte model Halbachovy soustavy magnetů ve tvaru kruhového prstence pro DN40.
2. Realizujte Halbachovu soustavu magnetů.
3. Zjistěte vliv magnetického pole na chování elektrod ve vodě (bez průtoku a při maximálním dosažitelném průtoku).

*Rozsah grafických prací:*  
*Rozsah pracovní zprávy:*  
*Forma zpracování práce:*  
*Jazyk práce:*

dle potřeby dokumentace  
40-50 stran  
tištěná/elektronická  
Čeština



### **Seznam odborné literatury:**

- [1] Dědek L., Dědková J.: Elektromagnetismus. VUTIUM Brno, 2000, ISBN 80-214-1548-7.
- [2] Coey, J. M. D.: Magnetism and Magnetic Materials, Cambridge University Press, 2010, ISBN: 9780511845000.
- [3] Vlastnosti současných permanentních magnetů, URL: <http://www.neomag.cz>,  
<http://magnety.info/6.php>
- [4] Návod programu Comsol Multiphysics, URL: <http://people.ee.ethz.ch/~fieldcom/pps-comsol/documents/User%20Guide%20and%20Examples/COMSOLMultiphysicsUsersGuide.pdf>

*Vedoucí práce:*

Ing. Lubomír Slavík, Ph.D.  
Ústav mechatroniky a technické informatiky

*Datum zadání práce:*

9. října 2020

*Předpokládaný termín odevzdání:*

17. května 2021

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.  
děkan

L.S.

doc. Ing. Milan Kolář, CSc.  
vedoucí ústavu

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

5. ledna 2021

Bc. Jakub Jaroš



## Abstrakt

Úkolem bylo zjistit, jaký vliv má Halbachova soustava magnetů na průtokoměrné čidlo a to jak pomocí simulačního programu, tak na skutečném prototypu. První kapitola se věnuje magnetům a Halbachově soustavě po teoretické stránce. Vysvětluje princip fungování a objasňuje klady i zápory jejího použití. V druhé až čtvrté kapitole je popsán stručný návrh soustavy magnetů i soustavy průtokoměru v simulačním programu Comsol. V další kapitole se pracuje s vlivem typu proudění a je vypočteno napětí na elektrodách integrováním intenzity elektrického pole. V šesté kapitole je popsána realizace navrženého průtokoměru a naměřené napětí na elektrodách. To je porovnáno s hodnotami z páté kapitoly. Na základě měření je vybrán nejvhodnější materiál elektrod, který vykazuje nejvyšší odolnost parazitním elektrochemickým vlivům. V závěru je práce zhodnocena.

## Klíčová slova

Halbachova soustava magnetů, Průtokoměr, Laminární proudění, Magnetická indukce, Intenzita elektrického pole, Indukované napětí, Comsol

## Abstract

The thesis deals with the influence of Halbach magnet system on the flow meter sensor, both using a simulation program and on a real prototype. The first chapter deals with magnets and the Halbach system from a theoretical point of view. It explains the principle of operation and explains the pros and cons of its use. The second to fourth chapters describe a brief design of a simulation program in Comsol, both magnet systems and flow meter systems. In the next chapter we work with the influence of the type of flow and the voltage at the electrodes is calculated by integrating the intensity of the electric field. The sixth chapter describes the implementation of the proposed flow meter and the measured voltage at the electrodes. This is compared with the values from the fifth chapter. Based on the measurements, the most suitable electrode material is selected, which shows the highest resistance to parasitic electrochemical influences. In the end, the work is evaluated.

## Keywords

Halbach magnet system, Flow meter, Laminar flow, Magnetic induction, Electric field strength, Induced voltage, Comsol

## Poděkování

Děkuji všem, kteří mi při realizaci diplomové práce předávali odborné znalosti a poskytovali materiální podporu.

# Obsah

Seznam obrázků	11
Seznam tabulek	12
Úvod	13
<b>1 Teoretický fundament</b>	<b>14</b>
1.1 Důležité veličiny, pojmy a vztahy . . . . .	14
1.2 Teorie o magnetech . . . . .	16
1.3 Halbachova soustava magnetů . . . . .	17
1.4 Rešerše – Halbachova soustava pro účely měření objemového průtoku	18
<b>2 Halbachova soustava magnetů – simulace</b>	<b>19</b>
2.1 Geometrické uspořádání . . . . .	20
2.2 Materiály, fyzikální parametry, síťování, studie . . . . .	20
2.3 Výsledky . . . . .	22
<b>3 Halbachova soustava a průtokoměr – Magnetická indukce</b>	<b>25</b>
3.1 Model průtokoměru s Halbachovou soustavou . . . . .	25
3.2 Materiály, fyzikální parametry, síťování, studie . . . . .	26
3.3 Výsledky . . . . .	26
<b>4 Halbachova soustava vlastní konstrukce</b>	<b>28</b>
4.1 Ověření soustavy v Comsolu . . . . .	28
4.2 Sestavení a měření soustavy . . . . .	31
<b>5 Vliv typu proudění</b>	<b>35</b>
5.1 Model průtokoměru s uplatněním typu proudění . . . . .	35
5.2 Výsledky . . . . .	35
5.3 Elektrické napětí indukované na elektrodách . . . . .	37
<b>6 Realizace v laboratoři</b>	<b>38</b>
6.1 Zprovoznění . . . . .	38
6.2 Vliv různých materiálů elektrod na naměřené napětí . . . . .	42
6.3 Finální průtokoměrná trubice . . . . .	45

<b>Závěr</b>	<b>48</b>
<b>Literatura</b>	<b>49</b>
<b>A Přílohy</b>	<b>50</b>
A.1 Obsah na CD . . . . .	50

## Seznam obrázků

1	Princip indukčního průtokoměru, $B$ – magnetická indukce, $I$ – proud cívkami, $v$ – rychlost proudění tekutiny, $L$ – vzdálenost mezi elektrodami, $U_e$ – napětí na elektrodách . . . . .	13
1.1	Lineární a kruhová Halbachova soustava [2] . . . . .	17
1.2	Soustava s $N = 12$ a různými $k$ [5] . . . . .	18
1.3	Uvažované varianty Halbachova seskupení . . . . .	18
2.1	Geometrické uspořádání Halbachovy soustavy . . . . .	20
2.2	Určení směru magnetizace – úhel magnetizace $45^\circ$ , $k = 2$ . . . . .	21
2.3	Určení směru magnetizace – úhel magnetizace $90^\circ$ , $k = 4$ . . . . .	22
2.4	Graf magnetické indukce generované Halbachovou soustavou – úhel magnetizace $45^\circ$ , $k = 2$ . . . . .	23
2.5	Graf magnetické indukce generované Halbachovou soustavou – úhel magnetizace $90^\circ$ , $k = 4$ . . . . .	24
2.6	Graf magnetické indukce generované Halbachovou soustavou – úhel magnetizace $22,5^\circ$ , $k = 1$ . . . . .	24
3.1	Upravený model průtokoměru DN40 s Halbachovou soustavou . . . . .	25
3.2	Nasítovaný poloviční model průtokoměrného čidla a Halbachovy soustavy . . . . .	26
3.3	Tvar magnetického pole Halbachovy soustavy kolem těla průtokoměru . . . . .	27
4.1	Tvar magnetického pole nové Halbachovy soustavy . . . . .	29
4.2	Tvar magnetického pole nové Halbachovy soustavy kolem těla průtokoměru . . . . .	29
4.3	$Y$ složka magnetické indukce v rovině hlavních elektrod od stěny ke středu (20 mm) u Halbachovy soustavy . . . . .	30
4.4	Tvar magnetického pole páru magnetů kolem těla průtokoměru . . . . .	30
4.5	$Y$ složka magnetické indukce v rovině hlavních elektrod od středu (0 mm) ke stěně u jednoho páru magnetů . . . . .	31
4.6	Zhotovená soustava bez vrchního krytu . . . . .	31
4.7	Probíhající měření magnetické indukce . . . . .	32
4.8	Měření hlavního pole – graf 1 . . . . .	33
4.9	Měření hlavního pole – graf 2 . . . . .	33
4.10	Měření vedlejšího pole – graf 1 . . . . .	34
4.11	Měření vedlejšího pole – graf 2 . . . . .	34

5.1	Graf Z složky rychlosti proudění v rovině hlavních elektrod od stěny do středu (20 mm) . . . . .	36
5.2	Graf intenzity elektrického pole v rovině hlavních elektrod od stěny do středu (20 mm), jako součin Z složky rychlosti proudění a Y složky magnetického pole . . . . .	36
6.1	Graf závislosti napětí na nerezových elektrodách při skokové změně průtoku z 0 na 360 l/min (čidlo DN32) . . . . .	38
6.2	Graf průběhu napětí reprezentující vybíjení kondenzátoru – část grafu obrázku 6.1 . . . . .	39
6.3	Graf průběhu napětí reprezentující nabíjení kondenzátoru – část grafu obrázku 6.1 . . . . .	39
6.4	Graf závislosti napětí na nerezových elektrodách při skokových změnách průtoku 0 – 360 – 0 l/min (čidlo DN32) s výskytem parazitních pulzů . . . . .	40
6.5	Graf závislosti napětí na nerezových elektrodách při skokových změnách průtoku 0 – 160 – 360 – 160 – 0 l/min (čidlo DN32) – opakovaná měření . . . . .	41
6.6	Průtokoměry DN32 v sérii . . . . .	43
6.7	Graf závislosti napětí na elektrodách různých materiálů při skokových změnách průtoku 0 – 160 – 360 – 160 – 0 l/min (čidlo DN32) . . . . .	44
6.8	Graf závislosti napětí na elektrodách ze skleného uhlíku při skokových změnách průtoku (čidlo DN32) . . . . .	46
6.9	Zapojení měřicí linky . . . . .	47
6.10	Finální prototyp průtokoměru s Halbachovou soustavou magnetů . . . . .	47

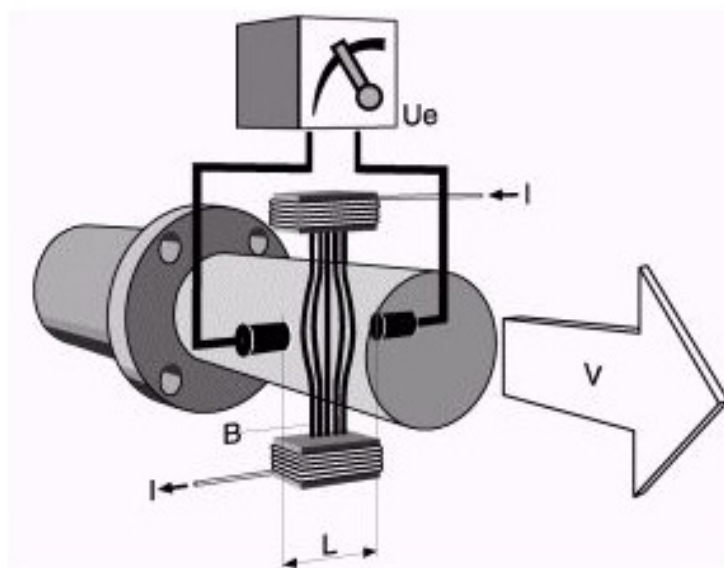
## Seznam tabulek

5.1	Tabulka odsimulovaných hodnot napětí na elektrodách v závislosti na rychlosti proudění pro DN40 . . . . .	37
6.1	Odsimulované hodnoty napětí na hlavním páru elektrod v závislosti na velikosti průtoku u DN40, přepočítáno pro DN32 (tlak 2 bar, teplota 25 °C) . . . . .	42
6.2	Naměřené hodnoty změny napětí na hlavním páru elektrod v závislosti na změně velikosti průtoku u DN32 (tlak 2 bar, teplota 25 °C), s jedním párem magnetů. Poměr průtoků a napětí elektrod . . . . .	44
6.3	Porovnání hodnot změn napětí na hlavním páru elektrod v závislosti na změnách velikosti průtoku u DN32 (tlak 2 bar, teplota 25 °C) s elektrodami ze skelného karbonu. Odsimulované hodnoty z tabulky 6.2. Poměr průtoků a napětí elektrod . . . . .	45



## Úvod

Tématem diplomové práce je vliv magnetického pole Halbachovy soustavy na chování elektrod v kapalině. Principiálně průtokoměr pracuje tak (obrázek 1), že v ose potrubí proudí libovolná tekutina a v druhé ose, kolmé na směr proudění prochází siločáry magnetického pole. Ve třetí ose, kolmé na obě předchozí, dochází k indukování napětí na elektrodách. Na základě rozboru jeho velikosti a průběhu v čase je možné určovat velikost průtoku potrubím. Výzkum navazuje na mé dvě předchozí práce. V každé další práci je snaha o obohacení či zdokonalení stávajícího řešení. Předpokladem je, že čtenář má povědomí o předchozích publikacích [3, 4]. Jelikož je to má poslední práce na FM TUL, bylo cílem zprovoznit funkční čidlo a zužitkovat tak veškerý výzkum za poslední roky. Úkolem bylo vytvořit kruhový model Halbachovy soustavy magnetů vhodný pro průměr průtokoměru 40 mm s vhodnějším magnetickým polem pro tyto účely. Dále tento model realizovat, provést měření a zjistit vzájemné vlivy magnetické indukce a napětí na elektrodách.



Obrázek 1: Princip indukčního průtokoměru,  $B$  – magnetická indukce,  $I$  – proud cívkami,  $v$  – rychlost proudění tekutiny,  $L$  – vzdálenost mezi elektrodami,  $U_e$  – napětí na elektrodách

# 1 Teoretický fundament

## 1.1 Důležité veličiny, pojmy a vztahy

### Magnetizace

Vektor, který charakterizuje magnetické vlastnosti látkového prostředí, vystaveného vnějšímu magnetickému poli. Magnetizace představuje objemovou hustotu magnetického dipólového momentu v prostředí.

### Magnetický dipól

Každý magnet je složen z mnoha dipólů. Každý dipól kolem sebe vytváří magnetické pole se severním a jižním pólem. Je charakterizován magnetickým dipólovým momentem, který je dán proudem procházející smyčkou a orientovanou plochou ohraničenou smyčkou.

### Teplotní odolnost

Souvisí s Curieho teplotou. Každá látka má danou teplotu, při jejíž překročení skokově přestává vykazovat magnetické vlastnosti. Dochází totiž k porušení uspořádání domén. Ty jsou složeny z elementárních dipólů a tvoří magnetické pole látky. Po poklesu teploty pod tuto hranici dochází k uspořádání dipólů a látka opět magnetické vlastnosti začne vykazovat.

### Časová stálost

Zatímco teplotní změny jsou vratné, časové se řadí mezi nevratné. V mikrostruktuře látky dochází k relaxačním pochodům, kvůli kterým se snižuje vnitřní energie. To se projeví poklesem magnetizace. Pro aplikace, kde je vyžadována velká časová stálost je možné magnet podrobit tzv. umělému stárnutí. Magnetizace sice poklesne, ale dále se již měnit nebude.

### Hustota energie [7]

Energii má samo magnetické pole a je v něm rozložena s hustotou:

$$w = \frac{1}{2} \vec{H} \cdot \vec{B} \quad (1.1)$$

## Magnetická indukce

Vektor  $\vec{B}$  [T] udává velikost silových účinků magnetického pole na částici s nábojem nebo magnetický momentem v pohybu.

## Gaussmetr

Přístroj s Hallovou sondou pro měření magnetické indukce.

## Rychlost proudění

Měří se vždy k profilu kolmém k proudnici. Při zanedbání stlačitelnosti vody (při tlaku 2 bar si můžeme dovolit) je možné přepočítat z [m/s] na objemový průtok [l/min].

## Intenzita elektrického pole

Vektorová fyzikální veličina  $\vec{E}$  [V/m] popisující směr a velikost elektrického pole.

Vzorec (1.2) pro intenzitu elektrického pole říká, že vzniká jako následek rychlosti proudění kolmé na magnetickou indukci. Vektor výsledného pole je kolmý na oba tyto vektory.

$$\vec{E} = \vec{v} \times \vec{B} \quad (1.2)$$

Je možné jej odvodit (1.3) z definice Lorentzovy síly. Ta je součtem elektrické a magnetické síly. Při položení obou sil do rovnosti lze intenzitu elektrického pole vyjádřit.

$$Q \cdot \vec{E} = Q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (1.3)$$

## Elektrické napětí

Je rozdíl elektrických potenciálů dvou bodů značené  $U$  [V]. V proměnném elektromagnetickém poli může vznikat elektromagnetickou indukci. V našem případě je to důsledek statického magnetického pole a proměnného proudění.

Dále (vzorec 1.4) je možné určit velikost napětí na elektrodách. Vypočítá se jako integrál z intenzity elektrického pole přes vzdálenost mezi elektrodami. Vychází z obecně známého vzorce pro intenzitu elektrického napětí definované jako podíl elektrického napětí  $U$  a vzdálenosti  $l$  [3].

$$U = \int (\vec{v} \times \vec{B}) dl \quad (1.4)$$

## 1.2 Teorie o magnetech

„Diamagnetická látka je složena z atomů, jejichž výsledný magnetický moment je nulový. Po vložení této látky do vnějšího magnetického pole v ní vzniknou magnetické dipóly působící proti vnějšímu magnetickému poli a tím se zeslabí.

Paramagnetická látka je složena z atomů, jejichž magnetický moment je nenulový. Částice jsou náhodně orientovány, i přesto je ale výsledný magnetický moment části tělesa nulový jako u předchozích látek. Po vložení látky do magnetického pole se částice zorientují stejně a toto pole se zesílí. Těleso je tímto polem přitahováno. Po jeho vytažení z vnějšího magnetického pole se magnetický moment vrátí do původního stavu.

Feromagnetické látce se formují domény – shodně orientované magnetické dipóly. Bez vnějšího magnetického pole se domény orientují náhodně a nevytvářejí žádný magnetický moment. Pokud se magnetické pole začne zvětšovat, domény skokově mění orientaci a zesilují vnější magnetické pole. Na rozdíl od paramagnetických látek zůstávají feromagnetika magnetická i po zrušení tohoto pole.

Permanentní magnet je předmět, který je na rozdíl od elektromagnetů schopen vytvářet magnetické pole aniž by potřeboval zdroj elektrického proudu. Materiály, ze kterých se vyrábějí, se přirozeně vyskytují v horninách nebo se vyrábějí ve formě sloučenin.

Základní dělení je bezesporu právě podle materiálu. Obyčejné, slabé, tzv. nástěnkové magnety se vyrábějí z feritu. Ten vzniká sloučením oxidu železa s uhlíkatem práškovou metalurgií. Podskupinou jsou anizotropní a izotropní, tedy silnější a slabší.

Hned po feritových magnetech jsou nejznámější magnety neodymové NdFeB. V současné době to jsou nejsilnější známé magnety. Myšleno poměrem velikosti přitažlivé síly a objemu magnetu. Daň za tento fakt je malá teplotní odolnost (80 – 130 °C) a velká náchylnost ke korozi. Provádí se u nich povrchová úprava nejčastěji niklováním a zinkováním. Při práci v běžných teplotách se umíme s negativy vypořádat.

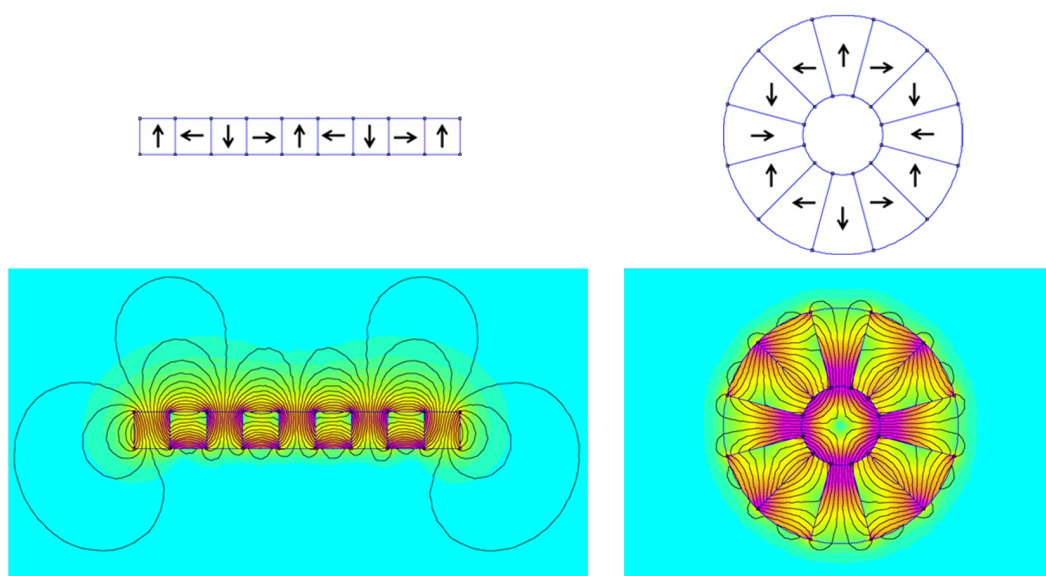
Dále máme magnety Samariové SmCo. Ty vynikají velkou teplotní odolností až 300 °C. Na rozdíl od neodymových magnetů nejsou tak silné, ale zase velmi odolné proti korozi. Jsou běžně k dostání bez povrchových úprav a jejich pořízení je několikanásobně nákladnější než koupě neodymových magnetů podobných parametrů. Posledními běžně dostupnými magnety jsou AlNiCo. Ty mají extrémně velkou teplotní odolnost přes 500 °C a jsou mimořádně odolné vůči kyselinám.

Při výběru magnetu nás bude zajímat také tvar. Běžně je na výběr z hranolů, válců nebo prstenů různých rozměrů.

Z obdoby magnetického pole Země určíme i u magnetů severní a jižní pól. Ze severního pólu směřuje vektor magnetické indukce ven a do jižního pólu tento vektor vstupuje. Označení pochází z doby, kdy bylo za to, že se magnetické pole skládá z magnetických monopolů.“ [3]

## 1.3 Halbachova soustava magnetů

Halbachova soustava je speciální uspořádání pěti permanentních magnetů, případně rozšířená o celé násobky čtyř. Je pojmenována po fyzikovi Klausu Halbachovi, který ji sestavil v roce 1985, tedy relativně nedávno. Původně měla být tato soustava použita pro urychlovač částic, který Klaus Halbach stavěl. Přišlo se však na to, že ji lze s velkými výhodami používat v dopravě jako pasivní magnetická ložiska pro tzv. maglev, neboli magnetickou levitaci. Často se také lze setkat s patentovaným pojmem Inductrack. Také NASA se aplikací zabývala pro konstrukci katapultu pro start raketoplánů a kosmických raket. Vyznačuje se tím, že z jedné strany vytváří mimořádně silné magnetické pole oproti straně druhé. Uspořádání je dáno směrem magnetizace jednotlivých magnetů a je třeba ho cyklicky opakovat. Používají se dva tvary soustavy, lineární a kruhový [1].

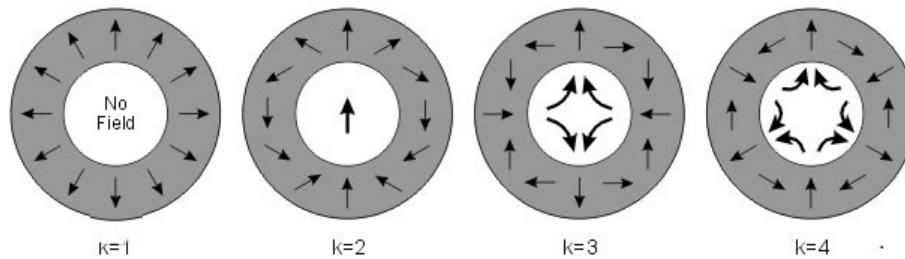


Obrázek 1.1: Lineární a kruhová Halbachova soustava [2]

V tomto případě přichází v úvahu pouze kruhový tvar okolo těla průtokoměru, přičemž vnitřní průměr Halbachovy soustavy bude větší než vnější průměr těla průtokoměru z důvodu přístupu k elektrodám. Počet magnetů  $N$  a číslo  $k$ , které vyjadřuje počet magnetů s magnetizací stejného směru, se volí. Jedno základní uspořádání je složeno z pěti magnetů. Úhel mezi magnetizacemi dvou magnetů vypočítáme jako:

$$\alpha = k \cdot \frac{360}{N} \quad (1.5)$$

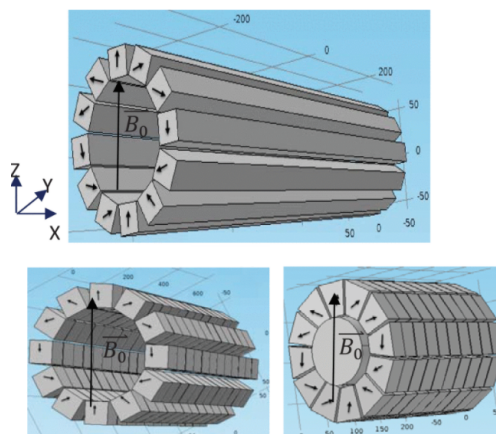
Zároveň musí být splněna podmínka celočíselného podílu pro  $N$  a  $k$ .



Obrázek 1.2: Soustava s  $N = 12$  a různými  $k$  [5]

## 1.4 Rešerše – Halbachova soustava pro účely měření objemového průtoku

Poslední dva roky se začínají objevovat práce o vývoji indukčních průtokoměrů s permanentními magnety. Doposud se jimi nikdo kvůli elektrochemickým vlivům nezabýval. Při hledání jsem narazil na několik prací zabývajících se principem magnetické rezonance. Nejzajímavější je práce dvojice ze Spojených Arabských Emirátů [6]. Snaha o vytvoření vhodné Halbachovy soustavy pro průtokoměr použitelný na ropných polích je podložena jak teoretickými znalostmi, tak simulací v prostředí Matlab. Snaha o silné a homogenní magnetické pole dovedla vývoj k 600 mm dlouhému uskupení magnetů. To je složeno z dvanácti Halbachových soustav a každá obsahuje dvanáct neodymových permanentních magnetů. Práce řeší, zda je nejvhodnější použít 144 kvádrových magnetů, 144 lichoběžníkových magnetů nebo uskupení složit z jedné soustavy dvanácti dlouhých kvádrových tyčí. První dvě řešení byla sestavena a je konstatována velmi dobrá shoda mezi měřeními a simulovanými hodnotami.



Obrázek 1.3: Uvažované varianty Halbachova seskupení

## 2 Halbachova soustava magnetů – simulace

Většina kruhových soustav, které se běžně používají, jsou složeny z dvanácti magnetů. Zbylé jsou z osmi, šestnácti nebo dokonce i dvaceti osmi magnetů. Zde byla zvolena šestnáctičlenná soustava. Aby bylo možné provádět porovnání, bude se pracovat s různými rozdíly úhlu magnetizace mezi dvěma sousedními magnety, tedy různými  $k$ . Jak je psáno v první kapitole, není možné libovolně volit počty magnetů. Stejně tak budou pro dané  $N$  určeny i možné úhly magnetizace. Existuje omezené množství úhlů. Jinak by se nepovedlo dodržet základní uspořádání Halbachovy soustavy. Pro  $N = 16$  a  $k = 1$  až 4 jsou možné 3 různé polarizace a to  $22,5^\circ$ ,  $45^\circ$  a  $90^\circ$ . Pro  $k = 3$  není splněna podmínka celočíselného dělení. Při použití většího počtu magnetů stejných parametrů bude i pole uvnitř silnější. Různé magnetizace budou také vytvářet podstatné rozdíly. Očekávány jsou změny tvaru a velikosti výsledného pole.

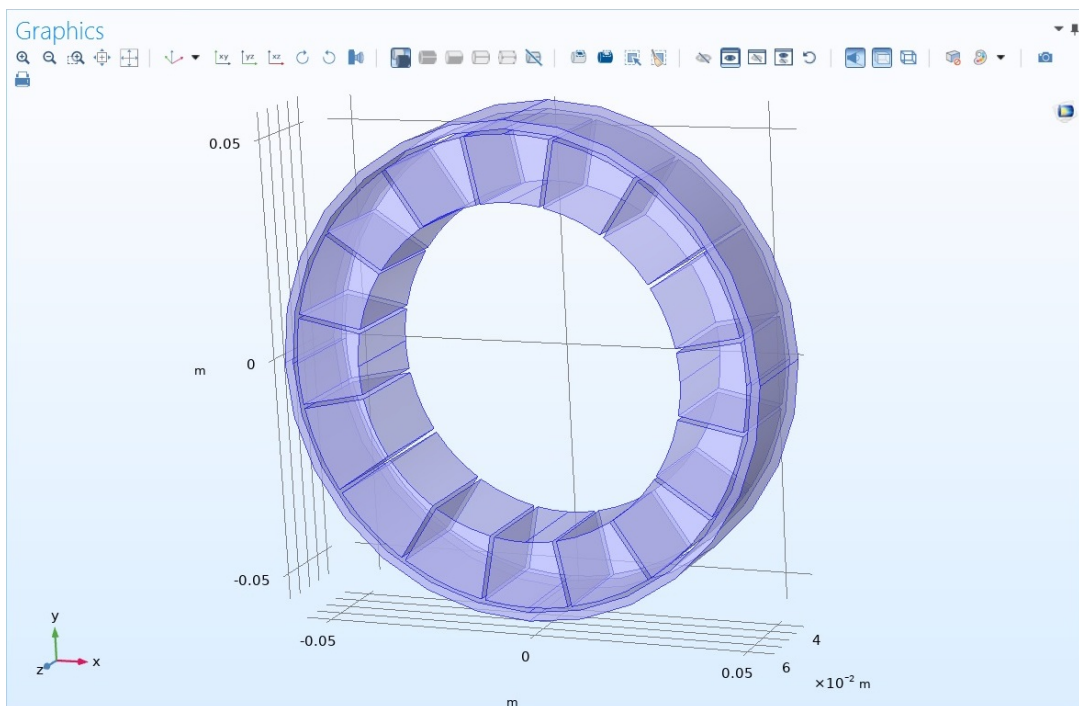
Dle úvahy, bude pro homogennější pole lepší zvolit vyšší počet magnetů a malé rozdíly v úhlu magnetizace. Dva magnety se budou nejvíce odpuzovat právě tehdy, kdy směr magnetizace bude opačný. Tím se budou rušit jejich silové účinky. Z vnějšího pohledu to bude mít negativní vliv na celkové magnetické pole. U většího počtu nebude docházet k tak velkému vzájemnému rušení magnetického pole. Magnetická indukce ve středu soustavy by měla být největší ve chvíli, kdy bude jak největší počet magnetů, tak i konstanta  $k$ . Když bude v kruhu malé množství magnetů, úhel magnetizace mezi dvěma sousedními magnety bude muset být velký, aby se magnetizace otočila o celé násobky  $360^\circ$  při jedné otočce. Jaký skutečný tvar bude mít složené pole soustavy odhalí až simulace. Pro soustavu s  $N = 16$  budou vytvořeny tři modely, přičemž v každém bude jiný úhel magnetizace. Tato simulace osvětlí, který případ je schopný vytvořit největší magnetickou indukci ve středu a nejhomogenější pole. Prakticky dojde k ověření obrázku 1.2.

Comsol Multiphysics je simulační software, který pracuje s metodou konečných prvků (MKP). Sdružuje fyzikální problematiku a nejčastěji navrací výsledek ve formě grafů. MKP diskretizuje spojitý fyzikální model do konečného počtu prvků. Výsledky jsou poté dopočítávány v jednotlivých uzlech sítě. Každý libovolně velký systém je tak možné rozložit na velký počet jednodušších výpočtů [3].



## 2.1 Geometrické uspořádání

Halbachova soustava byla modelována v novém projektu Comsolu Multiphysics, aby mohla být testována zvlášť a po odladění naimportována k již existující průtokoměrné trubici DN40. Pro přidání různých směrů magnetizace musely být jednotlivé magnety vykresleny zvlášť. Postupovalo se vytvořením dvou válců. Průměr prvního byl požadovaný vnější průměr Halbachovy soustavy, druhý zase průměr vnitřní s ohledem na elektrody. Výška válců tvoří tloušťku soustavy. Nástrojem Compose (sjednocení) bylo poté vytvořeno mezikružší. Dále bylo potřeba definovat mezery mezi dvěma magnety a mezikružší rozdělit na šestnáct dílů. Na závěr byl vytvořen vnější prstenec, který magnety drží pohromadě.



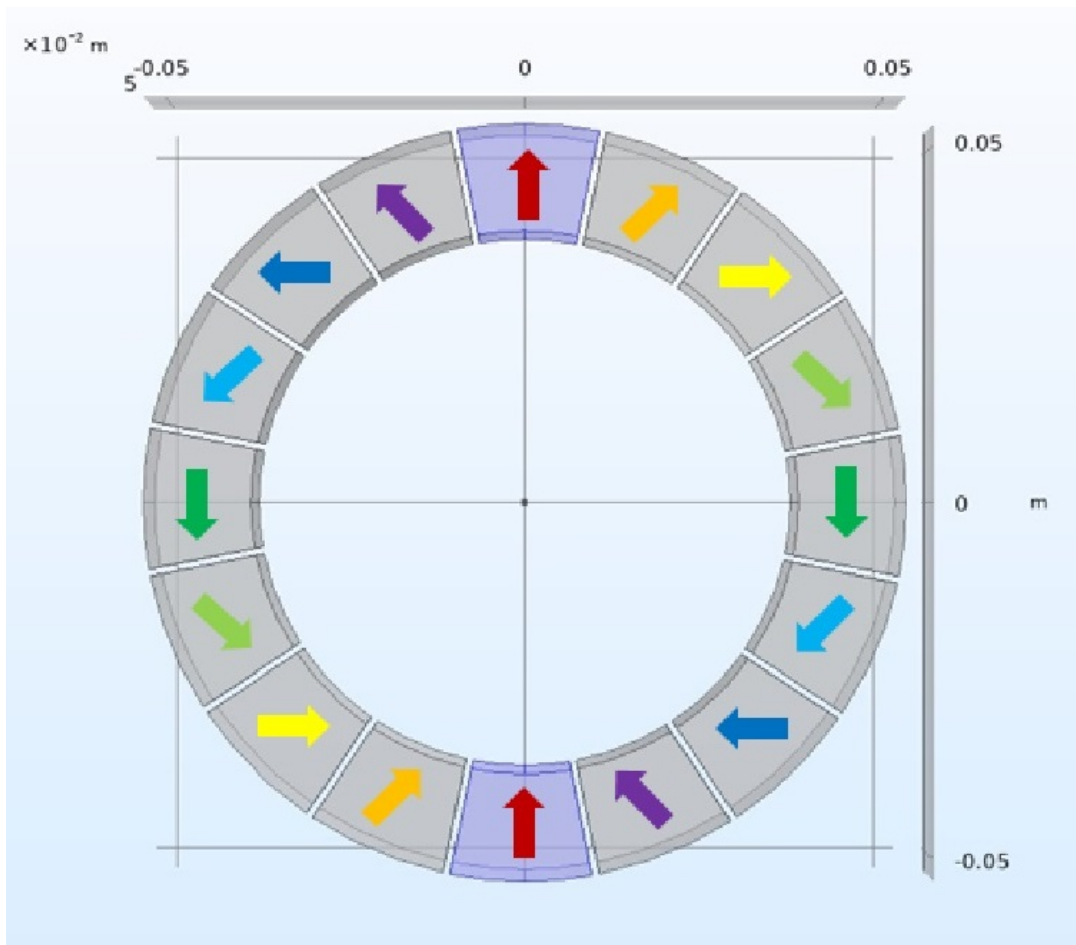
Obrázek 2.1: Geometrické uspořádání Halbachovy soustavy

## 2.2 Materiály, fyzikální parametry, síťování, studie

Jako materiál vnějšího prstence byla použita nerezová ocel a pro okolní prostor vzduch. Magnetům, zde považovaným za ideální zdroje magnetického pole, není třeba žádný materiál přiřazovat.

Důležité vlastnosti pro výpočty jsou přiřazeny v modulu Physics – Magnetic fields, No current. Podle obrázku 2.2 byly definovány směry magnetizace pro první model s  $k = 2$ .



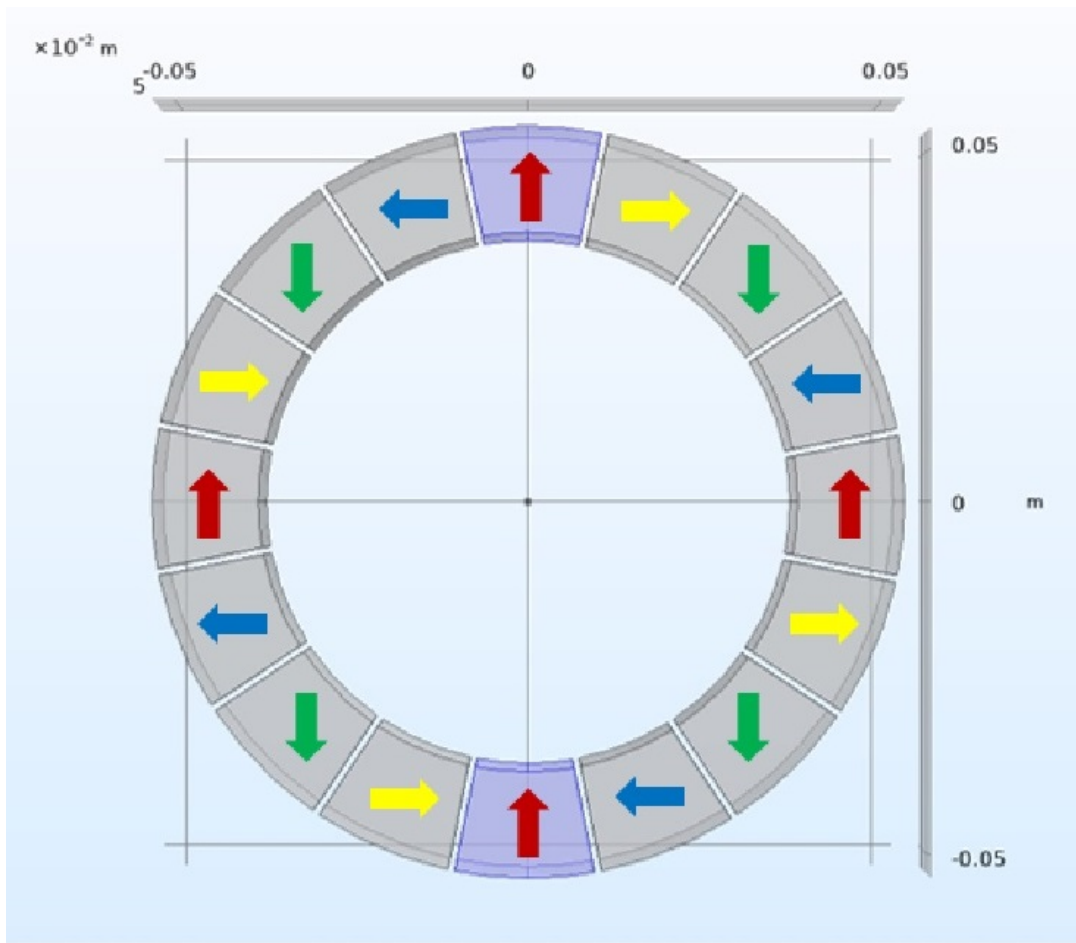


Obrázek 2.2: Určení směru magnetizace – úhel magnetizace  $45^\circ$ ,  $k = 2$

U prvního a osmého magnetu, na šesté a dvanácté hodině, míří magnetizace v kladném směru osy Y. V modulu Physics byla přidána položka Magnetic Flux Conservation. Pomocí domén byly tyto dva magnety vybrány a v položce Magnetic Field zvolena Magnetizace. V předchozích pracích byla použita jako parametr experimentálně zjištěná hodnota magnetizace pro neodymový magnet podobných rozměrů o velikosti 1000 kA/m. Zadána tedy byla s kladným znaménkem pro osu Y. U druhého a devátého magnetu míří magnetizace pod úhlem  $45^\circ$ . Když se magnetizace pod tímto úhlem rozpočítá pro osy X a Y, vyjdou hodnoty zhruba 707 kA/m. Obdobně bylo postupováno i u dalších magnetů. Stále se používaly tyto dvě hodnoty magnetizace se střídajícím se znaménkem a umístěním v osách X a Y. Magnetizace v ose Z, v ose průtoku, je vždy nulová.

Nastavení sítě i studie bylo použito výchozí. Comsol si tak sám určí nejvhodnější parametry pro výpočet použitých modulů Physics.

Dále byly vytvořeny modely pro dva zbylé případy a to pro  $90^\circ$  na obrázku 2.3 a  $22,5^\circ$ .

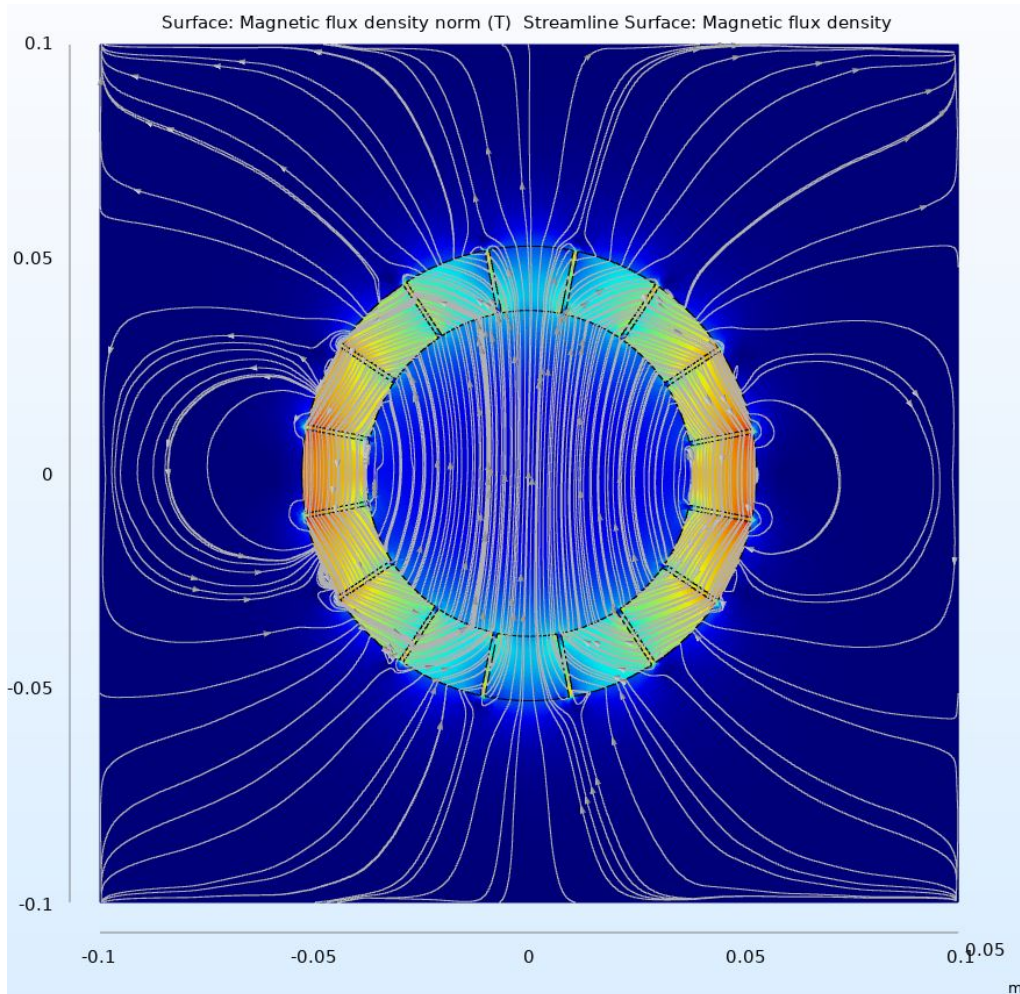


Obrázek 2.3: Určení směru magnetizace – úhel magnetizace  $90^\circ$ ,  $k = 4$

V případě  $22,5^\circ$  není obrázek nutný. Magnetizace má směr tečny kružnice protínající střed průtokoměru a těžiště magnetu. Tato varianta nebude nejspíš vůbec vyhovovat. Úhel je sice malý, ale magnetické pole bude „utíkat“ do vnějšího prostoru a uvnitř se předpokládá nejmenší možné pole. Hodnota zadávané magnetizace v případě  $90^\circ$  je jen jedna. Celých  $1000 \text{ kA/m}$ , které se mění v osách X a Y, ať už v kladném nebo záporném směru. Stejnou logikou se řídíme i u  $22,5^\circ$ . Oproti  $45^\circ$  se navíc pracuje s hodnotami  $924 \text{ kA/m}$  pro osu X a  $383 \text{ kA/m}$  pro osu Y (platí pro vektor magnetizace o velikosti  $1000 \text{ kA/m}$  pod úhlem  $22,5^\circ$ ).

## 2.3 Výsledky

Na obrázku 2.4 pro  $k = 2$  je patrné, že magnetické pole znázorněné siločárami je uvnitř soustavy téměř lineární. Simulací byla zjištěna hodnota  $151,62 \text{ mT}$  pro  $45^\circ$ . Tato varianta byla vybrána pro svou linearitu a velikost pole. Podobnost s obrázkem 1.2 je patrná.

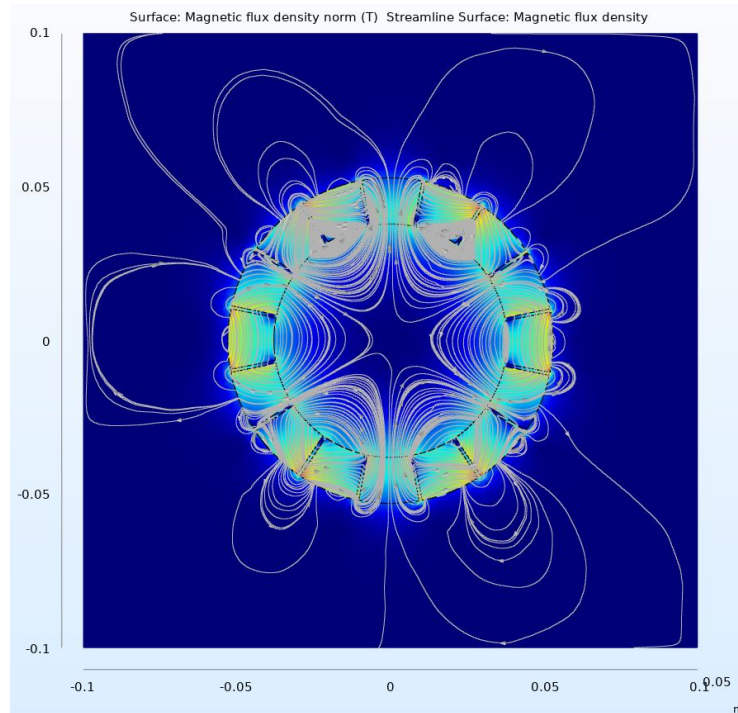


Obrázek 2.4: Graf magnetické indukce generované Halbachovou soustavou – úhel magnetizace  $45^\circ$ ,  $k = 2$

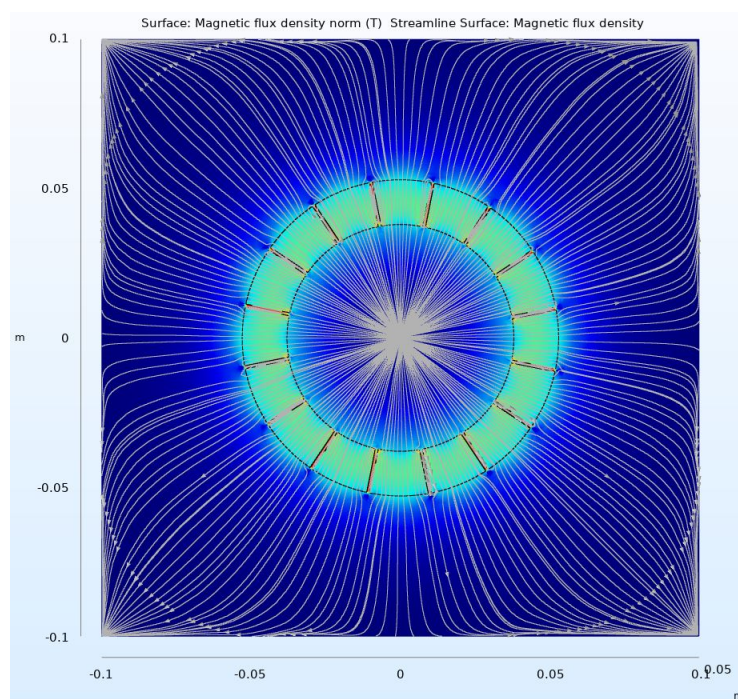
Pro  $k = 4$  je velikost indukce, pouhých 11,129 mT, nedostatečná a tvar pole nevhodný. Tím byl vyvrácen předpoklad z druhé kapitoly o nejsilnějším poli pro největší  $k$ . Pro  $k = 1$  je pole téměř nulové. Hodnotou 3,642 mT byl předpoklad potvrzen.

Jelikož byly obdrženy slibné výsledky simulace, byl modul Geometrie exportován do souboru .mph pro další použití.

Nabízela se rovněž další experiment. Pokud by se přidal druhý pár elektrod, natočený o  $90^\circ$  vůči hlavním elektrodám a pole by bylo homogenní, znamenalo by to, že by se na kolmých elektrodách vzhledem k magnetickému poli indukovalo pouze rušení a na druhém, hlavním páru jak rušení, tak i chtěný signál. Tím by mohlo být umožněno šum identifikovat a účinně ho oddělit od žádaného signálu. V bakalářské práci [3] byl šum a rušení jedním z hlavních důvodů nefunkčnosti průtokoměru.



Obrázek 2.5: Graf magnetické indukce generované Halbachovou soustavou – úhel magnetizace  $90^\circ$ ,  $k = 4$



Obrázek 2.6: Graf magnetické indukce generované Halbachovou soustavou – úhel magnetizace  $22,5^\circ$ ,  $k = 1$

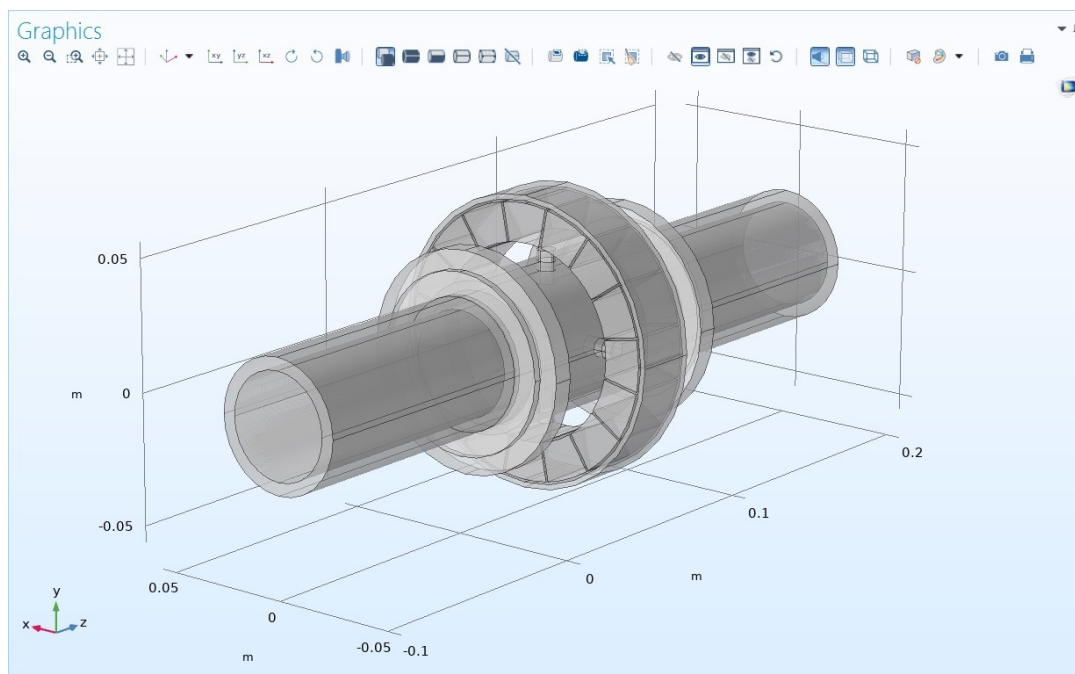


## 3 Halbachova soustava a průtokoměr – Magnetická indukce

V zadání je uveden stejný průtokoměr DN40 jako v ročníkovém projektu Model chování kapaliny v elektromagnetickém poli [4]. Může proto dojít k rozšíření již existujícího simulačního programu.

### 3.1 Model průtokoměru s Halbachovou soustavou

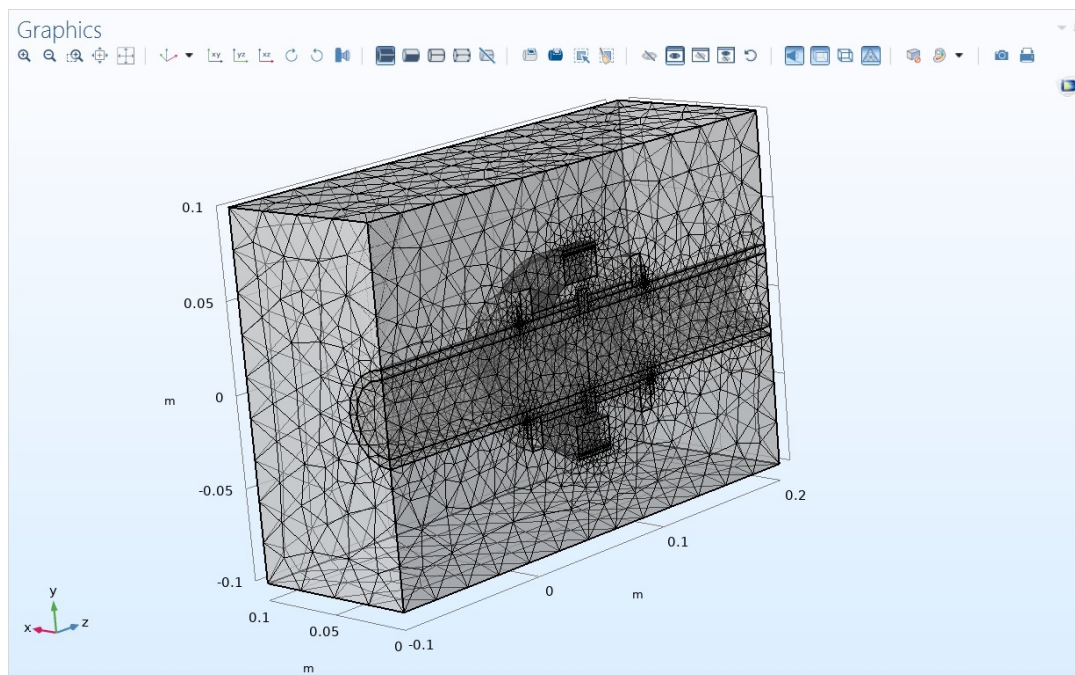
Z modelu bylo použito vše až na neodymové magnety a jejich nástavce. Domodelován byl druhý pár elektrod a také naimportovaný .mph soubor a Halbachovou soustavou magnetů. Tu stačilo pouze vhodně natočit a posunout v osách X, Y a Z na správné místo. Výsledný model byl oříznut na polovinu pro úsporu výpočetního času. Dřívější čtvrtinové modely jsou již zbytečné. Comsol od verze 5.4 značně zkrátil čas pro výpočet studie.



Obrázek 3.1: Upravený model průtokoměru DN40 s Halbachovou soustavou

## 3.2 Materiály, fyzikální parametry, síťování, studie

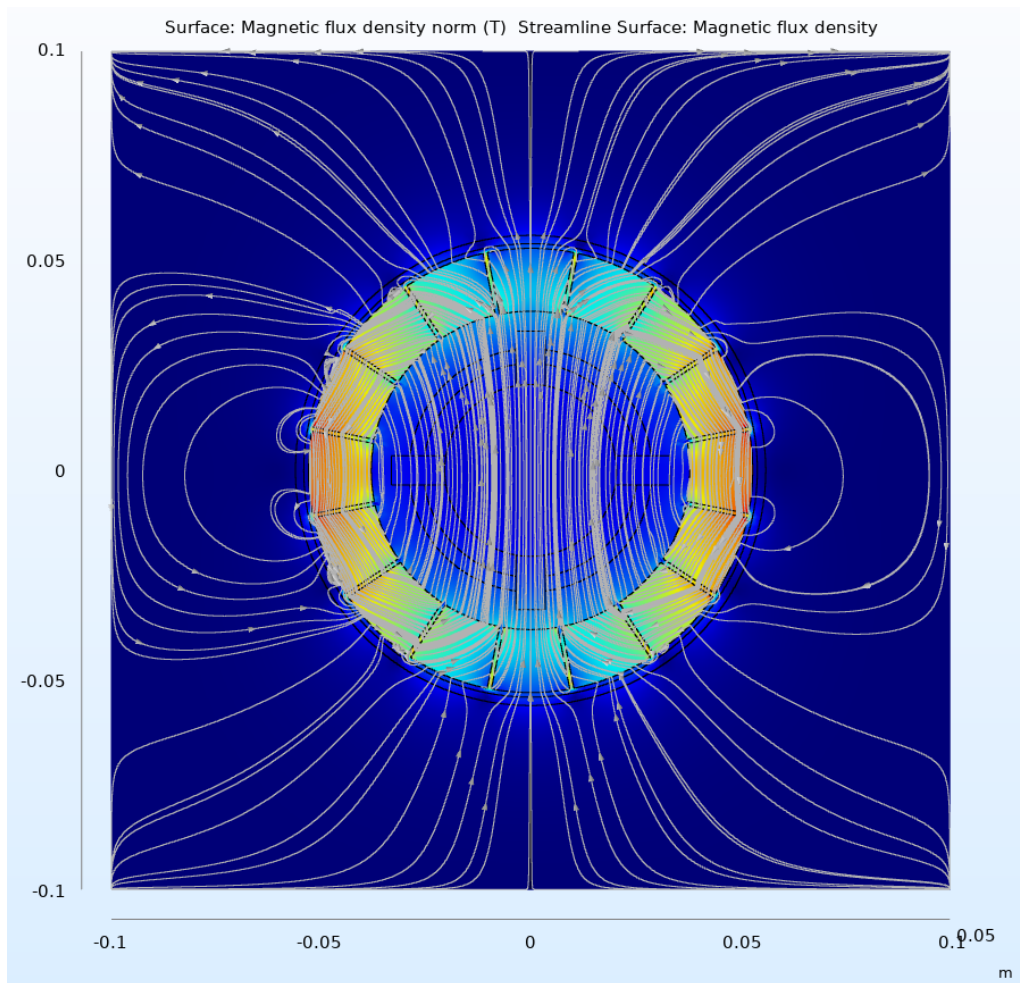
Jako materiál průtokoměru byla ponechána nerezová ocel, pro elektrody byla z důvodu dostupnosti zvolena též. Vnitřní potrubí je teflonové, okolí průtokoměru tvoří vzduch a vnitřní část voda. Veškeré nastavení modulu Physics – Magnetic fields, no current zůstala stejná jako v předchozí kapitole. Co se síťování týče, byla zvolena velikost Fine (jemná) pro celou soustavu a automatickou velikostí pro okolí. V místě styku vody a průtokoměru, kde je plánovaný střet dvou modulů Physics je hrubost sítě velikosti Finer (jemnější). Nastavení studie je i v tomto případě výchozí.



Obrázek 3.2: Nasítovaný poloviční model průtokoměrného čidla a Halbachovy soustavy

## 3.3 Výsledky

Jak je vidět na obrázku 3.3, Halbachova soustava soustředí magnetické pole hlavně uvnitř. Tělo průtokoměru i potrubí má permeabilitu blízkou jedné a tak magnetické pole téměř neovlivňuje. I tak je ale ve středu zjištěna hodnota 151,39 mT, tedy o 0,15 % menší hodnota než samotná soustava bez průtokoměru. Oproti dvěma neodymovým magnetům je to velký nárůst (80 mT). Větší magnetická indukce umožní naindukovat větší napětí na elektrodách a tím i zvýšit rozdíl mezi žádaným signálem a rušením. K žádanému signálu napomůže i signál z druhého páru elektrod, na kterém by se mělo indukovat pouze rušení.



Obrázek 3.3: Tvar magnetického pole Halbachovy soustavy kolem těla průtokoměru

## 4 Halbachova soustava vlastní konstrukce

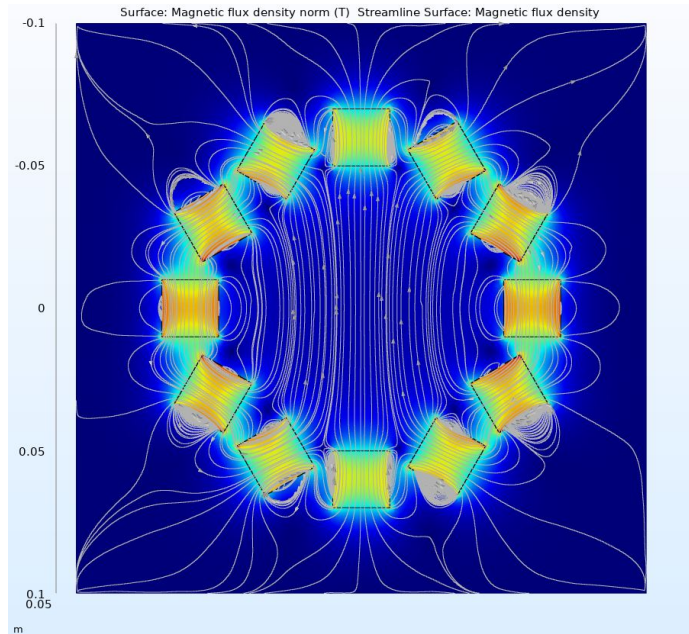
Bohužel, navrženou soustavu byl schopný vyrobit pouze jediný z šesti poptaných výrobců magnetů v ČR. Termín dokončení práce by ani tak nebyl dodržen. Důvodem byly magnety velmi specifického tvaru, které se vyrábějí na zakázku. Bylo nutné přemodelovat soustavu pro DN40 tak, aby ji bylo možné vyrobit z dostupných zdrojů FM. Tvar magnetů byl změněn na krychle. Není tak potřebné řešit orientaci magnetů až do finálního sestavení soustavy.

Tělo soustavy, do kterého se magnety budou vkládat bylo navrženo z jednoho kusu a optimalizováno pro 3D tisk. Dán byl i vnitřní průměr těla – musí být minimálně stejný jako vnější průměr přírub průtokoměru, aby mohlo dojít k nasazení. Dále se změnil počet magnetů soustavy. Vzhledem k okolnostem bylo nejvhodnější přejít na dvanáctičlennou soustavu a krychle s délkou hrany 20 mm. Vzdálenost těžiště dvou magnetů ležících proti sobě je 120 mm. Pro zjištění úhlu magnetizace byl opět použit vzorec (1.5),  $k$  bylo na základě kapitoly 2.3 zvoleno rovné dvěma. Výsledný tvar pole bude totožný s polem na obrázku 1.2 pro  $k = 2$ . Předpoklad tohoto řešení je následovný. Vzhledem k mezerám mezi magnety nebude pole uvnitř tak dokonale homogenní a očekává se i slabší magnetická indukce ve středu soustavy. Při konzultaci se však došlo k závěru, že rozdíl nebude pro tyto účely zásadní a slabší pole nebude překážkou, pokud bude zachována homogenita. Velkým plusem této soustavy je, že bude několikanásobně levnější kvůli sestavení z komerčně dostupných neodymových magnetů.

### 4.1 Ověření soustavy v Comsolu

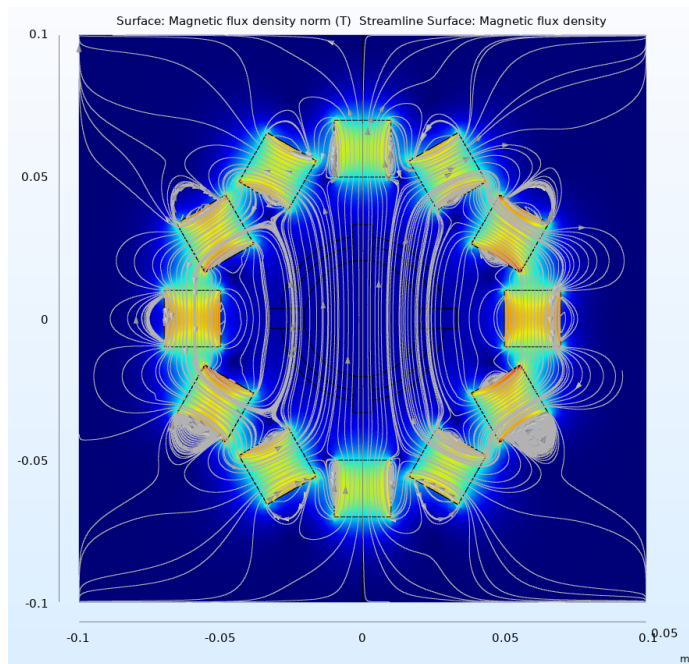
Vytvoření modelu proběhlo podobně jako vytvoření předchozí Halbachovy soustavy. Jednotlivé magnety byly vykresleny zvlášť a liší se mezi sebou v natočení podle osy Z a v souřadnicích X a Y svého těžiště. Z náměrů provedených po namodelování první soustavy byla magnetizace snížena z 1000 na 800 kA/m. Z časových důvodů byla ušetřena práce s kreslením těla soustavy. Materiály s permeabilitou blízkou jedné stejně magnetické pole téměř neovlivňují. To již bylo dokázáno v kapitole 3.3. Samotná soustava má ve svém středu indukci velikosti 52,52 mT (obrázek 4.1).





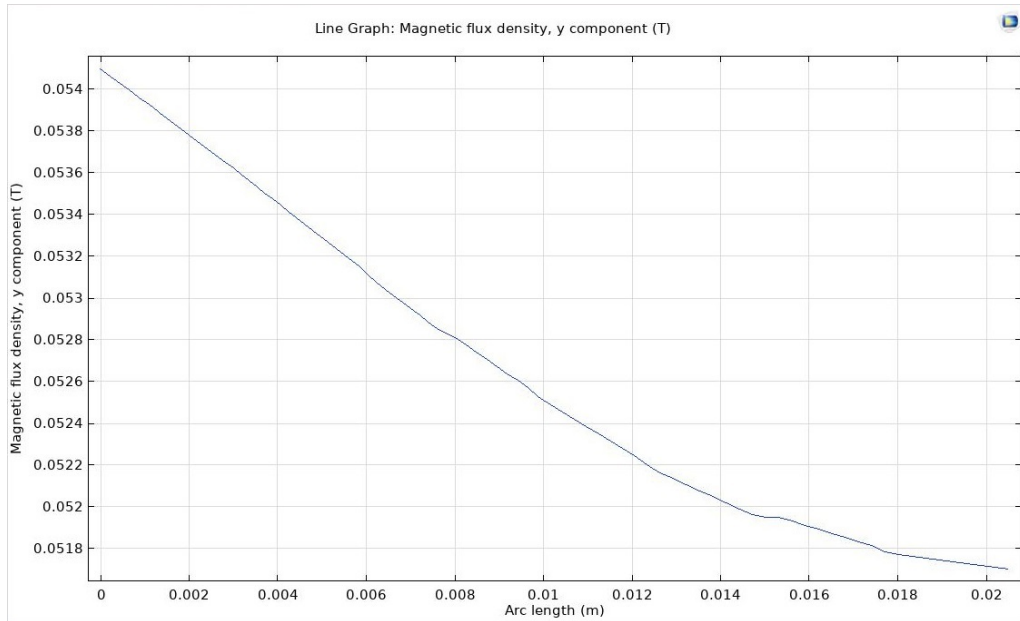
Obrázek 4.1: Tvar magnetického pole nové Halbachovy soustavy

Soustava včetně průtokoměru má indukci ve středu jen 48,61 mT. Větší ovlivnění pole je způsobeno většími mezerami mezi magnety. Pole bylo po přidání čidla oslabeno o 8 % (obrázek 4.2).



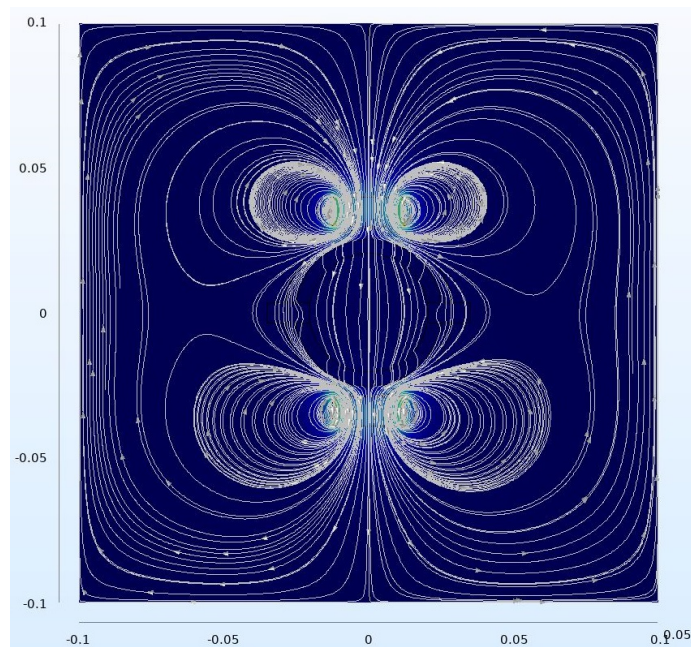
Obrázek 4.2: Tvar magnetického pole nové Halbachovy soustavy kolem těla průtokoměru

Na grafu (obrázek 4.3) je rozložení magnetické indukce v ose elektrod. Hodnota indukce od stěny ke středu klesá, ale pouze o 4,3 %.

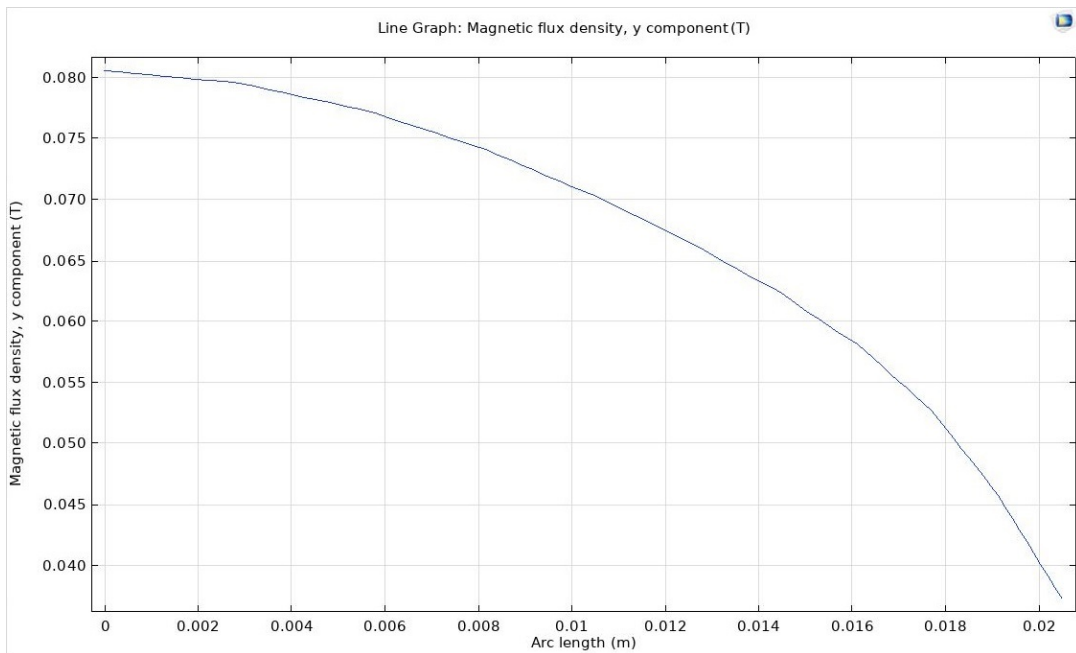


Obrázek 4.3: Y složka magnetické indukce v rovině hlavních elektrod od stěny ke středu (20 mm) u Halbachovy soustavy

Pro porovnání je na obrázku 4.4 magnetické pole generované jedním párem magnetů. Je především vyzařováno vně trubice a uvnitř se deformuje. Uprostřed má magnetická indukce velikost zhruba 80 mT, tedy o 35 % více, než v případě nové Halbachovy soustavy na obrázku 4.2. Na grafu (obrázek 4.5) je rozložení indukce v ose elektrod. Hodnota indukce ve středu dosahuje jen 46 % hodnoty u stěny.



Obrázek 4.4: Tvar magnetického pole páru magnetů kolem těla průtokoměru



Obrázek 4.5: Y složka magnetické indukce v rovině hlavních elektrod od středu (0 mm) ke stěně u jednoho páru magnetů

## 4.2 Sestavení a měření soustavy

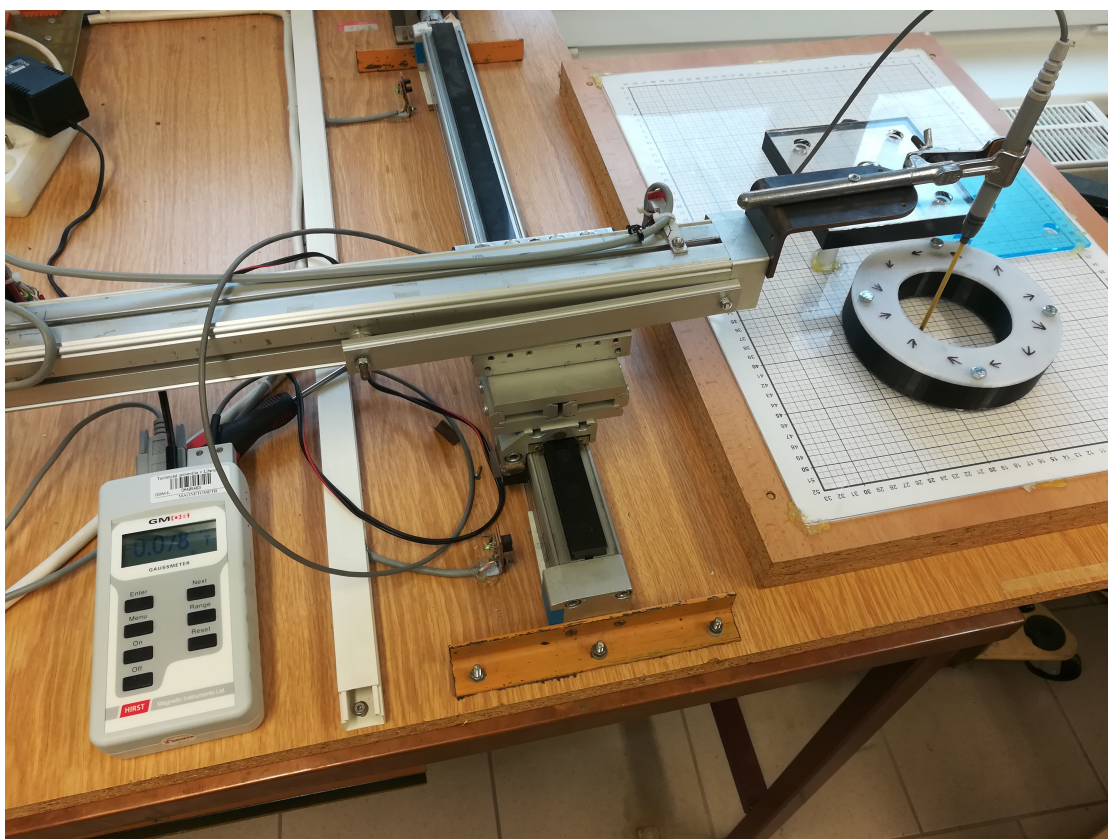
Tělo průtokoměru se povedlo vytisknout na školní 3D tiskárně a náklady na pořízení magnetů nepřesáhly jeden tisíc korun českých. Nabídka na zhotovení předchozí soustavy se pohybovala kolem dvacetinásobku.



Obrázek 4.6: Zhotovená soustava bez vrchního krytu



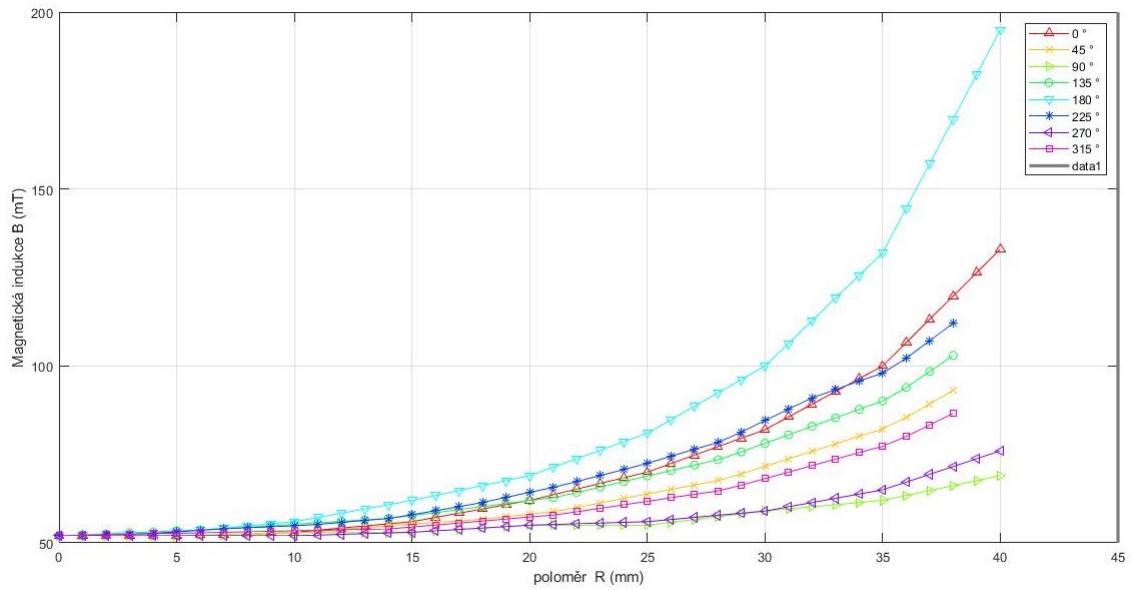
Po sestavení byla soustava přeměřena na přípravku s gaussmetrem.



Obrázek 4.7: Probíhající měření magnetické indukce

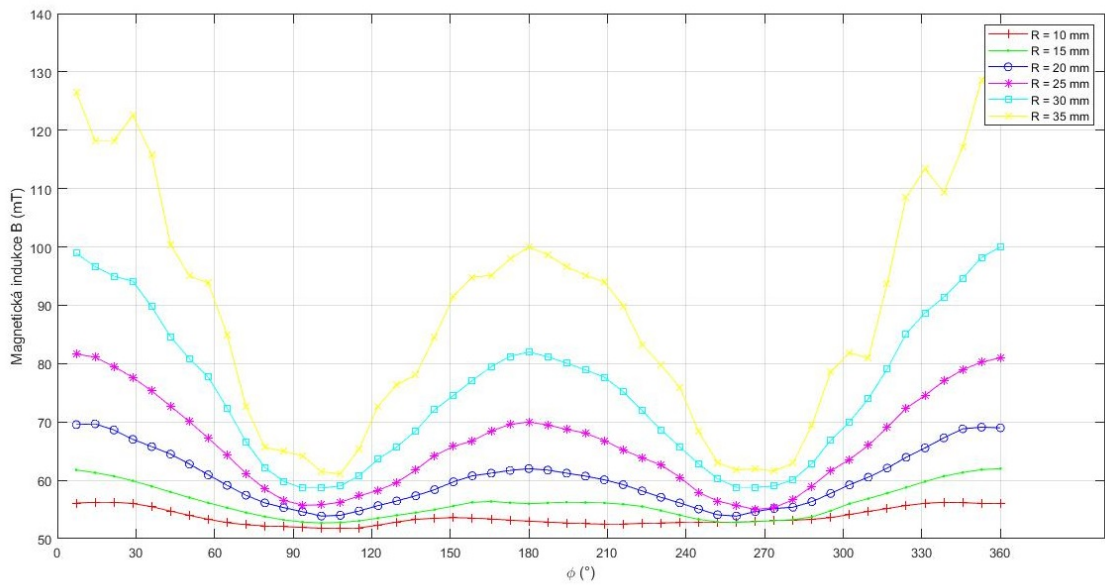
Na obrázku 4.8 je změřena složka indukce ve směru, který je směrodatný pro výpočet průtoku (kolmý na spojnici elektrod) a je zde především patrné, že soustava není úplně dokonalá. Grafy  $0^\circ$  a  $180^\circ$  by se měly překrývat. Stejně tak úhly  $135^\circ$ ,  $225^\circ$  atd. Příčin nedokonalosti je několik. Byly navrženy příliš velké vůle v uložení magnetů a ty se tak pod silným polem mírně natočily. Později byla vůle zmenšena tenkou folií. Druhým důvodem by mohla být odchylka natočení souřadného systému přípravku a soustavy magnetů. Nicméně ve středu je indukce o velikosti 52 mT a v hlavní ose ( $90^\circ$  a  $270^\circ$ ) indukce téměř konstantní. Oproti předchozí soustavě se jedná o třetinu, což není špatný výsledek s ohledem na menší počet magnetů a celkově velké finanční úspore. Rozdíl vůči simulaci činí zhruba 0,5 mT a je způsoben přesností parametru magnetizace a chybou měření.

Pokud se porovná magnetické pole generované pouhými dvěma magnety, dochází k navýšení magnetické indukce. Pole je také značně homogennější, což je velmi důležité. Bude tak umožněno naindukovat větší napětí na elektrodách.



Obrázek 4.8: Měření hlavního pole – graf 1

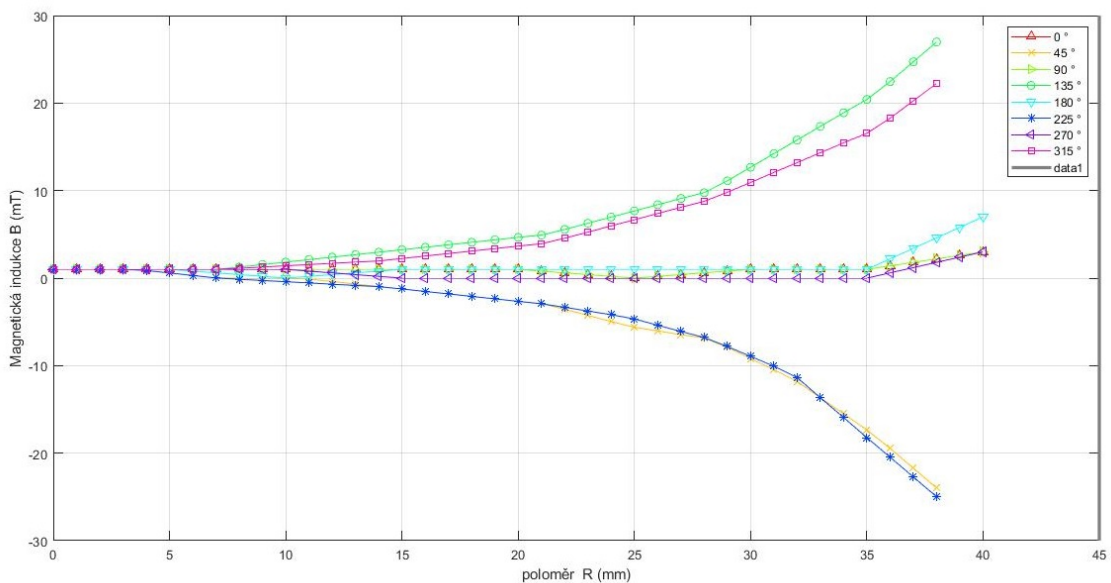
Obrázek 4.9 je graf znázorňující velikost indukce na úhlu při konstantním průměru. Čím menší průměr, tím jsou hodnoty méně zvlněné. Dále je už příliš ovlivňováno jednotlivými magnety.



Obrázek 4.9: Měření hlavního pole – graf 2

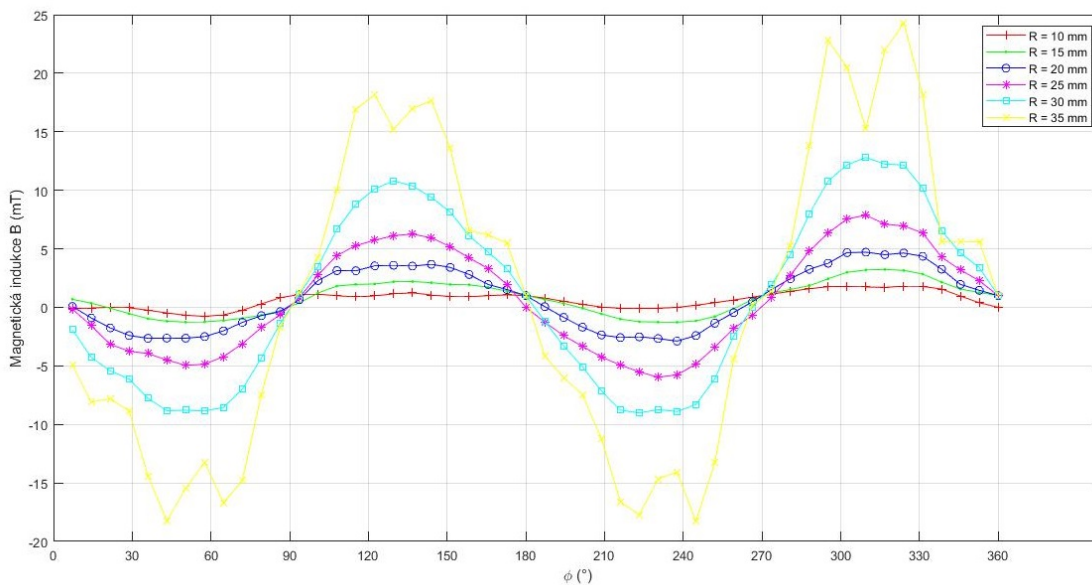
Na grafu (obrázek 4.10) je složka indukce, která se pro výpočet průtoku neuplatní (rovnoběžný se spojnicí elektrod). Souřadné systémy byly seřizeny téměř přesně. Lze

tak usuzovat z toho, že se hodnoty pro  $45^\circ$ ,  $225^\circ$  a pro  $135^\circ$  a  $315^\circ$  téměř překrývají. Indukce v ose kolmé na hlavní osu elektrod je zase téměř nulová.



Obrázek 4.10: Měření vedlejšího pole – graf 1

Pro graf na obrázku 4.11 platí totéž co pro graf na obrázku 4.9, pouze hodnoty indukce jsou menší. Taktéž se jedná o složku indukce která se pro výpočet neuplatňuje.



Obrázek 4.11: Měření vedlejšího pole – graf 2

## 5 Vliv typu proudění

### 5.1 Model průtokoměru s uplatněním typu proudění

Následně byl přidán druhý modul Physics – Turbulent flow. Otázkou je, zda použít model laminárního, nebo turbulentního proudění. Výpočty (5.1) a (5.2) intervalu hranice mezi laminárním a turbulentním prouděním dokazují, že při běžných průtocích bude uvnitř potrubí proudění turbulentní. Reynoldsovo číslo pro vodu a použité potrubí se nachází na intervalu mezi 1000 a 2000. Proto i hranice mezi prouděními je interval. Přesná hodnota by se získávala složitě. Její znalost je navíc naprosto zbytečná, jelikož hranice leží o několik řádů níže než jsou průtoky, které hodláme používat. Pro výpočet je nutné znát tyto veličiny:

$$\begin{aligned}R &= < 1000; 2000 > \\ \rho &= 997 \text{ kg} \cdot \text{m}^3 \\ \eta &= 1,002 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s} \\ d &= 0,04 \text{ m}\end{aligned}$$

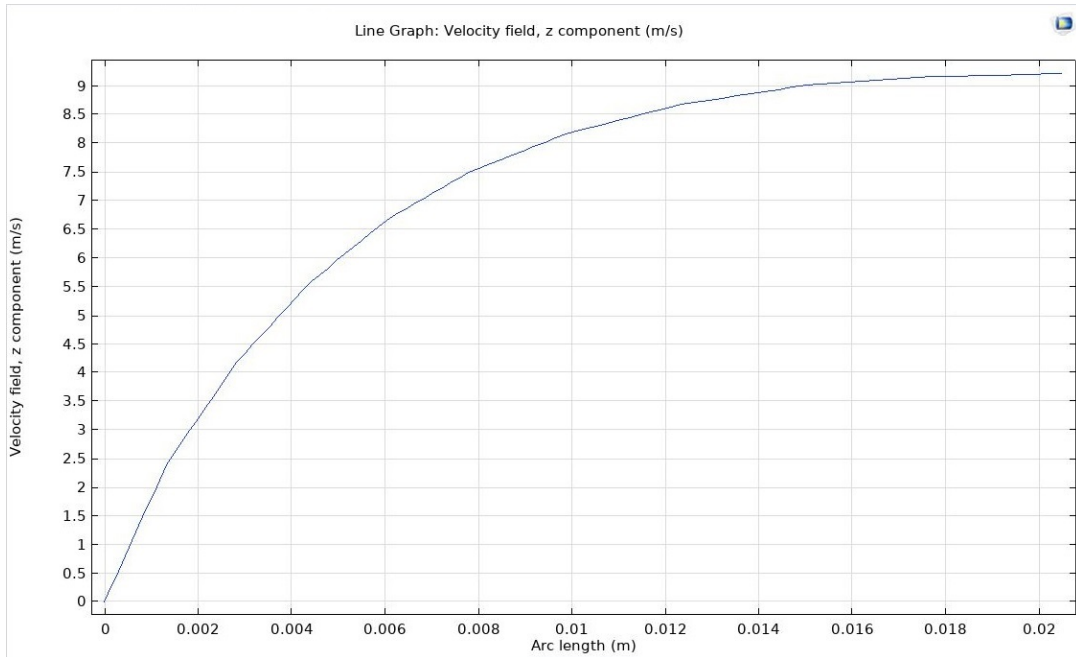
$$R = \frac{\rho \cdot d \cdot v}{\eta} \quad (5.1)$$

$$v = \frac{R \cdot \eta}{\rho \cdot d} = \frac{R \cdot 1,002 \cdot 10^{-3}}{997 \cdot 0,04} = < 0,025; 0,05 > \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.2)$$

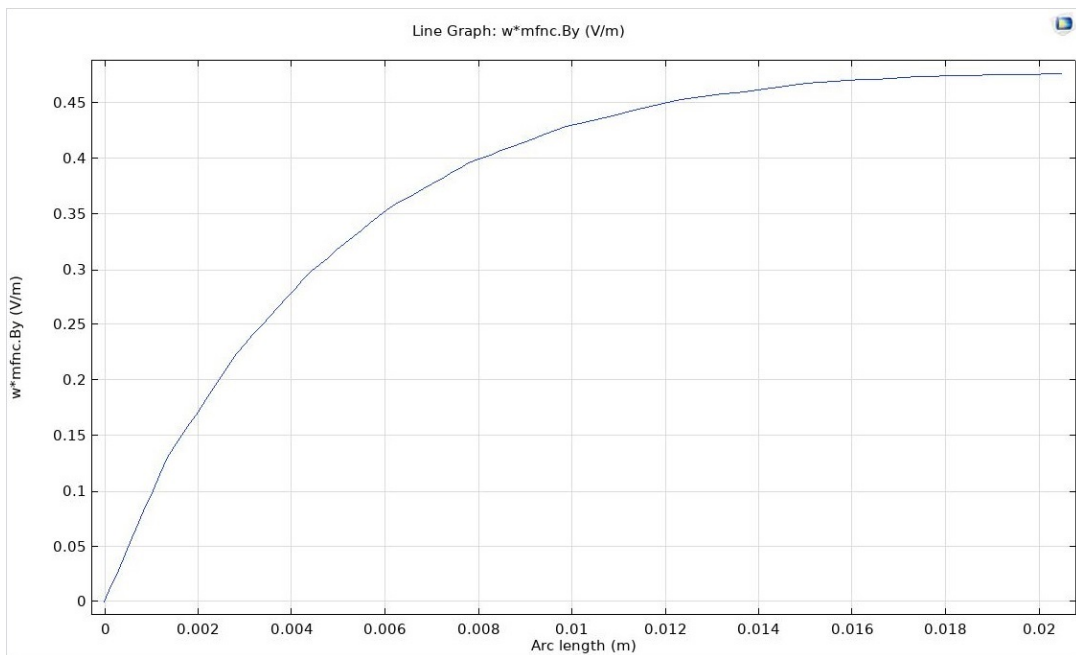
Nastavení Turbulent flow v Comsolu není náročné. Zvolena byla rychlost proudění v trubici na 6 m/s ve směru osy Z, vstupní tlak 2 bar a zanedbatelně malá tlaková ztráta. Pro rychlé a efektivní vypočtení studie je nutné přidat druhý stacionární krok. Oba moduly Physics se tak nejprve propočítají zvlášť a poté se spočítají jejich vzájemné vlivy v místech, kde se prolínají, tedy pouze uvnitř teflonu. Model průtokoměru je již hotový a další práce budou probíhat pouze v postprocessingu.

### 5.2 Výsledky

Intenzita ve středu průtokoměru je 0,48 V/m podle vzorce (1.2). Figuruje v něm rychlost proudění v ose Z (obrázek 5.1) a složka magnetické indukce v ose Y (obrázek 4.3). Jedná se spíše o mezivýsledek. Pro srovnání, s jedním párem magnetů bylo dosaženo pouhých 0,23 V/m. To vypovídá i o větší homogenitě pole.



Obrázek 5.1: Graf Z složky rychlosti proudění v rovině hlavních elektrod od stěny do středu (20 mm)



Obrázek 5.2: Graf intenzity elektrického pole v rovině hlavních elektrod od stěny do středu (20 mm), jako součin Z složky rychlosti proudění a Y složky magnetického pole



## 5.3 Elektrické napětí indukované na elektrodách

Z odsimulovaných hodnot napětí na elektrodách je patrné, že napětí s průtokem roste podle vzorce (1.4).

Tabulka 5.1: Tabulka odsimulovaných hodnot napětí na elektrodách v závislosti na rychlosti proudění pro DN40

Rychlost proudění [m/s]	U1 [mV]	U2 [mV]
0 – 0,0001	$1,41 \cdot 10^{-4}$	$-1,19 \cdot 10^{-8}$
0 – 2	2,58	$-1,91 \cdot 10^{-4}$
0 – 4	5,15	$-3,82 \cdot 10^{-4}$
0 – 6	7,72	$-5,74 \cdot 10^{-4}$
0 – 8	10,30	$-7,65 \cdot 10^{-4}$
0 – 10	12,88	$-9,56 \cdot 10^{-4}$

U1 – napětí hlavního páru elektrod

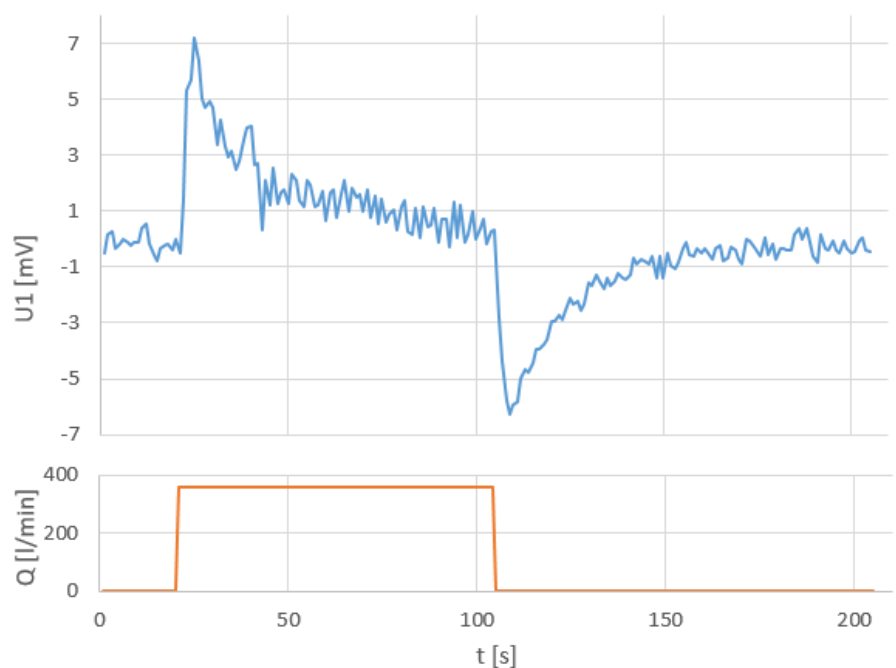
U2 – napětí vedlejšího páru elektrod

Napětí na hlavním páru elektrod je výrazně větší proto, že jejich osa je kolmá na celkové magnetické pole Halbachovy soustavy. Teoretický předpoklad říká, že se na obou párech elektrod bude uplatňovat stejné rušení, ale užitečný signál pouze na ty hlavní. Pokud tedy známe žádaný signál s parazitním signálem a parazitní signál samotný, lze se parazitního signálu zbavit odečtením napětí na vedlejších elektrodách od napětí hlavních elektrod.

## 6 Realizace v laboratoři

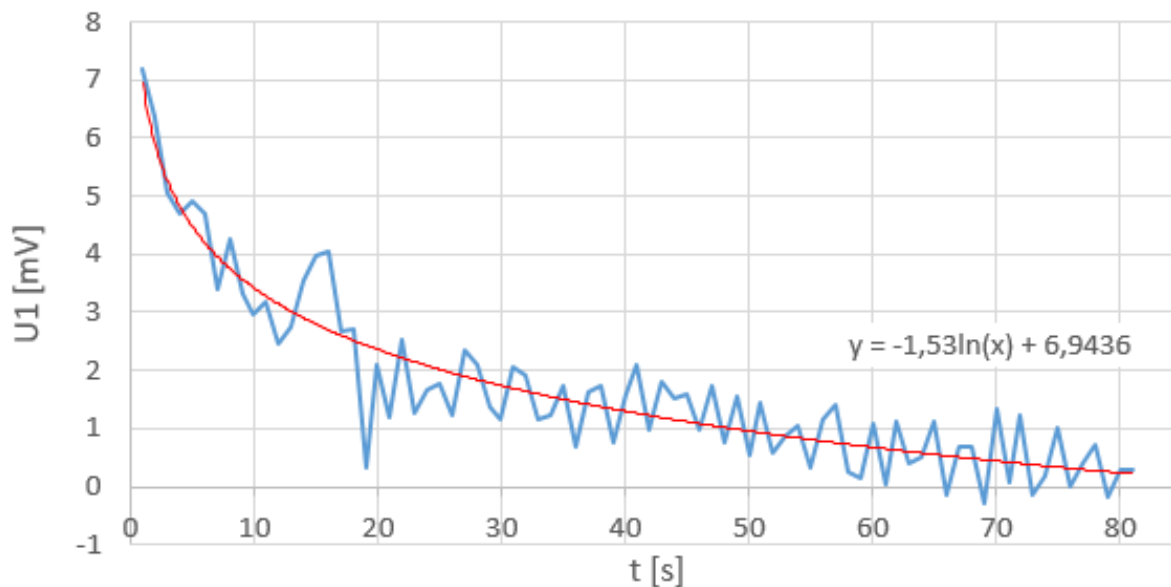
### 6.1 Zprovoznění

K zapojení byla použita průtokoměrná linka v laboratoři FM a měřicí ústředna Keithley 3706. Nebylo možné měřit s DN40, ale pouze s DN32. Halbachova soustava je pro menší průtokoměr použitelná. Jelikož je průtok čidlem stále stejný bez ohledu na jeho průměr, mění se rychlost proudění tekutiny. Tím vzniká jiná intenzita elektrického pole i napětí na elektrodách. Napětí je však možné ze znalosti obou průměrů přepočítat. Dále se neměřilo parazitní napětí kvůli absenci druhého páru pomocných elektrod. Měření bylo zprovozněno s nerezovými elektrodami a Halbachovou soustavou. Vzorkovací perioda je 1 s. Na grafu (obrázek 6.1) je patrné, že napětí na elektrodách opravdu na průtok reaguje. Oproti předpokladu i simulacím se napětí na elektrodách neustálí na úrovni odpovídající průtoku, ale reaguje jen na změny a pak postupně klesá téměř k nule.

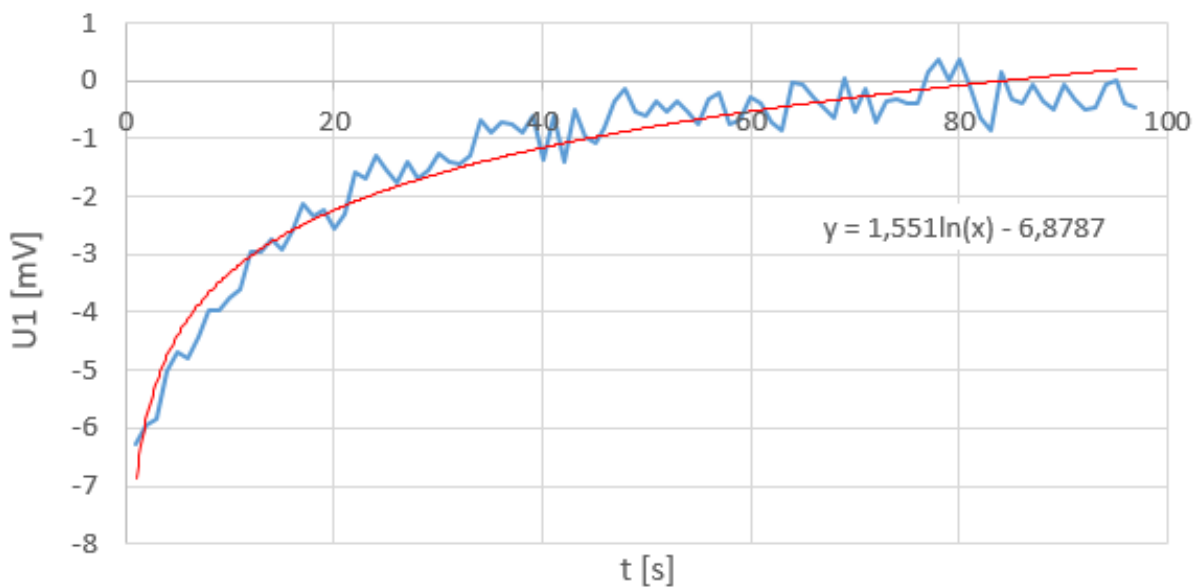


Obrázek 6.1: Graf závislosti napětí na nerezových elektrodách při skokové změně průtoku z 0 na 360 l/min (čidlo DN32)

Regresní křivka naznačila, že se jedná o exponenciální pokles, což v praxi představuje existenci kondenzátoru v náhradním obvodu. Je zřejmé, že na kontaktu elektroda – voda se vytváří vlivem elektrochemických jevů kondenzátor nezanedbatelné velikosti, který stejnosměrné měření znemožňuje. Přesné definování náhradního obvodu bude tématem dalšího zkoumání problematiky.

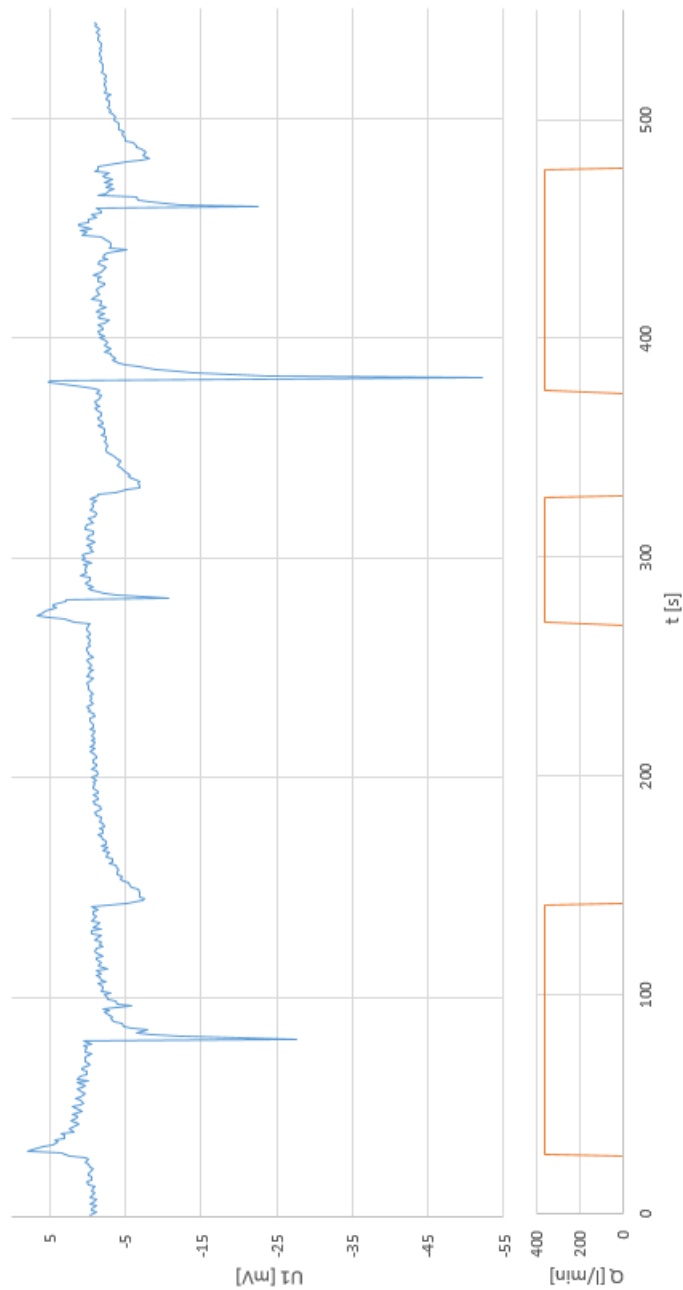


Obrázek 6.2: Graf průběhu napětí reprezentující vybíjení kondenzátoru – část grafu obrázku 6.1



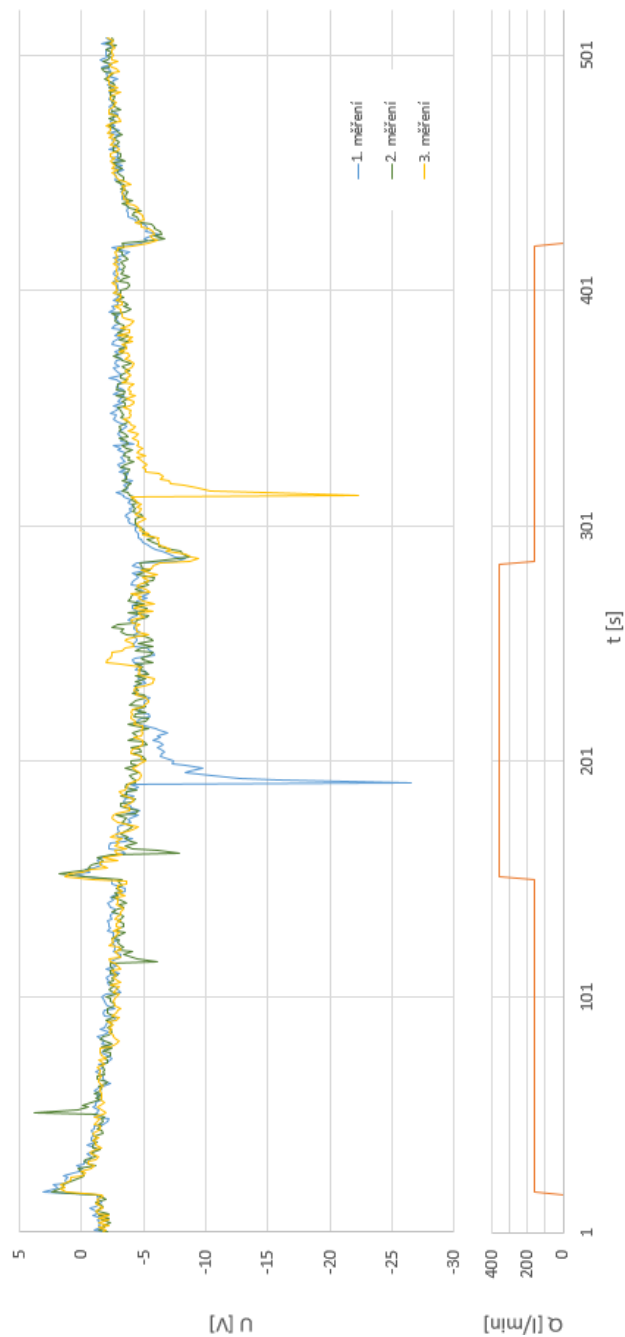
Obrázek 6.3: Graf průběhu napětí reprezentující nabíjení kondenzátoru – část grafu obrázku 6.1

U druhého měření (obrázek 6.4) s Halbachovou soustavou se projevilo rušení v podobě pulzů, které výrazně narušily průběh signálu a trvalo několik sekund, než se signál vrátil k původnímu průběhu. Hodnoty napětí se limitně ustalovaly na stejných hodnotách. Na tomto grafu je vidět stejná velikost napětí pro různé průtoky po ustálení. Je patrné, že se tento typ průtokoměru bude hodit převážně pro sledování stále se měnících průtoků s velkými změnami.



Obrázek 6.4: Graf závislosti napětí na nerezových elektrodách při skokových změnách průtoku 0 – 360 – 0  $l/min$  (čidlo DN32) s výskytem parazitních pulzů

Pro stálost měření mi bylo doporučeno stejnou sekvenci průtoků zopakovat vícekrát po sobě (obrázek 6.5). Bohužel se opět objevily nežádoucí impulsy. Tento problém se podařilo vyřešit lepším uzemněním obvodu a odvzdušněním potrubí. Měření je ale stále a opakovatelnost dobrá. Kromě impulsů a rušení není měřený signál ničím jiným ovlivňován.



Obrázek 6.5: Graf závislosti napětí na nerezových elektrodách při skokových změnách průtoků 0 – 160 – 360 – 160 – 0 l/min (čidlo DN32) – opakovaná měření

## 6.2 Vliv různých materiálů elektrod na naměřené napětí

Tato podkapitola navazuje na můj ročníkový projekt [4]. Aby bylo možné porovnávat hodnoty ze simulace s naměřenými hodnotami, je nutné nejprve provést přepočty z DN40 na DN32. Ze znalosti poloměru průtokoměru  $r$  je možné vypočítat průřez průtokoměru  $S$  (6.1). Dále, po dosazení do vzorce (6.2) ze známého průtoku  $Q_v$  a průřezu  $S$ , vypočteme rychlost proudění. Přepočty z l/min na m/s je proveden se zanedbáním stlačitelnosti kapaliny. Pro přepočty rychlosti proudění byl použit vzorec (6.3), pro přepočty napětí z poměru poloměrů trubic byl použit vzorec (6.4). Přepočty využívají úměrnosti rychlosti tekutiny a napětí na elektrodách při stejném průtoku. Tyto vzorce byly použity pro získání hodnot v tabulce 6.1.

Přepočty průtoku na rychlost proudění pro DN40:

$$S = \pi \cdot r^2 \quad (6.1)$$

$$v = \frac{Q_v}{S} \quad (6.2)$$

Přepočty rychlosti proudění z DN40 na DN32:

$$v_{32} = v_{40} \cdot \left(\frac{r_{40}^2}{r_{32}^2}\right) \quad (6.3)$$

Přepočty napětí z DN40 na DN32:

$$U_{132} = U_{140} \cdot \left(\frac{r_{40}}{r_{32}}\right) \quad (6.4)$$

Tabulka 6.1: Odsimulované hodnoty napětí na hlavním páru elektrod v závislosti na velikosti průtoku u DN40, přepočty pro DN32 (tlak 2 bar, teplota 25 °C)

průtok [l/min]	DN40		DN32	
	v [m/s]	U1 [mV]	v [m/s]	U1 [mV]
0 – 160	2,1167	2,7339	3,3073	3,4174
160 – 360	4,7619	3,4183	7,4405	4,2729

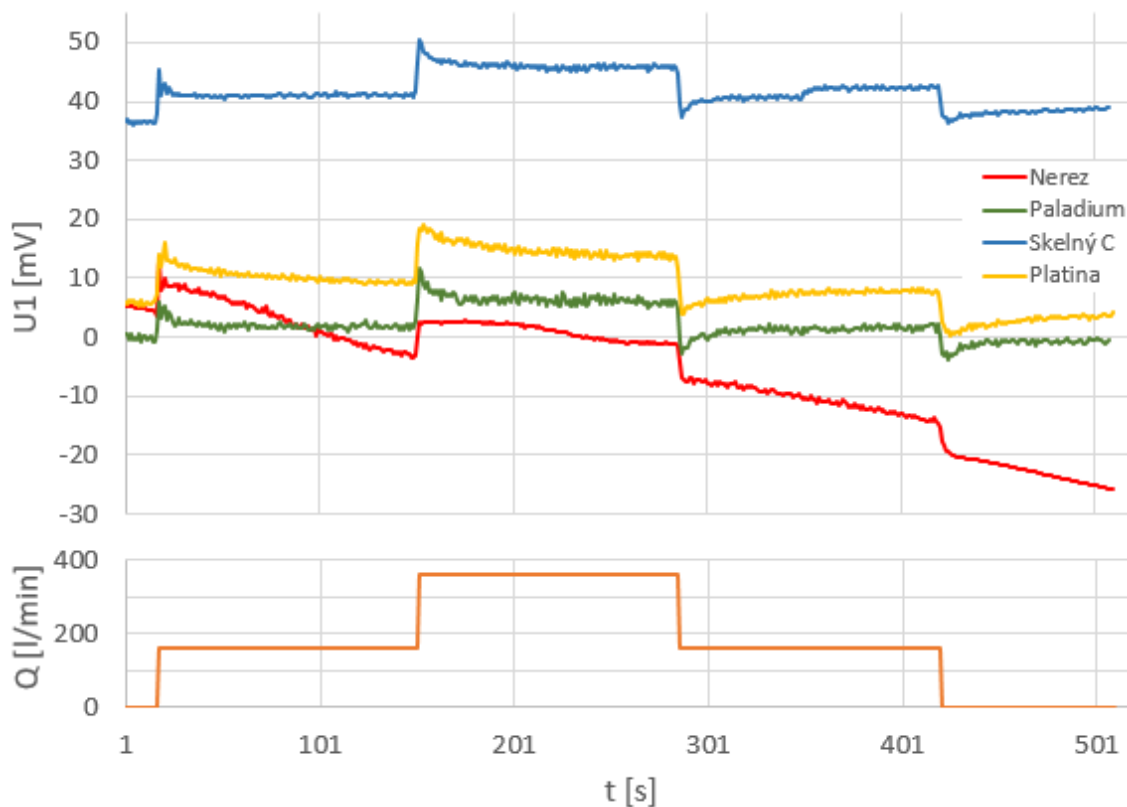
V tabulce 6.1 byl potvrzen předpoklad o přepočtu veličin z DN40 na DN32. Pokud máme stejný objemový průtok  $Q_v$ , rychlost proudění  $v$  v potrubí s menším průřezem  $S$  bude větší a tím se na elektrodách naindukují i větší napětí  $U$ . Hodnoty průtoku byly vybrány záměrně, aby bylo možné porovnání s naměřenými hodnotami. Pro průtok 160 l/min bylo pomocí Comsolu a přepočtu pro DN32 zjištěno napětí 3,42 mV, pro 360 l/min 4,27 mV. Kvůli absenci chemických vazeb mezi tekutinou a elektrodou je jedno, se kterými náměry se simulované napětí porovnají. I kdyby byl změněn v simulaci materiál, napětí vyjde totožné.

Následuje měření za účelem porovnání s hodnotami ze simulace.



Obrázek 6.6: Průtokoměry DN32 v sérii

Z grafu na obrázku 6.7 můžeme odečíst hodnoty skoků, najdeme je v tabulce 6.2. Elektrody jsou z nerez, palladia, skelného karbonu a platiny. Pro porovnatelné výsledky bylo zapotřebí všechny náměry provést krátce po sobě. Do série je však možné zařadit maximálně tři čidla a měření tak mělo dvě části. V první pro palladium, skelný uhlík a platinu, ve druhé pro nerez. Protože byl k dispozici pouze jeden prototyp Halbachovy soustavy, byly použity páry neodymových magnetů generující uprostřed indukci o velikosti 110 mT. Tato hodnota přibližně odpovídá teoretické hodnotě z modelu v Comsolu (obrázek 4.5) vynásobené koeficientem 1,25 – poměr průměrů DN40 a DN32 ze vzorce (6.4). Ty vytvářely silnější, ale méně homogenní pole. Dá se předpokládat, že napětí získané s jedním párem magnetů bude větší než napětí s Halbachovou soustavou nebo napětí ze simulace.



Obrázek 6.7: Graf závislosti napětí na elektrodách různých materiálu při skokových změnách průtoku 0 – 160 – 360 – 160 – 0 l/min (čidlo DN32)

Tabulka 6.2: Naměřené hodnoty změny napětí na hlavním páru elektrod v závislosti na změně velikosti průtoku u DN32 (tlak 2 bar, teplota 25 °C), s jedním párem magnetů. Poměr průtoků a napětí elektrod

průtok	uhlík	palladium	platina	nerez	simulace
[l/min]	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]	[mV]
0 – 160	7,3	6,8	7,4	5,5	3,42
160 – 360	8,6	9,7	9,1	6	4,27
průtok	uhlík	palladium	platina	nerez	simulace
1,25	1,18	1,43	1,23	1,09	1,25

Poměr změny napětí při skocích průtoku z 0 na 160 a ze 160 na 360 l/min koresponduje s poměrem napětí získaných ze simulace, což značí linearitu měření. Hodnoty napětí u simulace jsou menší, čímž byl potvrzený předpoklad z předchozího odstavce. Nejblíže této hodnotě je platina a skelný uhlík, dále palladium a nerez. Nerez je ale kvůli neschopnosti ustálit se nepoužitelný. V bakalářské práci se vkládaly velké naděje právě do skelného uhlíku. Bohužel měření ukazuje, že elektrochemické vlivy není možné úplně odstranit. Nejvhodnější průběh pro měření průtoku vykazovalo čidlo s elektrodami ze skelného uhlíku a palladia. Výhodou palladia je ustálení



na přibližně stejných napěťových úrovních. Výhodou uhlíku zase nejmenší rozkmit hodnot patrný v grafu. Bude proto použit v dalším měření.

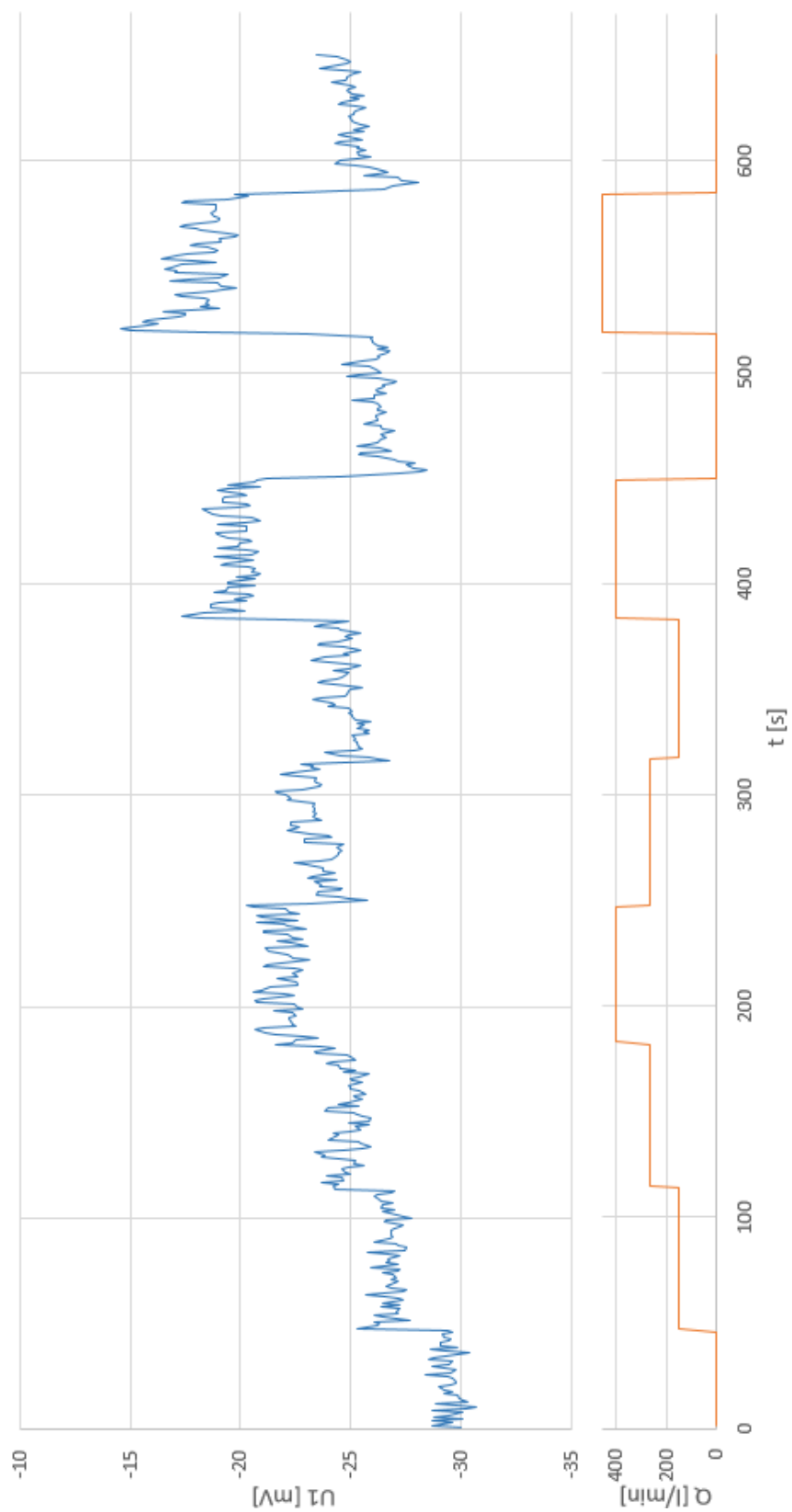
Jak bylo psáno v kapitole 3.3, použití Halbachovy soustavy umožní naindukovat větší napětí. Zde je ale vidět, v porovnání s grafem (obrázek 6.5), kde je stejný skok z 0 na 160 l/min se stejným materiálem elektrod – nerezem a Halbachovou soustavou, téměř nepozorovatelný rozdíl ve skoku napětí při změně průtoku a to zhruba 5 – 6 mV. Důvodem srovnatelných výsledků je větší hodnota indukce u páru magnetů díky nalepení přímo na čidlo. Oproti tomu má Halbachova soustava větší homogenost ale větší vzdálenost soustavy magnetů od středu čidla a tak i slabší pole. Vnější průměr u DN40, i u použité DN32 je 50 mm. Při použití magnetů o výšce 10 mm je vzdálenost jejich os 60 mm. Vzdálenost os magnetů u Halbachovy soustavy je 120 mm. Soustava těchto rozměrů byla zvolena kvůli univerzálnosti a možnosti přetažení přes příruby čidel.

### 6.3 Finální průtokoměrná trubice

Pro finální čidlo byly použity elektrody ze skelného karbonu a pro generování magnetického pole Halbachova soustava. Signál je na první pohled silně zarušený. V chování průtokoměru je kapacitní vazba, jejíž existence se předpokládá v náhradním schématu. Reaguje spolehlivě bohužel pouze na změnu průtoku. Reakce na průtok je relativně rychlá, ustálení však značně dlouhé. Dalším problémem je proměnná napěťová úroveň. V předchozím měření (obrázek 6.7) se signál z elektrod skelného uhlíku pohyboval kolem +40 mV. V tomto měření kolem –25 mV. Obě měření probíhala krátkou dobu po sobě ve stejných podmínkách. Výsledky z grafu (obrázek 6.8) jsou uvedeny v tabulce 6.3.

Tabulka 6.3: Porovnání hodnot změn napětí na hlavním páru elektrod v závislosti na změnách velikosti průtoku u DN32 (tlak 2 bar, teplota 25 °C) s elektrodami ze skelného karbonu. Odsimulované hodnoty z tabulky 6.2. Poměr průtoků a napětí elektrod

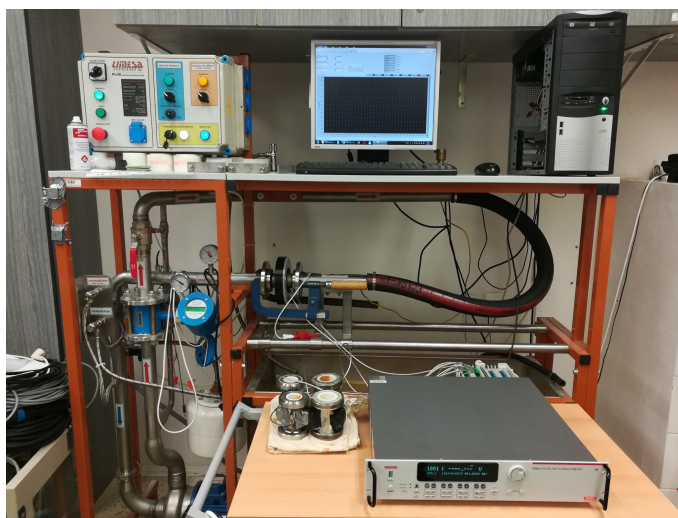
průtok [l/min]	simulace [mV]	obr. 6.7 – 2 magnety [mV]	obr. 6.8 Halb. soustava [mV]
0 – 160	3,42	7,3	4,3
160 – 360	4,27	8,6	–
160 – 270	–	–	6,6
průtok	simulace	obr. 6.7 – 2 magnety	obr. 6.8 Halb. soustava
1,25	1,25	1,18	–
1,55	–	–	1,53



Obrázek 6.8: Graf závislosti napětí na elektrodách ze skleného uhlíku při skokových změnách průtoku (čidlo DN32)

Při měření grafu (obrázek 6.8) byly značně zkráceny doby mezi jednotlivými skoky. Tato úprava byla provedena s ohledem na graf (obrázek 6.7) v kapitole 6.2. Průběh je značně zašumělý a nejsou dodrženy stejné napěťové úrovně u stejných průtoků. V měření se projevuje vliv předchozích skoků. V tabulce 6.3 je dle předpokladu patrná větší podobnost s teoretickým poměrem u měření s Halbachovou soustavou oproti měření s párem magnetů. Zde je potvrzena výhoda větší homogenosti.

V současné etapě vývoje je daný princip nepoužitelný pro měření průtoku. Bude nezbytné vymyslet doplňující princip pro úspěšné měření. Práce je i tak velkým přínosem a přiblížením k vyřešení problematiky. K omezení elektrochemických vlivů by mělo pomoci napětí měřené na druhém páru elektrod.



Obrázek 6.9: Zapojení měřicí linky



Obrázek 6.10: Finální prototyp průtokoměru s Halbachovou soustavou magnetů

## Závěr

V kapitole věnované teorii byly připomenuty pojmy, základní vztahy a vlastnosti magnetů včetně Halbachovy soustavy. Ve druhé kapitole byl v simulačním programu Comsol Multiphysics navržen model průtokoměru DN40 s kruhovou Halbachovou soustavou, kdy rozdíl směrů magnetizace dvou sousedních magnetů byl  $45^\circ$  a počet magnetů 16.

Magnetická indukce ve středu byla zhruba 150 mT a uvnitř celé trubice se vytvářelo homogenní pole. V porovnání se dvěma magnety proti sobě je pole téměř dvakrát silnější a také homogennější.

Z finančních a časových důvodů však nebylo možné tuto soustavu, se speciálním tvarem magnetů, realizovat. Byla proto navržena vlastní Halbachova soustava složená z dvanácti magnetů tvaru krychle, které jsou běžně dostupné. Výsledné pole bylo o 35 % nižší než u pole se dvěma magnety proti sobě. Homogenita pole v ose elektrod byla ale nesrovnatelně lepší, což výrazně zvyšuje citlivost čidla. Napětí na elektrodách bylo získáno integrací elektrické intenzity v ose elektrod.

Po simulacích bylo sestaveno prototypové čidlo a provedeny kontrolní náměry. Bylo zjištěno, že průtokoměr reaguje jen na změnu průtoku, nikoliv na absolutní průtok. Na elektrodách totiž dochází k chemickým reakcím a vytváří se na nich velmi slabá vrstva izolantu. Programové vybavení softwaru Comsol Multiphysics na TUL bohužel neumožnilo tyto chemické jevy zohlednit.

Napětí na elektrodách reagovalo na skokovou změnu průtoku dle předpokladů a výsledný poměr naměřených napětí se od simulovaných napětí lišil o pouhých 7 %.

Dále byly porovnávány výsledky měření s různým materiálem elektrod (nerez, palladium, platina, skelný uhlík) a bylo zjištěno, že pro měření průtoku nejlépe vyhovují elektrody ze skelného uhlíku.

V současném stádiu vývoje není možné použít stávající řešení pro měření průtoku, ale byly položeny dobré základy pro další výzkum v této oblasti. Body zadání byly beze zbytku splněny, navíc byl vytipován optimální materiál elektrod (skelný uhlík), vhodný pro tuto metodu.

## Literatura

- [1] MAYER, Daniel. Nové možnosti magnetické levitace v dopravě? Odborné časopisy [online]. Pod Vodárenskou věží 1143/4, 182 00 Praha 8-Libeň: FCC Public, 2003, 12/2003 [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/nove-moznosti-magneticke-levitace-v-doprave-14291>
- [2] Brief Introduction of Halbach Array. Magnet-SDM [online]. [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <https://www.magnet-sdm.com/2018/10/30/halbach-array/>
- [3] JAROŠ, Jakub. Studium permanentních magnetů. Liberec, 2018. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci, FM. Vedoucí práce Ing. Lubomír Slavík, Ph.D.
- [4] JAROŠ, Jakub. Model chování kapaliny v elektromagnetickém poli. Liberec, 2019. Ročníkový projekt. Technická univerzita v Liberci, FM. Vedoucí práce Ing. Lubomír Slavík, Ph.D.
- [5] Halbach Array Magnets. MPCO Magnetic Products [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://www.mpcomagnetics.com/magnetic-components/halbach-array-magnets/>
- [6] MERIBOUT, Mahmoud & SONOWAN, Sunil. Optimal Halbach Magnet Array Design for Portable NMR Targeting Multiphase Flow Metering Applications [online]. [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8528523/metrics#metrics>
- [7] DVOŘÁK, Leoš. Magnetostatika: permanentní magnety a jejich pole. Praha, 2020. Prozatímní učební text. MFF UK Praha
- [8] DĚDEK, Libor a Jarmila DĚDKOVÁ. Elektromagnetismus. Vyd. 2. Brno: VUTUM, 2000. ISBN 80-214-1548-7.
- [9] PLÍVA, Zdeněk. Metodika zpracování bakalářských a diplomových prací [online]. [vid. 18.4.2018]. Dostupné z: <http://new.fm.tul.cz/files/Jak-psat-BP-DP.pdf>
- [10] SATRAPA, Pavel. Balík tul pro LATEX [online]. [vid. 18.4.2018]. Dostupné z: <http://www.nti.tul.cz/satrapa/vyuka/latex-tul>

# A Přílohy

## A.1 Obsah na CD

1. Diplomová práce
2. Simulační programy Comsol v5.5:
  - A. Model Halbachovy soustavy – úhel magnetizace  $22.5^\circ$
  - B. Model Halbachovy soustavy – úhel magnetizace  $45^\circ$
  - C. Model Halbachovy soustavy – úhel magnetizace  $90^\circ$
  - D. Model Halbachovy soustavy – finální
  - E. Import soubor s geometrií Halbachovy soustavy
  - F. Import soubor s geometrií finální Halbachovy soustavy
  - G. Návrh kompletního průtokoměru s Halbachovou soustavou
  - H. Návrh kompletního finálního průtokoměru s Halbachovou soustavou
3. 3D tisk data Halbach