

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická



# Elektroakustický měnič s lineárním motorem

Bakalářská práce

Studijní program: Elektronika a komunikace

Vedoucí práce: Dr. Ing. Libor Husník

*Lukáš Horník*

Praha



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Horník** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **495657**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávací katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**  
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Elektroakustický měnič s lineárním motorem**

Název bakalářské práce anglicky:

**Electroacoustic Transducer with a Linear Motor**

Pokyny pro vypracování:

Proveďte studii na téma buzení membrány reproduktoru lineárním motorem. Sestavte analytický a funkční model a ověřte jeho vlastnosti.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Cola, M. et al.: Subwoofer Design with Moving Magnet Linear Motor, 137th AES Convention Paper, Los Angeles, 2014
- [2] Škvor, Z.: Elektroakustika a akustika, Nakladatelství ČVUT 2012.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Dr. Ing. Libor Husník katedra radioelektroniky FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **07.02.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **20.05.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2023**

Dr. Ing. Libor Husník  
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Stanislav Vítek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta



## Prohlášení

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Reprodukční s lineárním motorem jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Praha 19. května 2022

Lukáš Horník



## Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Dr. Ing. Liboru Husníkovi za všestrannou pomoc, množství cenných a inspirativních připomínek, doporučených materiálů a za veliké nadšení při měřeních a konzultacích poskytnutých ke zpracování této práce. Také bych rád poděkoval kolegům profesorům z katedry elektromagnetického pole pánům doc. Ing. Vítězslavu Pankráci, CSc. a prof. Ing. Zbyňku Škvorovi, CSc. za věcné připomínky k řešené problematice.





# Abstrakt

Předložená práce se zabývá možností využití lineárního motoru jako pohonu pro elektroakustický měnič. Teoretický úvod práce popisuje základní vlastnosti elektroakustických měničů a lineárních motorů a jejich využití pro elektroakustický měnič. Z teoretických poznatků je následně vytvořen analytický návrh lineárního motoru, který je v rámci dalších částí práce zkonstruován do provozuschopného výrobku. Motor se stává ze dvou oválných cívek v axiální symetrii a dvou permanentních neodymových magnetů umístěných mezi cívkami. Následující část práce se zabývá měřením základních elektromagnetických a akustických parametrů vyrobeného elektroakustického měniče. U měření je detailně popsán teoretický základ a postup práce. Z výsledků měření bylo vyvozeno, že princip lineárního motoru pro elektroakustický měnič má určité, v práci popsané, výhody oproti konvenčním řešením a je vhodným kandidátem pro častější využití v oblasti akustických aplikací.

# Abstract

The presented work deals with the possibility of using a linear motor as a drive for an electroacoustic transducer. The theoretical introduction describes the basic properties of electroacoustic transducers and linear motors and their use for electroacoustic transducer. An analytical design of a linear motor is created from theoretical knowledge, which is constructed into a functional product. The motor consists of two oval coils in axial symmetry and two permanent neodymium magnets placed between the coils. The following part deals with the measurement of basic electromagnetic and acoustic parameters of the manufactured electroacoustic transducer. The theoretical basis and procedure of the measurement are described in detail. It was deduced from the measurement results that the principle of a linear motor for an electroacoustic transducer has certain advantages described in the work compared to conventional solutions and is a suitable candidate for more frequent use in the field of acoustic applications.

## **Klíčová slova**

Elektroakustický měnič, lineární motor, 3D model, konstrukce, impedance, akustický tlak

## **Keywords**

Electroacoustic transducer, linear motor, 3D model, construction, impedance, sound pressure

## Seznam použitých zkratek

<b>AES</b>	odborná společnost věnující se výhradně audio technice (z angl. <i>Audio Engineering Society</i> )
<b>CNC</b>	stroje řízené počítačem (z angl. <i>Computer Numerical Control</i> )
<b>EMS</b>	elektromagnetická simulace (z ang. <i>Electromagnetic Simulation</i> )
<b>IC</b>	železné jádro (z angl. <i>Iron Core</i> )
<b>IL</b>	bez železného jádra (z angl. <i>Ironless</i> )
<b>PET-G</b>	polyethylentereftalát glykol (z angl. <i>Polyethylene Terephthalate Glycol</i> )
<b>PM</b>	permanentní mangety (z angl. <i>Permanent Magnet</i> )
<b>STL</b>	stereolitografie

## Seznam obrázků

1	Elektrodynamický reproduktor Rice-Kellogg, 1924 [6] . . . . .	18
2	Elektrodynamický reproduktor [7] . . . . .	19
3	Rotační motor rozložený v rovině [8] . . . . .	19
4	Lineární motor . . . . .	20
5	Rozdělení lineárních motorů [10] . . . . .	21
6	Lineární motor pro reproduktor. . . . .	22
7	Struktura motoru [3] . . . . .	23
8	Řez motorem . . . . .	25
9	Hustota magnetického toku, 0 A s vloženými magnety . . . . .	25
10	Hustota magnetického toku, 28 A bez magnetů. . . . .	26
11	Hustota magnetického toku, 28 A s vloženými magnety. . . . .	26
12	Hustota síly působící na magnety mezi cívkami, 28 A . . . . .	26
13	Magnet [17] . . . . .	30
14	Rozložení magnetů, jejich vychýlená poloha a velikost cívky (mm) . .	31
15	3D model sekundární části . . . . .	32
16	3D model primární části verze první . . . . .	32
17	3D model primární části verze druhá . . . . .	33
18	3D model celé konstrukce . . . . .	33
19	Ukázka tisku sekundární části v programu PrusaSlicer . . . . .	34
20	3D vytisknutý model sekundárního dílu společně se středícím mecha- nismem . . . . .	35
21	3D vytisknutý model primárního dílu s navinutými cívkami zalité epoxidem . . . . .	35
22	3D vytisknutý primární i sekundární díl . . . . .	36
23	Zkonstruovaný měnič s membránou - 1. . . . .	37
24	Zkonstruovaný měnič s membránou - 2. . . . .	38
25	Zkonstruovaný měnič s membránou - 3. . . . .	38
26	Zkonstruovaný měnič s membránou - 4. . . . .	38
27	Měření cívek na můstku - Schéma zapojení . . . . .	39
28	Měření cívek na můstku - Graf . . . . .	40
29	Měření cívek na můstku - Fotografie . . . . .	40
30	Měření impedance motoru bez membrány - Schéma zapojení . . . . .	41
31	Měření impedance motoru bez membrány - Graf . . . . .	42

32	Měření impedance motoru bez membrány - Fotografie . . . . .	42
33	Výchylka motoru - Schéma zapojení . . . . .	43
34	Zrychlení sekundárního dílu - Graf . . . . .	44
35	Maximální výchylka sekundárního dílu - Graf . . . . .	45
36	Nábojový zesilovač - Fotografie . . . . .	45
37	Měření zrychlení - Fotografie . . . . .	45
38	Ukázka simulace elektromagnetického pole v programu Autodesk In- ventor a modulu EMS . . . . .	46
39	Rozložení magnetické hustoty v řezu - Graf . . . . .	47
40	Hustota magnetického pole v řezu - Graf . . . . .	47
41	Čáry hustoty magnetického pole probíhající magnety - Graf . . . . .	48
42	Ukázka simulace elektromagnetického pole v programu Autodesk In- ventor a modulu EMS . . . . .	48
43	Měření impedance motoru s membránou - Schéma zapojení . . . . .	49
44	Impedance měniče s membránou - Graf . . . . .	50
45	Posun rezonančního kmitočtu - Graf . . . . .	51
46	Přidaná zátěž na membránu - Fotografie . . . . .	52
47	Průběh $Re$ a $Im$ složky vyzářovací impedance kmitající membrány - Graf, upraveno z [23] . . . . .	53
48	Měření akustického tlaku v blízkém poli - Schéma zapojení . . . . .	54
49	Hladiny akus. tlaku v blízkém poli, vzdáleném poli a char. citlivost při 1 W - Graf . . . . .	56
50	Měření v blízkém poli - Fotografie . . . . .	56
51	Měřicí zesilovač mikrofону - Fotografie . . . . .	56

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>Teoretický úvod</b>	<b>18</b>
2.1	Měniče v elektroakustice . . . . .	18
2.1.1	Elektrodynamické měniče . . . . .	18
2.2	Lineární motory . . . . .	19
2.2.1	Princip . . . . .	19
2.2.2	Vlastnosti . . . . .	20
2.2.3	Rozdělení . . . . .	21
2.3	Lineární motor pro elektroakustický měnič . . . . .	22
2.3.1	Struktura . . . . .	23
2.4	Princip . . . . .	25
2.5	Vlastnosti . . . . .	27
<b>3</b>	<b>Konstrukce</b>	<b>29</b>
3.1	Návrh . . . . .	29
3.1.1	Magnety . . . . .	29
3.1.2	Výpočet výchylky a středící mechanismus . . . . .	30
3.1.3	Výpočet drátu . . . . .	30
3.1.4	3D model . . . . .	32
3.2	Výroba . . . . .	33
3.2.1	3D tisk . . . . .	34
3.2.2	Cívky . . . . .	35
3.2.3	Membrána . . . . .	36
3.3	Montáž a první pokusy . . . . .	36
<b>4</b>	<b>Měření</b>	<b>39</b>
4.1	Měření samotného motoru . . . . .	39
4.1.1	Impedance a indukčnost cívek na můstku . . . . .	39
4.1.2	Měření impedance pomocí dvou voltmetrů . . . . .	41
4.1.3	Výchylka motoru pomocí akcelerometru . . . . .	42
4.1.4	Simulace elektromagnetického pole motoru pomocí softwaru . . . . .	45

4.2	Měření motoru s membránou . . . . .	49
4.2.1	Měření impedance pomocí dvou voltmetrů . . . . .	49
4.2.2	Hledání rezonance pomocí zátěže přidané na membránu . . . . .	50
4.2.3	Akustický tlak v oblasti nízkých kmitočtů . . . . .	52
<b>5</b>	<b>Závěr</b>	<b>57</b>
	<b>Literatura</b>	<b>59</b>





---

# 1 Úvod

Reproduktor je elektroakustický prvek, který je spolu s jinými prvky (jako např. mikrofony, akceleračními snímači a řadou dalších) řazen pod vědní obor elektroakustika. Elektroakustika spojuje akustiku s některými elektrotechnickými disciplínami, které pomáhají popisovat jevy, které se dějí v důsledku chování elektroakustických prvků. Elektrodynamický reproduktor, jako jeden nejvýznamnější z těchto prvků, je založen na principu známém bez mála sto let a za tu dobu se přístup k němu víceméně nezměnil. Konkrétně u nízkokmitočtových měničů si můžeme všimnout jakési limitace parametrů z důvodu fyzikálních jevů. S příchodem výkonnějších koncových audio zesilovačů a silnějších neodymových magnetů, nastala možnost vytvořit nový princip pohonu reproduktorů a plně tak využít potenciál současné doby.

O první článek se zasloužil Claudio Lastrucci<sup>1</sup>, když v roce 2014 představil dokument na konvenci AES (z angl. *Audio Engineering Society* - odborná společnost věnující se výhradně audio technice) s názvem "*Nový lineární motor s pohyblivým magnetem*" [1]. Následný vývoj lineárního motoru přinesl zrod nového patentu, ve kterém je popisován lineární motor jako pohon pro reproduktor [2]. Z těchto dokumentů vznikla i idea na vypracování a konstrukci této bakalářské práce. Výše uvedené dokumenty slouží jako inspirace k čerpání základní konstrukční úpravy lineárního motoru. Samotná bakalářská práce poté přichází s vlastním přístupem k jeho realizování.

Tato bakalářská práce seznamuje čtenáře s novou technologií využití lineárního motoru jako pohonu pro reproduktor. Popisuje základní vlastnosti elektrodynamických reproduktorů a lineárních motorů a z vybraných informací vytváří 3D model, který slouží jako návrh konstrukčního řešení pro sestavení lineárního motoru. Následné měření sestaveného měniče popisuje jeho opravdové chování, které je porovnáváno s předpoklady.

---

<sup>1</sup>Claudio Lastrucci je spoluzakladatel italské firmy Powersoft, kde od roku 1995 působí jako ředitel výzkumu a vývoje [3].

---

## 2 Teoretický úvod

### 2.1 Měníče v elektroakustice

Měníče jsou zařízení, která uskutečňují přeměnu signálových veličin jednoho druhu na signálové veličiny jiného druhu. V akustice a elektroakustice jsou nejběžnějšími měniči měniče elektroakustické, které přeměňují elektrické napětí a proud na akustický tlak a objemovou rychlost (ale i naopak). Elektroakustické měniče lze rozdělit do dvou skupin. První skupinu zastupují měniče využívající elektrické pole - do této skupiny se řadí měniče elektrostatické a piezoelektrické. V druhé skupině jsou měniče využívající magnetického pole a řadíme do ní měniče elektrodynamické, elektromagnetické a magnetostrikční [4]. Elektroakustický měnič s lineárním motorem, který je předmětem této práce, se řadí do skupiny elektrodynamických měničů.

#### 2.1.1 Elektrodynamické měniče

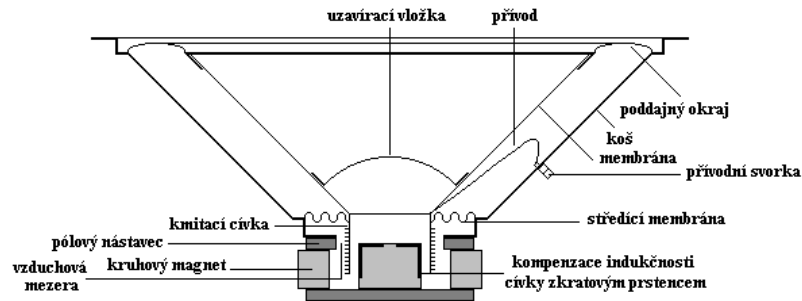
Elektrodynamický měnič je nerozšířenějším měničem z pohledu počtu aplikací. Tímto vynálezem (obrázek 1) se proslavili dva inženýři General Electric Ch. W. Rice a E.W. Kellogg, když v září roku 1925 publikovali článek ve vydání AIEE Transactions, ve kterém popisují to, co dnes považujeme za kořeny moderní technologie reproduktorů [5].

V běžném provedení sestává elektronický měnič zpravidla z cívky uložené ve vzduchové mezeře permanentního magnetu. Cívka je dále spojena s membránou, na niž se kmitavý pohyb cívky přenáší. V opačném režimu přenáší membrána kmitavý pohyb na cívku. Magnetický obvod je složen z permanentního kruhového magnetu a



Obrázek 1: Elektrodynamický reproduktor Rice-Kellogg, 1924 [6]

pólových nástavců. Ve vzduchové mezeře, v níž působí v radiálním směru magnetické pole, je uložena cívka spojená s membránou pomocí kruhového nástavce na kterém je namotána a zalita epoxidovým roztokem [4]. Příklad takového měniče můžeme vidět na obr 2.



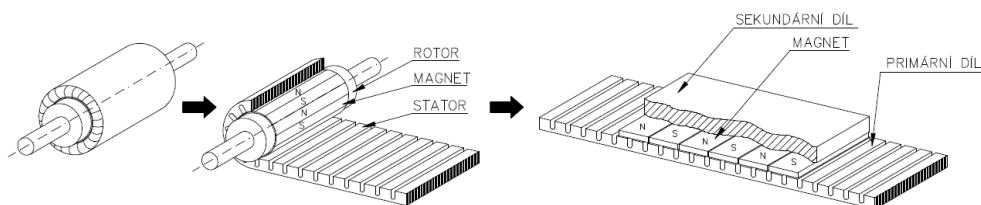
Obrázek 2: Elektrodynamický reproduktor [7]

## 2.2 Lineární motory

Princip lineárního motoru je znám stejně dlouho jako princip rotačních motorů. Lineární motor se stejně jako rotační motor skládá z rotoru (pohyblivá část) a statoru (nepohyblivá část). Poslední dobou prochází trh se součástkami, které jsou kriticky důležité pro konstrukci motoru, velkým rozmachem. Je to dáno díky rozvoji průmyslu 4.0, lepší dostupností vzácných zemin na výrobu permanentních magnetů a myšlenkou automatizace [8]. Vzhledem k zaměření této bakalářské práce bude využíván motor synchronní bez železného jádra, který nemá negativní vlastnosti v podobě zádržných sil a coggingu (vysvětleno dále v kapitole 2.2.3) [9].

### 2.2.1 Princip

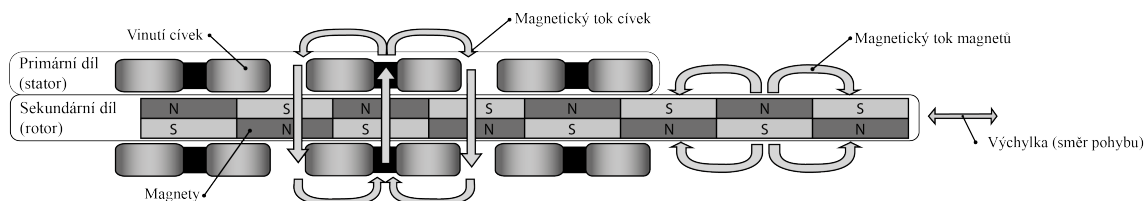
Vzhledem k zaměření bakalářské práce bude princip motoru popsán na synchronním lineárním motoru s permanentními magnety.



Obrázek 3: Rotační motor rozložený v rovině [8]

V rámci stavby motoru rozlišujeme dvě části, které nazýváme stator a rotor. Stator je částí motoru, která se vůči zbytku stroje (nebo zemi) nehýbe. Rotor je poté "otáčivá" část stroje, která slouží k přenosu rotačního pohybu (v našem případě

přímý lineární pohyb). Rotor a stator lze popsat také jako primární a sekundární část motoru - ve většině publikací je stator označován za primární díl a rotor jako sekundární. Primární díl se skládá z elektrotechnických plechů, na kterých je navinuto vinutí cívků. Sekundární díl se skládá z podložky, na které jsou připevněny magnety. Magnetický tok kolem cívek mění svůj směr podle polarity připojeného napětí. Cívky jsou napájeny střídavým napětím a každá cívka má své napětí fázově posunuté vůči cívkě sousední. Velikost fázového posunutí se mění v závislosti na charakteru motoru.



Obrázek 4: Lineární motor

V konfiguraci, kterou zobrazuje obrázek 4 je výchylka sekundární části neomezená. To znamená, že do obou stran lze motor rozšířit navýšením počtu magnetů nebo cívek. Tato konfigurace je vhodná pro 3D tiskárny, CNC stroje (stroje řízené počítačem, z angl. *Computer Numerical Control*), nebo jiná polohovací zařízení pro různé průmyslové aplikace [8].

### 2.2.2 Vlastnosti

Největší výhodou lineárního motoru, používaného v rámci této práce, je vysoká rychlost a přesnost, se kterými je spojená i vysoká akcelerace, což jsou klíčové vlastnosti pohonu reproduktoru. Zmíněná nevýhoda tření (zmíněná v tabulce 1) by měla být eliminována při správném vycentrování sekundárního dílu (pohyblivé části) tak, aby se sekundární díl žádnou svou částí, nebo v některé poloze nedotýkal části primární. Přívodní kabel bude připevněn pouze ke statoru, čímž dochází k eliminaci

Tabulka 1: Výhody/nevýhody lineárních motorů [10]

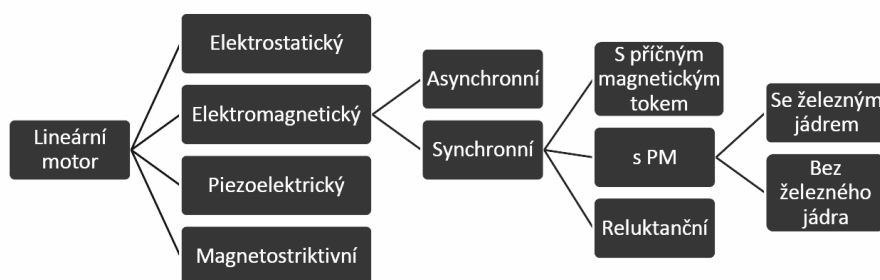
Výhody	Nevýhody
Vysoká rychlost rotoru	Vysoká cena
Vysoká přesnost	Zahřívání (nutnost chlazení)
Rychlá odezva	Tření
Bez mechanické vůle	Pohyblivý přívodní kabel
Jsou bezúdržbové	
Spolehlivost a životnost	

další nevýhody, která plyne z pohyblivého přívodního kabelu. V tabulce 1 jsou zobrazeny vlastnosti obecně platné pro lineární motory.

### 2.2.3 Rozdělení

Lineární motory dělíme podle typu konstrukce, nebo podle principu vzniku síly potřebné k vyvolání lineárního pohybu. V následující tabulce jsou rozděleny nejpodstatnější principy lineárních motorů. Elektromagnetické lineární motory se dělí na asynchronní a synchronní.

Pro účely této bakalářské práce byl zvolen motor synchronní, neboť u asynchronního motoru se projevuje skluz (rotor se otáčí pomaleji než magnetické pole statoru). Skluz negativně ovlivňuje požadavek lineárního přenosu řídicí veličiny motoru (v tomto případě napětí) na mechanický pohyb. Podstata projektu dále určuje kategorii s permanentními magnety, PM (z angl. *Permanent Magnet*). Dále se motory dělí na lineární motory s železným jádrem (IC, z ang. *Iron core*) a bez železného jádra (IL, z ang. *ironless*) popsané v následujících kapitolách.



Obrázek 5: Rozdělení lineárních motorů [10]

### Lineární motory s železným jádrem

Výhodou železného jádra v motoru je větší magnetická síla na úkor zádržných sil (cogging), vířivých proudů a saturace magnetů. Jedná se o významné problémy, které negativně ovlivňují plynulost pohybu lineárního motoru. Zádržná síla je dána pohybem statoru, který se přizpůsobuje magnetickým pólům permanentních magnetů, a to díky přitažlivým silám vytvářeným indukovanými magnetickými poli ve statoru vlivem permanentních magnetů. Vířivé proudy se tvoří u všech časově proměnlivých magnetických polí. Vznikají při vzájemném působení měnících se magnetických polí a feromagnetického materiálu. V důsledku toho dochází k zahřívání materiálů, kterého se u výkonových aplikací chceme vyhnout. Železné jádro v motoru je také vystaveno magnetickému poli vytvářenému cívkami, které přeorientoává jeho magnetické domény. Čím více se zvětšuje magnetické pole, tím více domén je přeorientoováno a to se děje do té doby, dokud nejsou všechny domény usměrněné. V

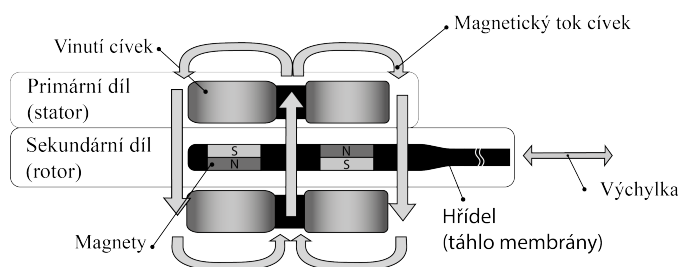
tento okamžik je jádro plně magneticky nasycené a poměr proudu a síly se stává nelineární. Tento proces umožňuje cívkám vyvinout větší sílu, ale motor je v důsledku toho těžší na řízení [12].

### Lineární motor bez železného jádra

Motor bez železného jádra je lepší na řízení lineárního pohybu. Jelikož motor neobsahuje železo, netvoří se v něm žádná přitažlivá síla mezi primárním a sekundárním dílem. Díky tomu se v motoru nevytváří zádržné síly, které by narušovaly plynulost pohybu primárního dílu. V důsledku plynulosti pohybu nezatíženého coggingem se zvýší přesnost řízení pohonu a s tím spojené polohování. Za další výhodu by se mohla považovat také hmotnost, která je díky absenci železného jádra nižší. Tento typ motoru vyniká vysokým zrychlením a brzděním, což jsou vlastnosti nutné pro pohon reproduktoru. Nevýhodou tohoto typu je ale snížený odvod tepla, který lze kompenzovat jiným konstrukčním řešením popsáním v následující kapitole [12].

## 2.3 Lineární motor pro elektroakustický měnič

U reproduktoru je velice důležitá převodní charakteristika od budícího signálu po mechanické kmitání membrány. Z tohoto důvodu byl pro účel této práce vybrán synchronní motor s permanentními magnety bez železného jádra. Tento motor poskytuje vše potřebné k sestrojení pohonu reproduktoru. Klasické lineární motory jsou využívány pro polohovací aplikace např. CNC strojů. Vzhledem k naší aplikaci bude stačit vychylovat sekundární část z nulové pozice jen v řádech desítek milimetrů. U 18" reproduktorů se maximální hodnoty vychýlení pohybují kolem  $X_{max} = 9mm$  [13]. U širších průměrů se hodnota výchylky dostává až na  $X_{max} = 18mm$  [14]. Proto bude v rámci diplomové práce možné využít motor s menším počtem cívek a magnetů - konkrétně se jedná o dvě cívky situované zrcadlově kolem sekundárního dílu a dva magnety. Tato konfigurace (zobrazená na obrázku 6) zajistí jednodušší řízení motoru, jelikož cívky lze připojit přímo na zesílený zdroj signálu. Díky tomu není nutná potřeba sensorového řízení celého motoru.



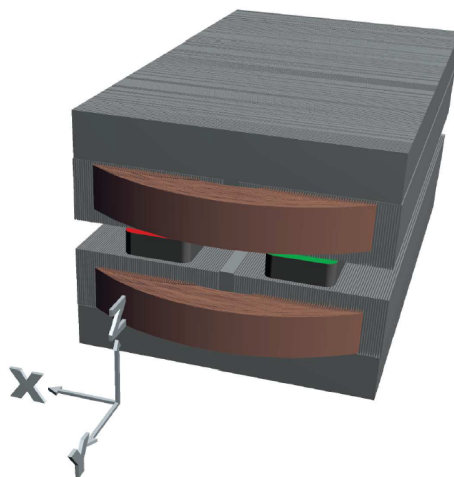
Obrázek 6: Lineární motor pro reproduktor.

### 2.3.1 Struktura

U klasické topologie elektrodynamického reproduktoru jsou síly generovány interakcí elektického proudu a magnetického pole. U námi konstruovaného lineárního motoru se cívka stává statorem a magnety rotorem. Magnety tedy kmitají společně s membránou. Dvě cívky obléhají magnety uprostřed a vytváří skládanou strukturu (viz 7). Cívky jsou k sobě natočeny plochou částí a v případě přivedení proudu, jejich siločáry prochází magnety. Cívky jsou pevně uchyceny ke konstrukci reproduktoru a zalité do nevodivého materiálu jako např. epoxid. Epoxid také pomáhá v přenosu tepla a funguje jako dodatečná elektrická izolace. Vyšší účinnosti dosáhneme silnějšími magnety nebo silnějšími cívkami. Proto jsou magnety delší ve vodorovné rovině (rovina Y) viz obr. 7. Rotor je na jedné straně pevně uchycen k membráně a mezi cívkami se může volně pohybovat bez jakéhokoliv tření.

#### Magnety

Nejdůležitější částí sekundární části jsou dva magnety orientované opačně tak, že jejich magnetická pole směřuje kolmo na cívky, vždy v opačném směru. Jedná se o neodymové magnety (NdFeB). Tyto magnety nabízí nejlepší poměr užitečných vlastností a ceny. Magnety jsou sice tvrdé, ale křehké a snadno se odštěpují, což je považováno jako jejich negativní vlastnost. Magnety dále nemají příliš dobrou chemickou odolnost, rychle oxidují v přítomnosti vody a většinou je nutná jejich povrchová úprava. Jejich další nevýhodou je malá tepelná odolnost oproti magnetům samarium-kobaltovým. V rámci konstrukce lineárního motoru proto musíme dbát na to, aby teplota magnetů nepřekročila jejich pracovní maximum. U běžně dostupných neodymových magnetů se maximální teplotní odolnost pohybuje kolem  $80^{\circ}\text{C}$ . Při této teplotě magnety ztrácí své magnetické schopnosti. [15]



Obrázek 7: Struktura motoru [3]

### Cívky

Pro konstrukci je důležité, aby byly použité cívky co nejvíce podobné a to ve všech parametrech. Jakákoliv odlišnost v povaze cívek může ve výsledku způsobovat nesymetrické chování sekundární části. Cívky by měly být uloženy v axiální symetrii a co nejbližší magnetům. Tím by mělo být dosaženo co nejmenších ztrát v efektivnosti převodu magnetického pole na mechanický pohyb. V cívce periodicky vzniká a zaniká magnetické pole, nedochází tedy k zahřívání cívky, jako to pozorujeme u rezistorů. Fyzikální příčina odporu je tedy jiná než v obvodu s rezistorem. Proto charakterizujeme působení cívky na střídavý proud jinou veličinou, kterou nazýváme indukance  $X_L$ . Induktance má za následek přeměny energie proudového pole na energii magnetického pole.

$$X_L = 2\pi fL, \quad (1)$$

kde  $X_L$  je induktivní reaktance [ $\Omega$ ],  $f$  je kmitočet [Hz] a  $L$  je indukčnost [H].

U nedokonalé cívky má drát vinutí určitý odpor a kapacitu, což ovlivňuje skutečné parametry cívky. Některá energie se tak vytratí ve formě tepla, které vzniká na drátu vinutí, který je tedy vnímán jako odpor. Z toho důvodu je nutné při větší zátěži motoru dbát na správný odvod tepla. To by mohlo vyžadovat přidání pasivního chladiče. Aktivní chladiče nejsou z důvodu jejich možnosti mechanického poškození a hluku v elektroakustických řešení používány.

### Železné pláty

Železné pláty viditelné na obr. 7 jsou přilepené přímo na cívku a stávají se magnetickým obvodem. Magnetický obvod má za úkol usměrnit magnetické pole v okolí cívek tak, aby mezi vyústění magnetického obvodu vznikalo homogenní magnetické pole. Pole, které vychází ze středu cívek pryč od sekundární části je pomocí plátů usměrněno kolem cívky zpět k magnetickému poli vyvolanému druhou cívkou. Tohoto je možné dosáhnout díky feromagnetické vodivosti železných plátů, které mají oproti vzduchu větší magnetickou vodivost (permeabilitu), a tím určuje a koncentruje magnetický tok a většinu magnetického toku určuje směr a cestu kudy má protékat.

V rámci této práce nebudou při konstrukci lineárního motoru železné pláty využívány, neboť se v menší míře chovají jako železné jádro a to s sebou přináší spoustu nevýhod, které byly popsány v kapitole 2.2.3. Parametry magnetického pole mohou být vylepšeny jiným konstrukčním řešením, popsaným v kapitole 3.

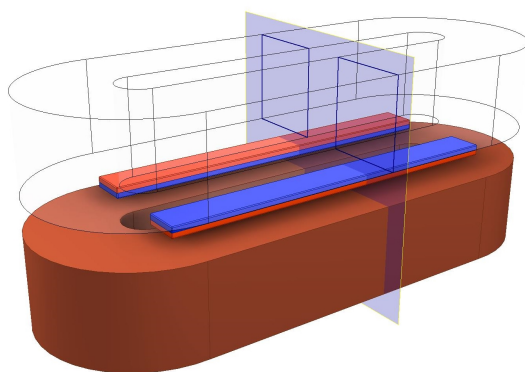
### Středící mechanismus



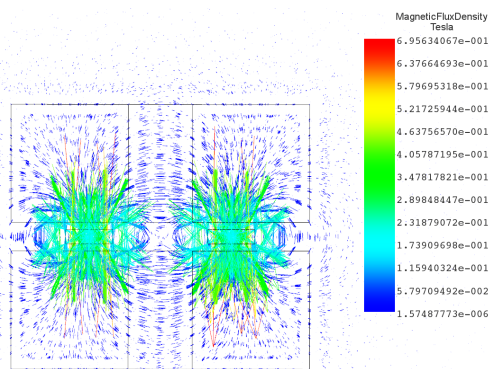
Středící mechanismus má za úkol vycentrovat sekundární díl vůči ose pohybu (tj. primárnímu dílu). V ideální konstrukci by středící mechanismus nemusel být vůbec přítomen a sekundární díl by se vystředoval sám díky symetrickému magnetickému poli, ve kterém by se nacházel. V našem prostředí by tohoto stavu bylo velice těžce dosaženo, a tak musíme zvažovat použití vodící tyče která určuje dráhu sekundární části. To bude mít za důsledek zvýšení tření mezi ložiskem a vodící tyčí, a tím pádem i zvýšení požadované síly na vyvolání pohybu.

## 2.4 Princip

Popsání chování motoru při přiloženém napětí bude nyní popsáno na třech různých stavech. Zároveň bude ukázáno jaká magnetická pole generují jednotlivé součástky. V poslední řadě bude ukázán celý magnetický obvod při jeho chování v excitaci stejnosměrným proudem. Pro vysvětlení jednotlivých situací použijeme řezy, které zobrazují hustoty magnetického toku pomocí vektorového pole a byly vytvořeny pro účel softwarového měření měniče v programu EMS<sup>2</sup> pro Autodesk Inventor (více v kapitole 6.1). Řez byl proveden v polovině motoru probíhající skrz obě cívky a oba magnety. Motor je symetrický k ploše řezu, který je zobrazen na obrázku 8



Obrázek 8: Řez motorem

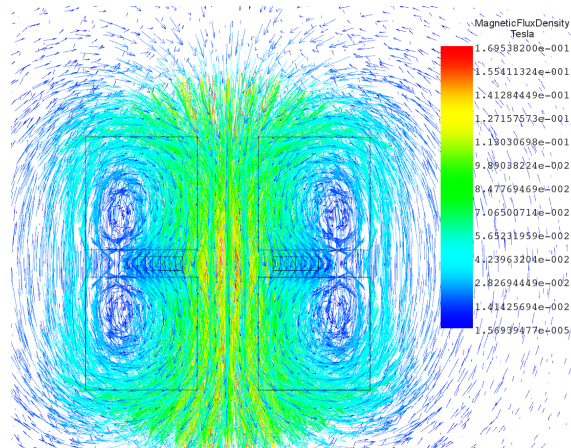


Obrázek 9: Hustota magnetického toku, 0 A s vloženými magnety

Obrázek 9 zobrazuje řez motorem v jeho symetrické ose. Horní a spodní větší čtverce (resp. obdélníky) znázorňují řezy cívkami. Menší placaté obdélníky uprostřed představují řezy magnetů. Jestliže jsou magnety vloženy mezi cívky, na kterých není žádné napětí, prochází jejich vektory volně cívkami a nedochází k žádné interakci. Magnety mají vůči sobě opačný směr magnetizace.

Cívky jsou zapojeny sériově, tím pádem mají větší výslednou indukčnost. Je-li na cívky přiveden proud, jejich magnetické siločáry budou procházet středem obou cívek. Směr magnetického pole je závislý na směru proudu.

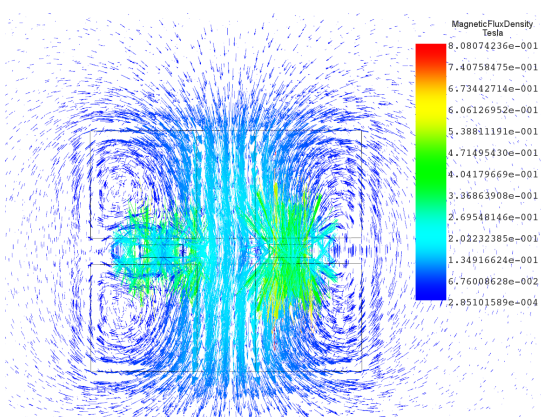
<sup>2</sup>EMS je softwarový balík pro 3D simulaci elektromagnetického pole, založený na výkonné výpočetní metodě konečných prvků. EMS je integrován do Autodesk® Inventor® [19]



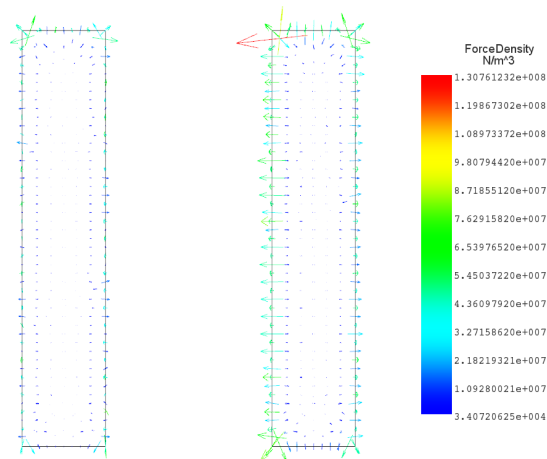
Obrázek 10: Hustota magnetického toku, 28 A bez magnetů.

Na obrázku 10 magnety neuvažujeme a pozorujeme samotné pole vyvolané cívkami. Dvě cívky umístěné nad sebou vytváří mezi jejich středy pole magnetické intenzity téměř vykazující známky homogenního pole.

Magnety vložené do takto vytvořeného pole budou mít snahu se dostat do takové pozice, ve které jejich vektory magnetického pole korelují s vektory magnetického pole, vytvořeného cívkami. Na obrázku 11 vidíme jak takové pole vypadá. Nejdůležitějším poznatkem z této simulace je zobrazené nelineární chování vektorů ve středu motoru. Na obrázku 11 vidíme přibližování vektorů magnetického pole k pravému magnetu. Tato interakce vyvolává sílu působící ve směru šipek viditelných na obrázku 13, který zobrazuje hustotu síly působící na magnety. Celý systém je navrhnout symetricky, a proto se tento úkaz objevuje i pro opačný směr polarizace napětí, a to v dokonalé symetrii. Tím jsou popsány maximální výchylky sil v limitním stejnosměrném zapojení.



Obrázek 11: Hustota magnetického toku, 28 A s vloženými magnety.



Obrázek 12: Hustota síly působící na magnety mezi cívkami, 28 A

## 2.5 Vlastnosti

Motor je navržen tak, aby při nulovém proudu byly magnety v nevychýlené pozici. Tento stav je fundamentální vlastností pro každého motoru. U reproduktoru při nulovém vstupním signálu očekáváme nulovou výchylku. Toho je dosaženo zmíněnou symetrií celého motoru a poddajným okrajem membrány, která je připevněna táhlem k sekundární části motoru. Tato konstrukce umožňuje zanedbat jakékoliv systémy, které by udržovaly sekundární část motoru v rovině, a zároveň by zvyšovaly tření. V práci se dále dočteme, že dosažení dokonalé symetrie je velice náročné, avšak není nemožné.

Důležitou konstrukční výhodou lineárního motoru je také možnost chlazení. Hlavním zdrojem tepla představují v rámci struktury lineárního motoru cívky. Cívky se však nacházejí na okraji struktury, a oproti konvenčnímu elektrodynamickému reproduktoru se tedy dají lépe pasivně chladit.

Na obrázcích si můžeme všimnout ztrátivosti hustoty magnetického pole ve vířivých proudech uvnitř cívek, které lze vylepšit pomocí konstrukčního řešení popsáném v závěru práce. Tato struktura také přináší otázku zdali by využití magnetických plátů nepřinesl mnohem lepší usměrnění magnetického pole v okolí cívek, a tím i větší účinnost.



---

## 3 Konstrukce

V praktické části bakalářské práce je popsán postup konstrukce elektrodynamického měniče s lineárním motorem podle poznatků popsaných výše. Celá konstrukce byla koncipovaná jako prototyp, nikoliv jako produkt odolávající běžnému používání. Hlavním cílem konstrukce bylo vytvořit model, který by umožnil provést základní měření a ověření našich předpokladů.

### 3.1 Návrh

Před začátkem jakékoliv práce byl vytvořen hrubý návrh motoru, jeho základní náležitosti a seznam potřebných základních komponentů (viz tab. 2). Základní myšlenkou bylo vytisknout na 3D tiskárně sekundární díl, do kterého budou uchyceny permanentní neodymové magnety. Dle tohoto byl následně vymodelován primární díl, do kterého byly ručně navinuty cívky zalité epoxidem. Primární díl se skládal ze dvou částí, které po sestavení objímaly díl sekundární a pro snadnější manipulaci k sobě byly připevněny šrouby. V laboratorních podmínkách nebylo možné dosáhnout dokonalé symetrie systému a proto bylo využito středícího mechanismu. Středící mechanismus mezi primárním a sekundárním dílem byl vytvořen z vodících tyčí a lineárních ložisek používaných u CNC strojů, 3D tiskáren a jiných polohovacích zařízení. Vzhledem k povaze práce byla membrána použita z průmyslově vyráběného rozbitého 18"konvenčního reproduktoru s prasklým magnetem.

**Tabulka 2:** Seznam základních komponentů

Primární díl	Měděný drát na namotání cívek
	Epoxidová zalévací směs
	Konektory a dráty mezi cívkami
Sekundární díl	Permanentní neodymové magnety
	Uchycení na membránu (hliníková tyč)
Středící mechanismus	Vodící tyče
	Lineární ložiska
Spojovací materiál	Šrouby a závitové vložky

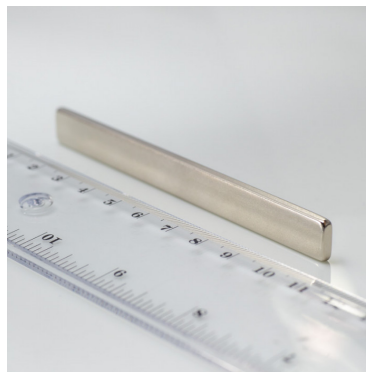
#### 3.1.1 Magnety

V reálném světě je víceméně nemožné sehnat přesně vyhovující komponenty pro nějaký projekt. Často se musíme smířit s zanedbáváním některých nedůležitých parametrů. U této konstrukce bylo jasné, že největší obtíž bude najít na trhu vhodné magnety. V ideálním případě by se magnety nechaly vyrobit přímo na zakázku,

ale to z finančních možností nepřicházelo v úvahu. Základní požadované parametry magnetů byly: vysoká teplotní odolnost, správné rozměry, vysoká odtrhová síla a správný směr magnetizace viz kapitola 4.1.1. Po dlouhém hledání byly nalezeny neodymové permanentní magnety s velikostí a parametry (viz tab. 3), které více méně odpovídaly požadavkům této práce.

**Tabulka 3:** Parametry neodymového permanentního magnetu [17]

Rozměry (mm)	100x10x3
Hmotnost (g)	23
Magnetické vlastnosti	VMM5-N38
Odtrhová síla (N)	155
Teplotní odolnost	80°C
Remanence [Br] (mT)	1220-1300
Koercivita [Hcb] (kA/m)	$\geq 876$
Povrchová úprava	Ni
Směr magnetizace	kolmo na plochu



**Obrázek 13:** Magnet [17]

Magnetické vlastnosti neodymových magnetů byly dostačující. Vzhledem k povaze projektu nebylo potřeba usilovat o nějaké extrémní magnetické schopnosti. U tohoto typu magnetů, ale výrazně vystupuje parametr teplotní odolnosti. U měření tedy bude potřeba stála kontrola teploty magnetu, aby nedošlo ke ztratě jeho magnetických schopností.

Od vybraných magnetů a konkrétněji jejich rozměrů byly vypočítány vnitřní rozměry primárního dílu, ve kterém bude navinuta cívka. Rozměry zároveň udávají rozteč rozteč mezi magnety v sekundárním dílu. Magnety jsou zobrazené na obrázku 13.

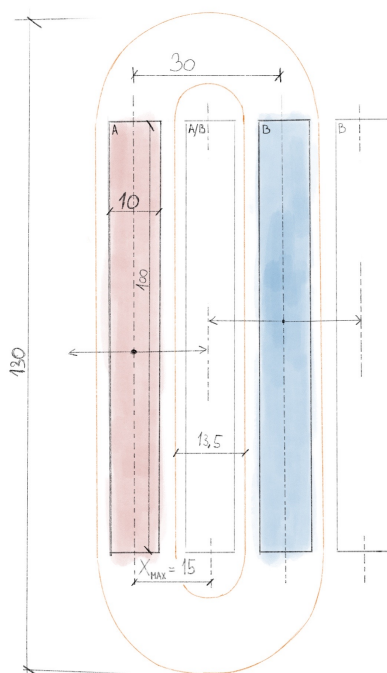
### 3.1.2 Výpočet výchylky a středící mechanismus

Vyrobený motor byl připevněn na membránu z konvenčního reproduktoru, u kterých se výchylka pohybuje maximálně kolem  $X_{max} = 9mm$  [13]. Maximální výchylka rotoru byla určena na  $X_{max} = 15mm$ . Tento údaj zároveň udává i rozteč mezi magnety jak je patrné na obrázku 14.

Středící mechanismus se bude skládat z lineárního ložiska, horizontální podpory pro tyč a broušené tyče vše pro průměr tyče 8mm. Ložisko má ve směru tyče šířku 22mm, horizontální podpora má šířku 14mm a výchylka je 15mm. Potřebná délka tyče je 73mm, z důvodů možných odchylek byla pořízena tyč o délce 100mm.

### 3.1.3 Výpočet drátu

V návaznosti na vybrané magnety a jejich umístění byly vypočítány rozměry požadovaných cívek a průměr měděného drátu, ze kterého budou navinuty. Celková



**Obrázek 14:** Rozložení magnetů, jejich vychýlená poloha a velikost cívky (mm)

impedance cívek se pohybovala kolem hodnot konvenčních reproduktorů, kvůli tomu aby bylo možné motor napájet z běžného vysoko výkonového audio zesilovače, a aby se lépe porovnávali naměřené hodnoty.

Výsledný odpor obou cívek byl směřován na  $R_{DC} = 5 \Omega$ . Cívky byly zapojeny sériově a odpor jedné cívky odpovídal polovině celkového odporu. V této části konstrukce vyvstává limitace dostupnými produkty na trhu. Cívka musí být navinuta z jednoho kusu homogenního drátu stejného průměru. Musel být proto zvolen správný poměr délky a průřezu vodiče, který by poskytl požadovaný odpor pomocí vztahu pro měrný odpor homogenního vodiče měděného drátu ( $\rho_{Cu} = 0,018 \cdot 10^{-6} \Omega m$  [18]).

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l}, \quad S = \pi \left( \frac{d}{2} \right)^2, \quad (2)$$

kde  $\rho$  je měrný elektrický odpor [ $\Omega \cdot m$ ],  $R$  je odpor [ $\Omega$ ],  $S$  je obsah kolmého průřezu [ $m^2$ ],  $d$  je průměr vodiče [ $m$ ] a  $l$  je délka vodiče [ $m$ ].

Zvolil jsem průměr vodiče  $d = 0,9 mm$  protože se ním mám už zkušenosti a dobře se s ním pracuje. Po úpravě a dosazení vzorečků dostáváme vztah pro výpočet délky vodiče:

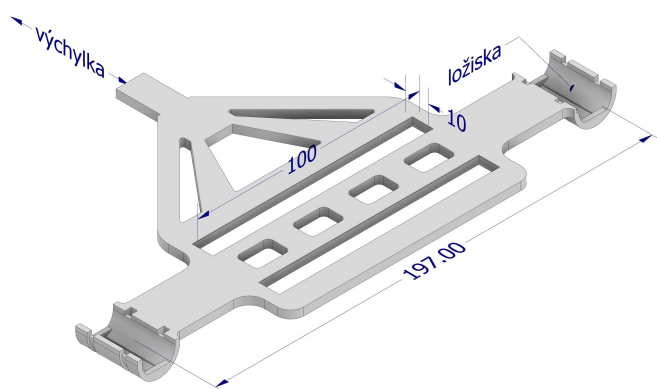
$$l = \frac{\pi R \cdot d^2}{4 \cdot \rho}. \quad (3)$$

$$l = \frac{\pi \cdot 5 \cdot (0,9 \cdot 10^{-3})^2}{4 \cdot 0,018 \cdot 10^{-9}} m. \quad (4)$$

$$l = 176,7 m. \quad (5)$$

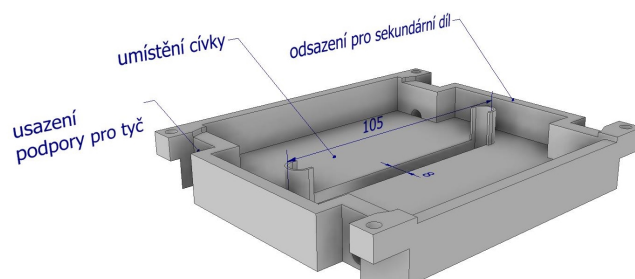
### 3.1.4 3D model

K modelování celého motoru jsem použil program Autodesk Inventor Professional<sup>3</sup>. Modelování proběhlo několika fázemi prototypů a hledání jejich správných rozměrů, stejně jako konfigurací pro 3D tisk. Jako první byl vymodelován sekundární díl, zobrazen na obrázku 15. Jeho model byl v průběhu návrhu spíše konstantní. Základním účelem sekundárního dílu bylo udržet magnety na správném místě a přenášet jejich pohyb na membránu bez pružnosti (při udržení nejnížší možné hmotnosti).



Obrázek 15: 3D model sekundární části

Struktura primárního modelu se odvíjela od modelu sekundárního. Primární díl sloužil jako forma na cívky a bude se skládat se ze dvou symetrických částí (viz obr. 16). Obě poloviny primárního dílu k sobě byly uchyceny pomocí podpory pro středící tyč. Původní model primárního dílu měl spoustu nedostatků, které bylo zapotřebí odstranit. Největším problémem byla celková pevnost 3D tisku, a proto se musely různé části vyztužovat. Dalším problémem bylo nedostatek místa kolem cívky pro její správné navinutí, kvůli kterému bylo zapotřebí v okolí cívky vytvořit dostatek prostoru.

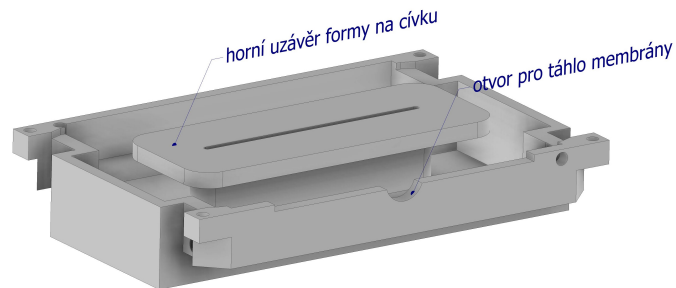


Obrázek 16: 3D model primární části verze první

<sup>3</sup>Autodesk® Inventor® je profesionální návrhářský a inženýrský software. Jedná se o kompletní řešení pro 3D strojírenské navrhování, simulaci a automatizaci konstrukčních pracovních postupů. [19]

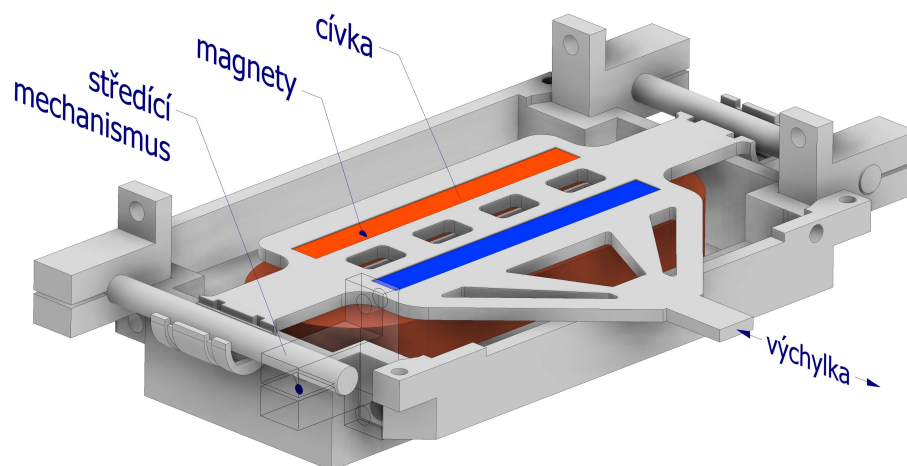


Z boku modelu sekundárního dílu je vymodelován prostor pro usazení podpory pro tyč. Tyto podpory budou na celém motoru čtyři. Cívka se původně měla namotávat na kolmé výstupky uprostřed modelu, ale po neúspěšných pokusech se tato část vylepšila v druhé verzi. Na obrázku 16 je dobře vidět odsazení pro sekundární díl, které vytváří prostor pro pohyb sekundárního dílu.



Obrázek 17: 3D model primární části verze druhá

Druhá verze modelu pro sekundární díl byla použita pro finální produkci. Po několika pokusech byla vytvořena forma na cívku, která se pod tlakem namotané cívky nezlomí. Odolnosti formy na cívku bylo dosaženo pevným horním uzávěrem zobrazeným na obrázku 17. Celý návrh konstrukce je vidět na obrázku 18.



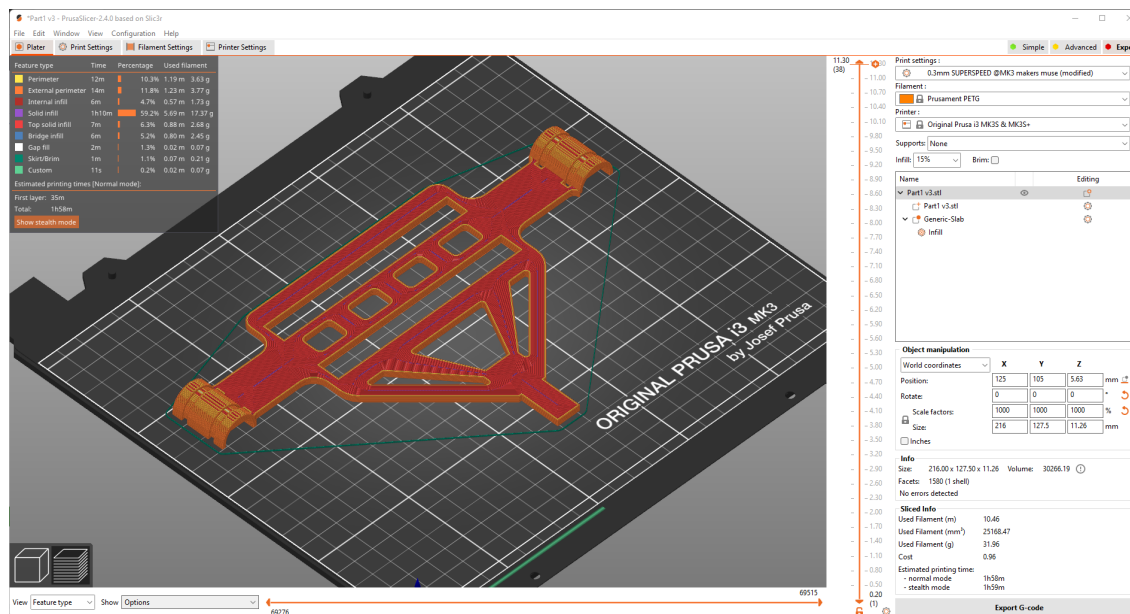
Obrázek 18: 3D model celé konstrukce

## 3.2 Výroba

Největší díl času byl věnován výrobě. Opakovaně se stávalo že se nějaká část nepovedla vyrobít tak, jak měla a celý proces se tak musel opakovat od začátku, neboť se na modelech vytvořily nevratné změny.

## 3.2.1 3D tisk

Exportované modely ve formátu .stl<sup>4</sup> se naimportovaly do programu PrusaSlicer<sup>5</sup>, kde byly nastaveny parametry pro 3D tisk. Ukázka programu je vidět na obrázku 19. Všechny modely byly, kvůli úspoře času, tisknuty s výškou vrstvy 0,3 mm. I přesto zabral tisk jedné poloviny primárního dílu přes 12 hodin tisku. Všechny modely byly tisknuty a orientovány největší plochou na podložce, aby byla zajištěna co největší pevnost ve směru namáhání.

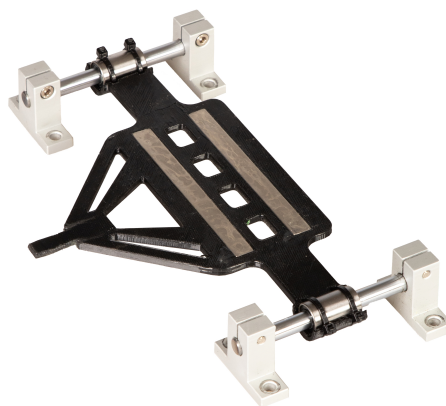


Obrázek 19: Ukázka tisku sekundární části v programu PrusaSlicer

Ve sliceru se přímo zobrazovala váha vytisknutého modelu a u sekundární části byla tato váha použita pro výpočet rezonance v kapitole 6 Měření. Hmotnost čistě vytisknuté sekundární části byla  $m_{sek.cast} = 32 \text{ g}$ . Hmotnost je závislá na typu použitého materiálu. Všechny modely byly tisknuty materiálem PETG, který byl zvolen kvůli široké škále skvělých vlastností pro cílové použití. PETG má vysokou teplotu tavení, která se pohybuje kolem  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  a vyznačuje se lepší pevností materiálu jako např. ABS. Tento materiál je na rozdíl od jiných materiálů více odolný vůči vysokým i nízkým teplotám a vytištěný předmět lze tepelně tvarovat. Na obrázku 20 je vyfotografován sestavený sekundární díl.

<sup>4</sup>STL (zkratka ze „stereolitografie“) je nativní formát souboru stereolitografického programu pro CAD vytvořeného firmou 3D Systems. STL soubory popisují pouze geometrii povrchu trojrozměrného objektu bez reprezentace barev, textur nebo jiných obvyklých atributů CAD modelu [20].

<sup>5</sup>PrusaSlicer známý také jako Slic3r je bezplatný softwarový 3D slicing engine pro 3D tiskárny. Generuje G-code z 3D CAD souborů (STL nebo OBJ). Po dokončení je příslušný soubor G-kódu pro výrobu 3D modelované součásti nebo objektu odeslán do 3D tiskárny pro výrobu fyzického objektu. [21]



Obrázek 20: 3D vytisknutý model sekundárního dílu společně se středícím mechanismem

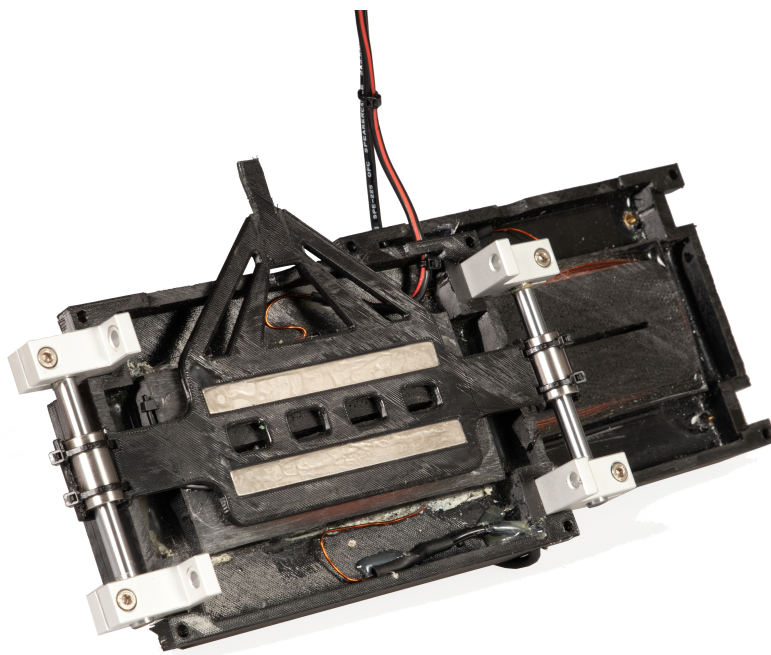
### 3.2.2 Cívky

Vinutí vlastních cívek byla nejvíce problematická část z celé konstrukce. Opakovaná deformace primární části navinutou cívkou způsobovala časově náročné opravy. Pod tlakem navinuté cívky modely praskaly ve svých slabších místech. Finální verze má tedy několikanásobně zesílené stěny i hustotu výplně. Po úspěšném navinutí byly cívky zality do epoxidové směsi určené pro elektroniku.

Zalévání se provádělo pomocí další tenké formy obepínající pro úsporu epoxidu a hmotnosti pouze cívky. Bylo důležité mít dopředu určený směr vinutí aby pole cívek působilo ve stejném směru. Výsledný počet závitů jedné cívky je  $N = 270$ . Následovalo odříznutí horního uzávěru formy na cívku. Nejúčinnějším způsobem bylo použití ruční pily na dřevo a několika kusů brusného papíru. Tloušťka odstraňovaného materiálu se určovala podle odsazení pro sekundární díl. U tohoto procesu hrozilo nebezpečí nadměrného zbroušení a následného přetrhnutí navinuté cívky, proto bylo zapotřebí častých kontrol broušené plochy. Výsledek vinutí a tisku je vidět na obrázku 21.



Obrázek 21: 3D vytisknutý model primárního dílu s navinutými cívkami zalité epoxidem



**Obrázek 22:** 3D vytisknutý primární i sekundární díl

#### 3.2.3 Membrána

Membrána byla použita z nefunkčního reproduktoru L-Acoustics SB118 s prasklým magnetem. Konkrétněji byl využit jen koš měniče a jeho membrána.

Odříznutím středící membrány byly odhaleny šrouby upevňující magnet ke zbytku konstrukce. Odstraněním magnetu byla odhalena vstupní cívka spojená přímo s membránou. Odříznutím poloviny cívky bylo vytvořeno dostatek prostoru pro připevnění vlastního táhla, které spojuje membránu se sekundárním dílem. K tomuto účelu byla vytisknuta čepička pasující do prostoru cívky spojující táhlo s membránou.

### 3.3 Montáž a první pokusy

Vložené magnety do sekundárního dílu byly zalité tenkou vrstvou epoxidu, aby se předešlo jejich samovolnému uvolnění. Vrstva epoxidu také zajistila další tuhost celého dílu. Lineární ložiska se vložila do úchyťů a připevnila se stahovacími páskami. Do dostatečně promazaných ložisek, k tomu určeným lubrikantem, se vložila vodící tyč zakončená podporami. V místě pro usazení podpory pro tyč byl vytisknut prostor pro vložení závitové vložky M5. Vložka se pomocí páječky nahřála na teplotu kolem  $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ , při které dochází k tavení materiálu PETG, a byla vtlačena do vytisknutého modelu. Zakončení měděného drátu cívek bylo potřeba odizolovat od ochranného laku a připájet k reproduktorovému kabelu. Sekundární díl se vložil mezi dvě části primárního dílu a pomocí šroubů M5 byl k sobě přišroubován. I přesto, že byla

většina částí motoru vytisknutá z plastu, kombinace epoxidu a hliníkové podpory pro tyč způsobuje, že finální výsledek působí velice solidně.

Motor byl připevněn ke koši membrány pomocí dvou párů spojovacích nožiček, také vytisknutých na 3D tiskárně. Na táhlo membrány byla použita co nejlehčí 10cm hliníková tyč se dvěma vnitřními závity na jejích koncích. Pomocí úhlové brusky byl do tyče vyřezán úchyt na sekundární část zafixovaný pomocí závitového špuntu. Reprodukční drát byl přiveden na vstupní konektory terminálů aby bylo zajištěno co nejjednodušší připojení výkonového zdroje. Samotný motor má rozměry 23 x 7,5 x 12,5 cm a společně s membránou má na výšku 38 cm.

K hotové konstrukci bylo nejdříve přivedeno stejnosměrné napětí 12 V z nastavitelného zdroje. Sekundární díl se dle očekávání vychýlil společně s membránou o přibližně 0,5 mm. Při opačné polaritě zdroje se ale hodnota výchylky rovnala přibližně 1,5 mm. Bylo proto zapotřebí upravit polohu táhla tak, aby se výchylka projevovala na obě strany stejně. Při připojení měniče na střídavý harmonický proud bylo pozorováno kmitání sekundárního dílu v závislosti na amplitudě napětí a frekvenci. Zároveň bylo pozorováno celkem rychlé zahřátí motoru při vysokém napětí. Rychlé zahřátí motoru při vyšším napětí má nejvýznamnější vliv na konstrukci motoru a je třeba jej mít na paměti při pozdějším měření. Výrobou funkčního elektrodynamického měniče s lineárním motorem byla splněna konstrukční část bakalářské práce. Obrázky 23, 24, 25 a 26 zobrazují zkonstruovaný měnič z různých pohledů.



Obrázek 23: Zkonstruovaný měnič s membránou - 1.



Obrázek 24: Zkonstruovaný měnič s membránou - 2.



Obrázek 25: Zkonstruovaný měnič s membránou - 3.



Obrázek 26: Zkonstruovaný měnič s membránou - 4.

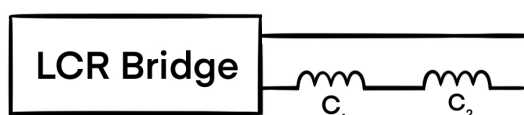
## 4 Měření

Bylo provedeno několik dílčích měření proveditelných v laboratorních podmínkách. U komerčních elektrodynamických reproduktorů se měří celá škála parametrů ze kterých byli vybrány ty nejvíce popisující charakteristiku chování celého systému. Měření všech možných parametrů pro reproduktor by bylo na rámec této práce nebo by z jejich povahy nedávali správnou informační hodnotu u tohoto typu konstrukce.

### 4.1 Měření samotného motoru

#### 4.1.1 Impedance a indukčnost cívek na můstku

První měření bylo provedeno na plně digitálním programovatelném LCR můstku Hameg HM8118. Při postupném nastavování frekvence byla změřena impedance  $Z_C(f)$  a indukčnost  $L_C(f)$  obou cívek  $C_1$  a  $C_2$  najedou, které jsou zapojeny v sérii. Obě cívky mají  $N = 270$  závitů. Měření probíhalo bez sekundárního dílu a mezi cívkami byla jen vzduchová mezera  $g_{air} = 8,12$  mm.

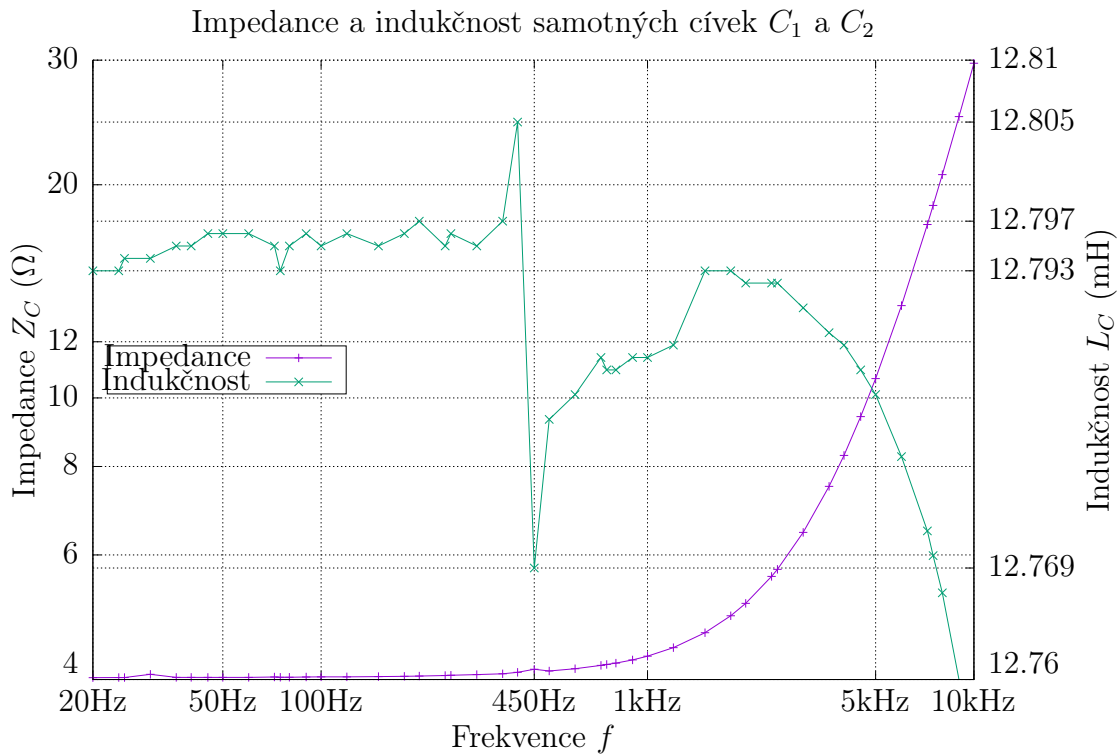


Obrázek 27: Měření cívek na můstku - Schéma zapojení

Můstek umožňuje měřit jen na některých frekvencích v rozsahu 20 Hz do 200 kHz v 69 krocích. Pro naše využití mělo význam měřit jen na intervalu od 20 Hz do 10 kHz. Některé významné hodnoty jsou zobrazeny v tabulce 4.

Tabulka 4: Měření cívek na můstku - Významné hodnoty

Frekvence $f$	Impedance $Z_C(f)$ ( $\Omega$ )	Indukčnost $L_C(f)$ (mH)
20 Hz	4,024	12,793
50 Hz	4,0281	12,796
100 Hz	4,0342	12,795
1 kHz	4,3158	12,786
5 kHz	10,648	12,783
10 kHz	29,933	12,753



Obrázek 28: Měření cívek na můstku - Graf

Indukčnost se v pásmu aplikace pro nízkotónový měnič zásadně nemění a její aritmetický průměr v pásmu od 20 Hz do 200 Hz je  $\bar{L}_C = 12,795$  mH strmě klesá. Zajímavostí je pík indukčnosti na 400 Hz a její pokles na 450 Hz společně s píkem impedance. Z těchto výsledků vyplývá, že na těchto frekvencích má cívka vlastní rezonanční frekvenci. Impedance  $Z_C(f)$  se u nižších frekvencí drží těsně nad změřenou hodnotou pro DC odpor motoru  $R_{DC} = 4 \Omega$ , poté strmě roste. Jelikož můstek v oblasti od 20 Hz do 50 Hz měří s moc velkým krokem přednastavených frekvencí, nemůžeme v tomto pásmu vyvodit žádné jiné závěry.

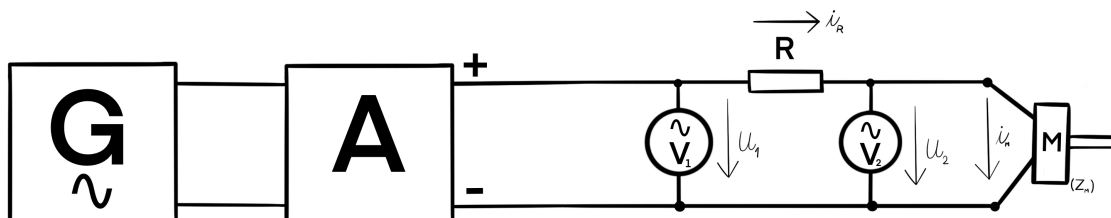


Obrázek 29: Měření cívek na můstku - Fotografie



## 4.1.2 Měření impedance pomocí dvou voltmetrů

Impedance charakterizuje vlastnosti prvku pro střídavý proud, podobně jako odpor charakterizuje vlastnosti prvku pro stejnosměrný proud. Obrázek 30 zobrazuje schéma zapojení náhradního můstku pro měření impedance připojeného přípravku.



Obrázek 30: Měření impedance motoru bez membrány - Schéma zapojení

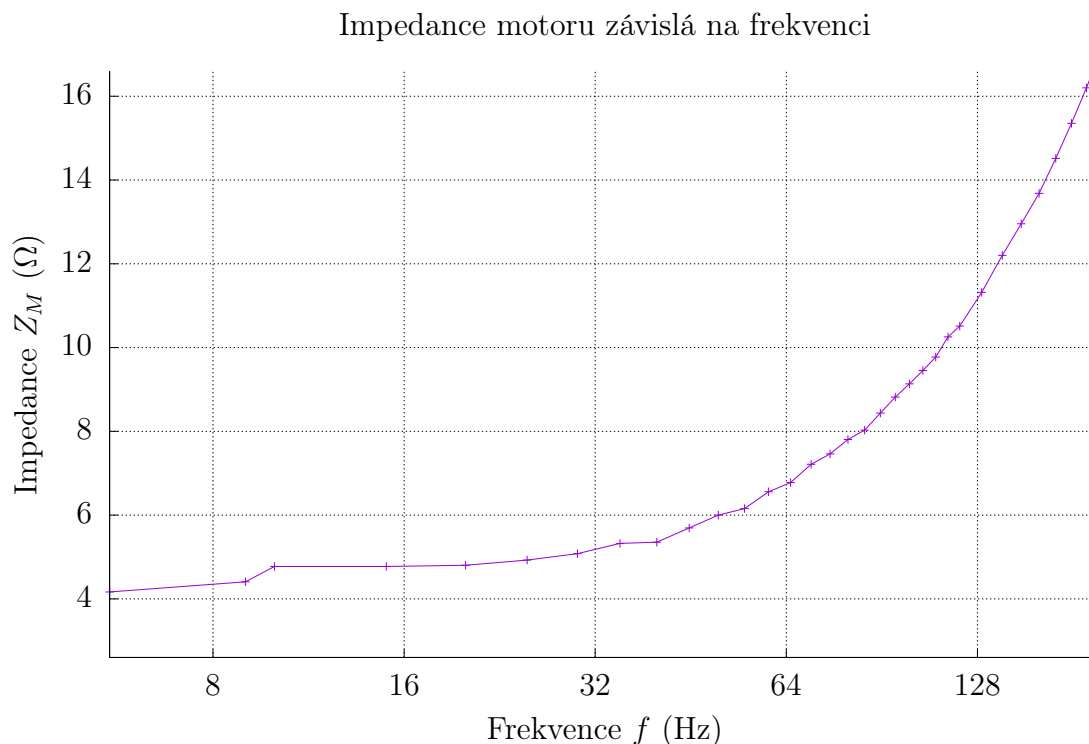
## Seznam použitých přístrojů

1. **G** - Funkční generátor - Toellner TOE 7741
2. **A** - Audio zesilovač - Show PSA-31500
3. **V** - 2x AC milivoltmeter - GW INSTRON GVT-417B

Výpočet impedance  $Z_M(f)$  probíhá pro každou frekvenci zvlášť. Frekvence byla nastavena na generátoru **G** s vhodně zvoleným krokem. Na výstupu audio zesilovače **A** bylo udržováno konstantní napětí  $u_1 = 70$  V, protože audio zesilovač nemusí na celém pásmu zesilovat s lineární charakteristikou. Především nízké kmitočty vykazovaly zesílení i o 3 dB nižší než zbytek pásma a bylo je zapotřebí dorovnávat na výstupu generátoru. Rozdíl napětí mezi  $u_1$  a  $u_2(f)$  udává úbytek napětí na  $R$ . Pomocí Ohmova zákona byl vypočítán proud  $i_R(f)$ , který se rovná  $i_M(f)$ . Impedance  $Z_M(f)$  se poté rovná podílu napětí na motoru  $u_2(f)$  ku proudu protékajícím motorem  $i_M(f)$ . Odpor  $R = 204 \Omega$

$$i_M(f) = i_R(f) = \frac{u_1 - u_2(f)}{R} \quad (6)$$

$$Z_M(f) = \frac{u_2(f)}{i_M(f)} \quad (7)$$



**Obrázek 31:** Měření impedance motoru bez membrány - Graf



**Obrázek 32:** Měření impedance motoru bez membrány - Fotografie

#### 4.1.3 Výchylka motoru pomocí akcelerometru

Snímání výchylky bylo prováděno pomocí akcelerometru. Akcelerometr je zařízení které pomocí malého piezokrystalu generuje náboj úměrný jeho namáhání. Signál z akcelerometru je zesílen pomocí zesilovače (Charge A) na úroveň napětí, kterou můžeme odečítat na voltmetru střídavého napětí. Motor byl buzen pomocí signálu sinusového průběhu o konstantním napětí  $u_1$  pro všechny frekvence. Elektrický signál na výstupu akcelerometru  $u_{akc}$  je úměrný zrychlení  $a_{ef}$  sekundární části.

Výchylka  $x_{ef}$  byla získána postupnou integrací (po první integraci zrychlení získáme rychlost a po druhé získáme výchylku). Integraci lze provést i přímo ve frekvenční oblasti

$$v(t) = v_m \cdot \sin(2\pi ft + \varphi) \quad (8)$$

$$v(t)' = a(t) = 2\pi f v_m \cdot \cos(2\pi ft + \varphi) \quad (9)$$

$$a_m = 2\pi f v_m \quad (10)$$

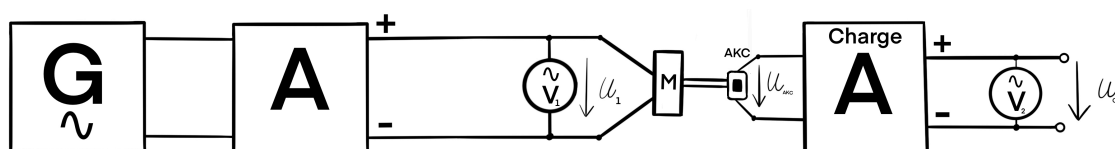
kde  $v(t)$  je rychlost v čase  $t$ ,  $a(t)$  je zrychlení v čase  $t$ ,  $v_m$  je amplituda a víme, že pro sinusový průběh se  $v_m = v_{ef} \cdot \sqrt{2}$ ,  $f$  je frekvence a  $\varphi$  je fáze. Rovnost 10 platí i pro efektivní hodnoty. Stejný postup lze provést i pro výchylku  $x_{ef}$ , ze které po úpravě dostáváme vzorce pro integraci efektivních hodnot ve frekvenční oblasti.

$$v_{ef}(f) = \frac{1}{2\pi f} a_{ef}(f) \quad \text{a} \quad x_{ef}(f) = \frac{1}{2\pi f} v_{ef}(f) \quad (11)$$

Pro výpočet maximální výchylky je třeba převést efektivní hodnotu výchylky zpět na amplitudové vyjádření. Důležitější hodnotou pro reproduktor je ale hodnota *pík to pík*, která je vyjádřena následujícím vztahem:

$$x_{max}(f) = 2x_{ef}(f) \cdot \sqrt{2} \quad (12)$$

kde  $x_{max}(f)$  je maximální výchylka při frekvenci  $f$ .



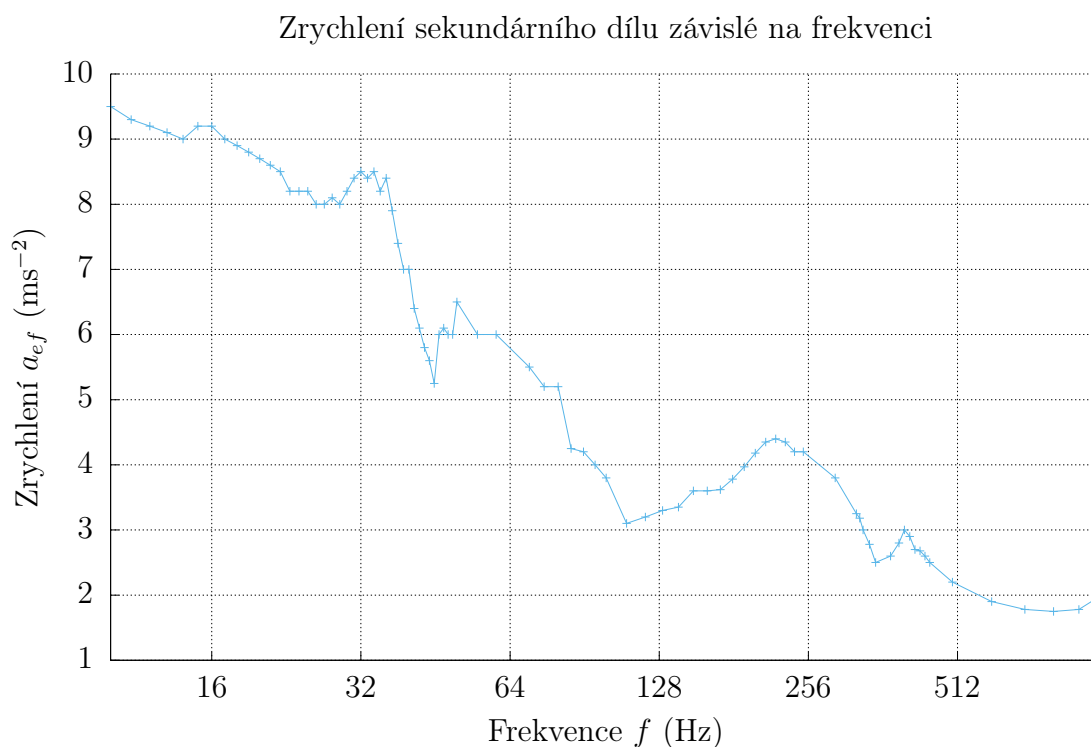
Obrázek 33: Výchylka motoru - Schéma zapojení

### Seznam použitých přístrojů

1. **G** - Funkční generátor - Toellner TOE 7741
2. **A** - Audio zesilovač - Show PSA-31500
3. **V** - 2x AC milivoltmeter - GW INSTEK GVT-417B
4. **AKC** - Akcelerometr - Brüel & Kjær Type 4374
5. **Charge A** - Nábojový zesilovač - Brüel & Kjær Type 2635

Akcelerometr byl pomocí vosku připevněn na táhlo motoru a na výstupu audio zesilovače bylo uvažováno konstantní napětí  $u_1 = 3 \text{ V}$ , protože zesilovač **G** nemusí zesilovat na všech frekvencích stejně. Akcelerometr **AKC** má podle kalibračního listu citlivost  $0,100 \text{ pC/ms}^{-2}$ , která se nastaví na integrujícím zesilovači **Charge A**. Zesilovač dále umožňuje nastavení konstanty výstupního napětí  $u_{out}$  pro toto měření rovna  $1 \text{ mV/jednotku}$  a tedy

$$a_{ef}(f) = u_{out} \cdot 10^3. \quad (13)$$



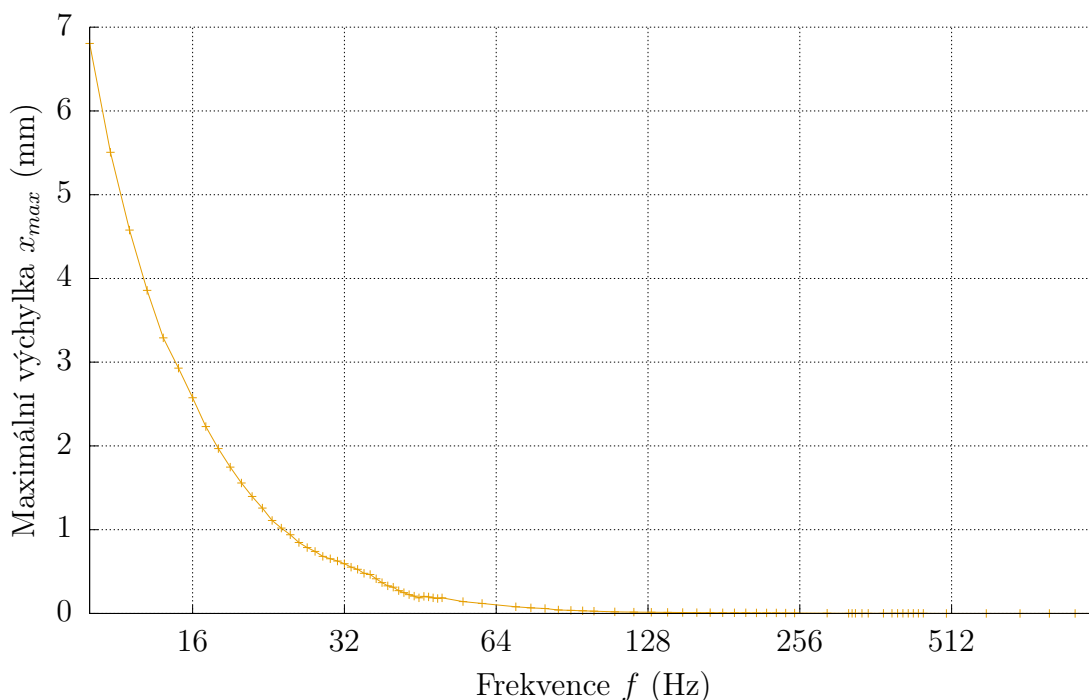
**Obrázek 34:** Zrychlení sekundárního dílu - Graf

A po postupné integraci podle 11 získáváme graf maximální výchylky závislé na frekvenci.

Z grafu 35 lze vidět, že maximální výchylka při  $u_1 = 3 \text{ V}$  na žádné frekvenci nepřekročí konstrukční limit  $x_{max} = 15 \text{ mm}$ . Omezíme-li se na slyšitelné frekvence zjistíme, že maximální výchylka

$$x_{max}(20 \text{ Hz}) = 1,558 \text{ mm}. \quad (14)$$

Maximální výchylka sekundárního dílu závislá na frekvenci



Obrázek 35: Maximální výchylka sekundárního dílu - Graf



Obrázek 36: Nábojový zesilovač - Fotografie

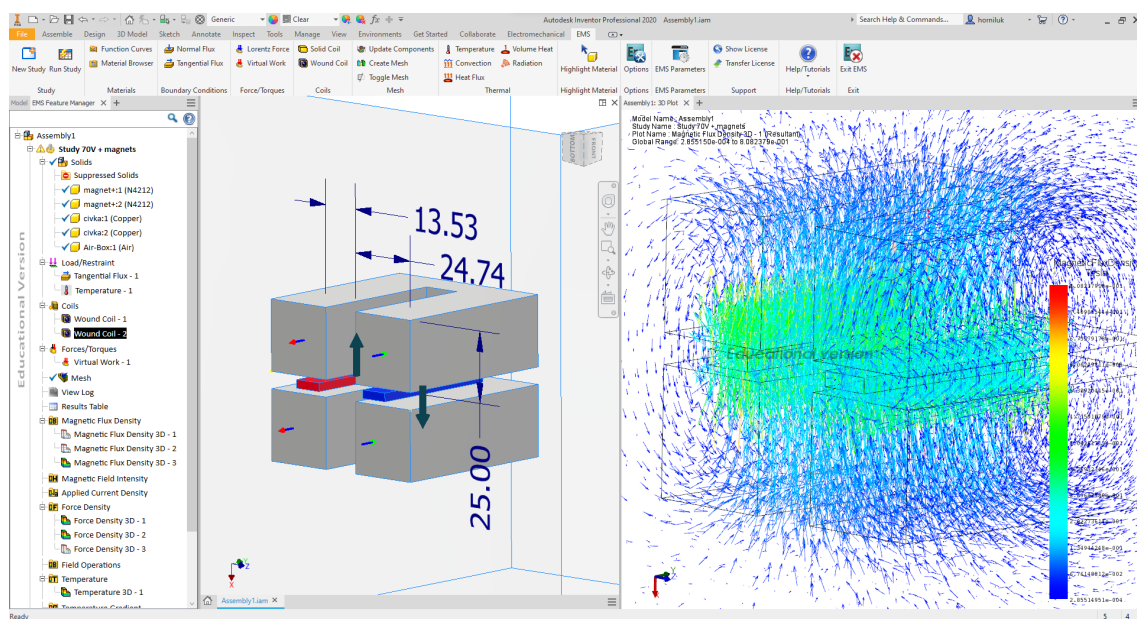


Obrázek 37: Měření zrychlení - Fotografie

#### 4.1.4 Simulace elektromagnetického pole motoru pomocí softwaru

Měření motoru bylo provedeno v programu *Inventor*® *Professional* vydání 2020 od společnosti *Autodesk*®, ve kterém byl vytvořen 3D model magnetostatického obvodu. Simulaci chování magnetostatického obvodu provedl přídatný modul *EMS* vydání 2021 od společnosti *ElectroMagneticWorks Inc.*

Model elektromagnetického obvodu byl zjednodušen pomocí symetrické osy (viz. kapitola 2.4). Výhodou takového zjednodušení je snížení časové náročnosti výpočtu na polovinu. I přes toto zjednodušení výpočet jedné studie zabral přes půl minuty.



**Obrázek 38:** Ukázka simulace elektromagnetického pole v programu Autodesk Inventor a modulu EMS

Pro provedení výpočtu je potřeba zadefinovat základní charakteristiky elektromagnetického obvodu, tj. materiály, velikost cívek a magnetů, počet závitů, proud cívkami, nebo napětí a jejich odpor, typ materiálů, typ magnetů a jejich orientace a další parametry. Po úspěšném dokončení výpočtu program zobrazuje různé typy grafů ve dvou, nebo třech dimenzích a také tabulky elektrických a magnetických veličin.

Simulační modul umí simulovat chování elektromagnetického obvodu jak pro střídavé veličiny, tak pro veličiny stejnosměrné. Simulace pro tuto práci byla provedena pro stejnosměrné veličiny, protože vykazují důležitější informace pro jeden určitý stav motoru. Simulace sil působící na vybrané komponenty motoru se provádí pomocí principu virtuální práce. Simulace byla řešena pro reálné parametry postaveného motoru.

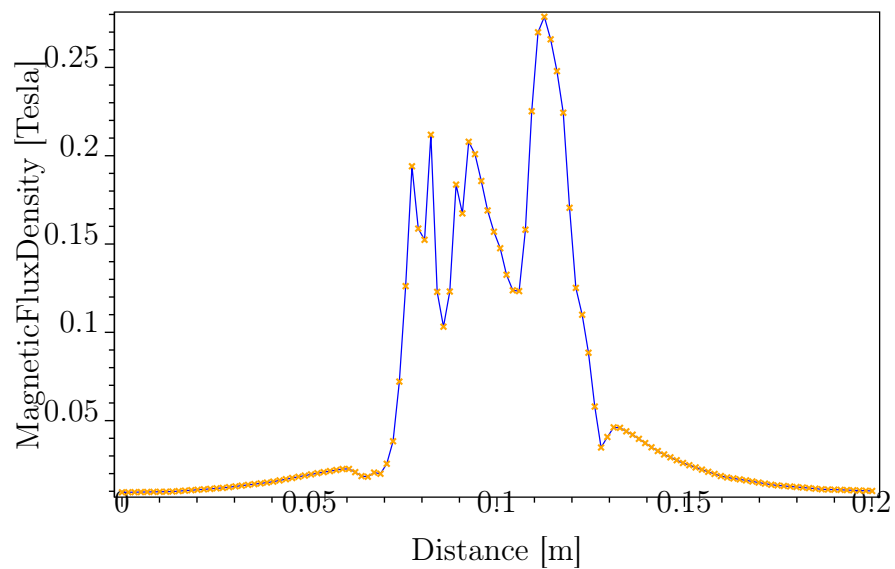
Následující výsledky simulace byly provedeny pro nulovou výchylku ( $x = 0$  mm) a pro stejnosměrný proud procházející cívkami a velikosti 20 A. Tabulka 5 zobrazuje výsledné veličiny simulace. Výchylka sekundárního dílu je rovnoběžná s osou  $z$  kartézské soustavy souřadnic využívaných v 3D prostoru programu. Obrázek 39 zobrazuje rozložení hustoty magnetického pole v řezu.

Obrázky zobrazují vektorové nebo kontinuální pole magnetické hustoty v motoru. Cívky jsou k sobě axiálně symetrické tak, že ve vzduchové mezeře mezi nimi je možné pozorovat pole podobnému homogennímu poli. Homogenní pole by se dalo lépe spočítat analytickými metodami oproti poli nehomogennímu.

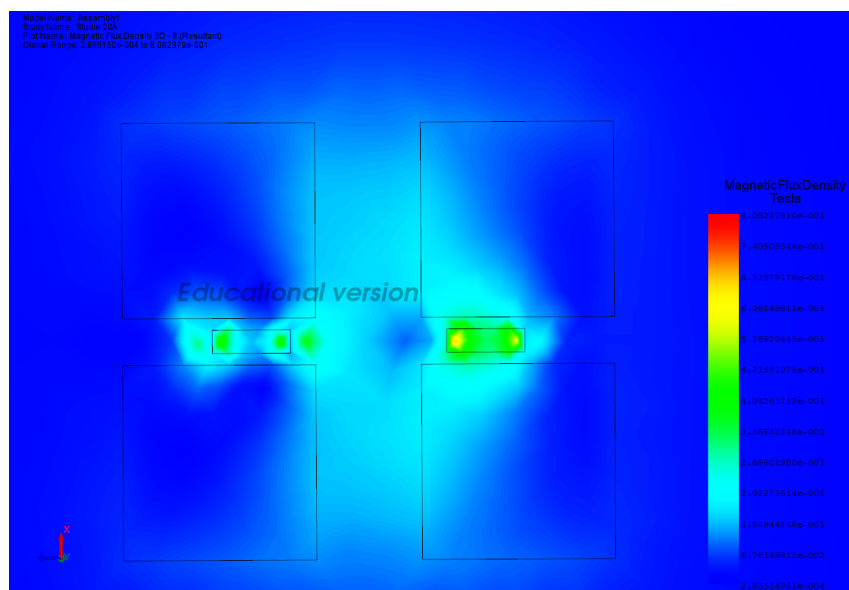
Tabulka 5: Hmotnosti komponentů sekundárního dílu

Energie systému (J)	1,714		
Síla působící na magnety (N)	$F_x = -0,294$	$F_y = 2,797$	$F_z = 21,037$
Točivý moment (Nm)	$T_x = -0,113$	$T_y = 0,859$	$T_z = -0,126$
Odpor jedné cívky $R_{DC}$ ( $\Omega$ )	2,012		
Indukčnost jedné cívky $L_C$ (mH)	4,491		

Magnetic Flux Density 2D - 1 Study Name : Studie 20A

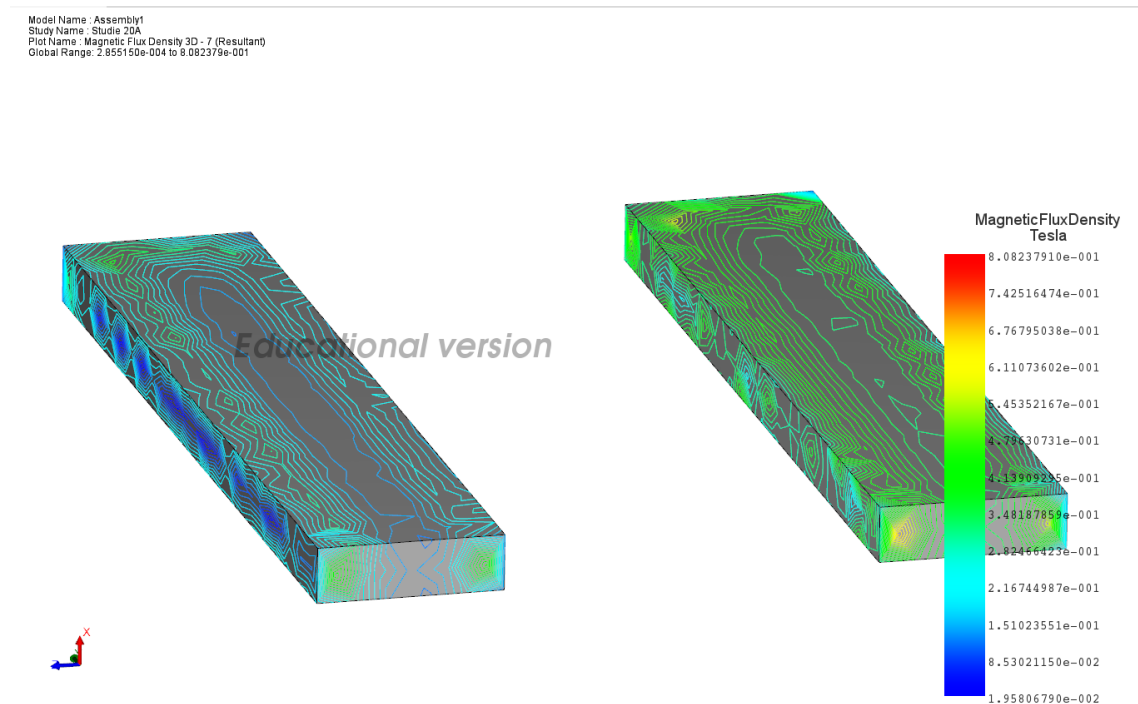


Obrázek 39: Rozložení magnetické hustoty v řezu - Graf

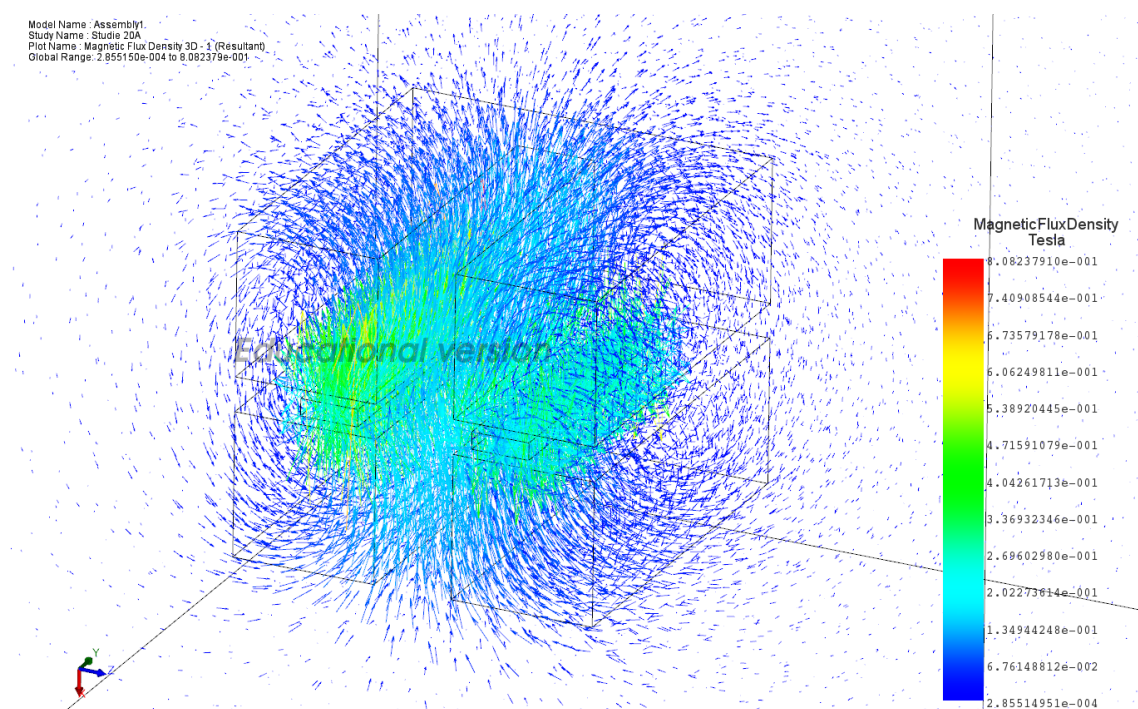


Obrázek 40: Hustota magnetického pole v řezu - Graf

## 4.1 Měření samotného motoru



Obrázek 41: Čáry hustoty magnetického pole probíhající magnety - Graf



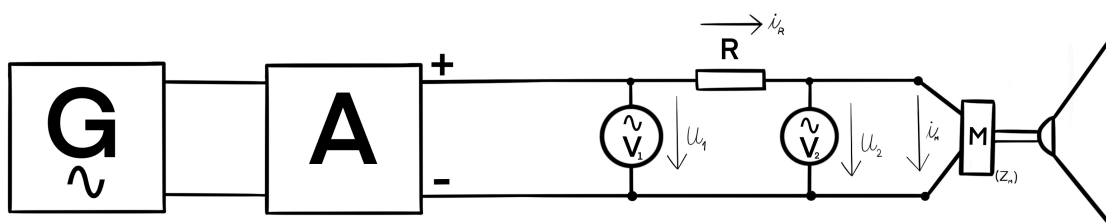
Obrázek 42: Ukázka simulace elektromagnetického pole v programu Autodesk Inventor a modulu EMS



## 4.2 Měření motoru s membránou

### 4.2.1 Měření impedance pomocí dvou voltmetrů

Obdobně jako v kapitole 6.1.2 se i v rámci této kapitoly charakterizují vlastnosti měniče pro střídavý proud. Tentokrát je ale na motor připevněná membrána, která by se měla projevit na výsledné impedanční křivce. Toto měření bylo provedeno na nižších kmitočtech do 50 Hz, tedy pro kmitočty, na které je motor postavený (viz kapitola 6.1). Jelikož audio zesilovač Show PSA-31500 vykazoval nelineární zesilování v oblastech nižších kmitočtů, bylo pro zpřesnění výsledků použito jiného zesilovače. Obrázek 43 zobrazuje schéma zapojení.



Obrázek 43: Měření impedance motoru s membránou - Schéma zapojení

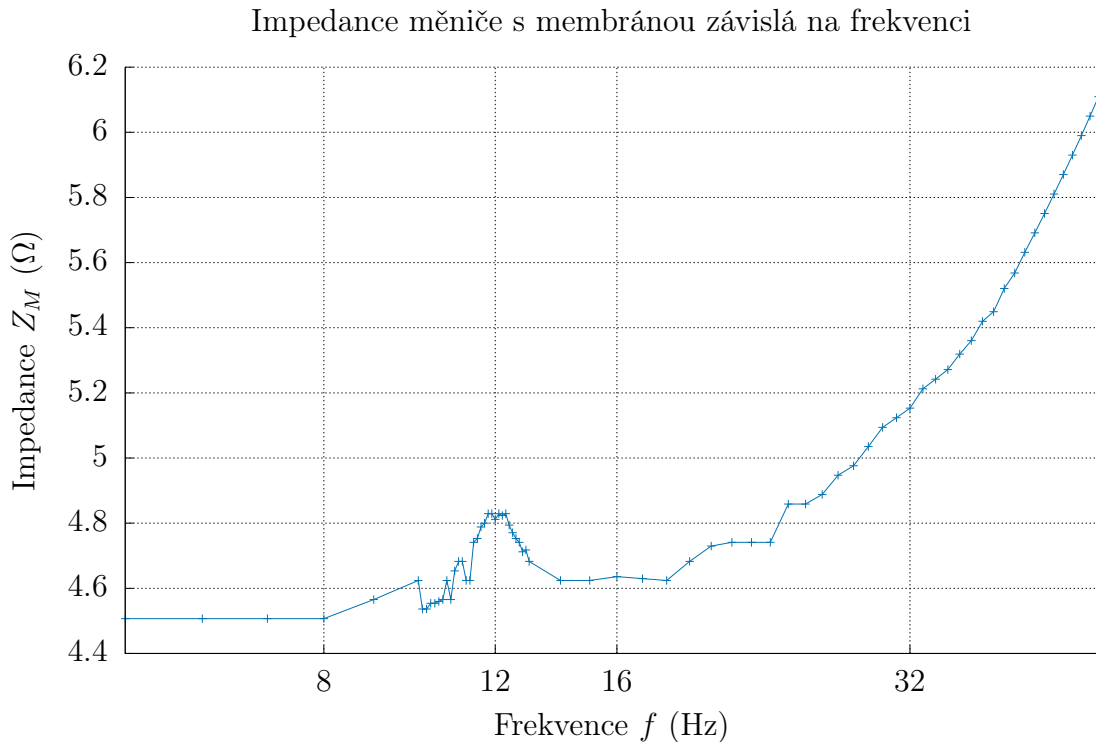
#### Seznam použitých přístrojů

1. **G** - Funkční generátor - Toellner TOE 7741
2. **A** - Výkonový zesilovač - Brüel & Kjaer Type 2706
3. **V** - 2x AC milivoltmeter - GW INSTRON GVT-417B

Teoretický základ měření je totožný s měřením impedance bez membrány (viz kapitola 6.1.2). Pro toto měření na výstupu zesilovače bylo udržováno konstantní napětí  $u_1 = 22.1V$  a odpor  $R = 120 \Omega$ .

$$i_M(f) = i_R(f) = \frac{u_1 - u_2(f)}{R} \quad (15)$$

$$Z_M(f) = \frac{u_2(f)}{i_M(f)} \quad (16)$$



Obrázek 44: Impedance měniče s membránou - Graf

Při měření vzniklo lokální maximum impedance v oblasti kolem 12 Hz. V této oblasti se předpokládala poloha rezonančního kmitočtu, proto bylo v této oblasti provedeno více měření s menším krokem. Oproti konvenčním reproduktorům ale byla špička impedance velice utlumená a málo rozeznatelná, proto byl náš předpoklad podroben dalšímu zkoumání, které je popsáno v následující kapitole.

#### 4.2.2 Hledání rezonance pomocí zátěže přidané na membránu

V návaznosti na předešlé měření bylo provedeno potvrzení rezonanční frekvence odhadované kolem 12 Hz. Po přesném měření impedance v okolí podezřelého kmitočtu  $f_{rez1}$  se na membránu v okolí uzavírací vložky přilepila přesně změřená modelovací hmota s hmotností  $\Delta m = 115$  g a měření bylo opakováno. Na grafu druhého měření byl očekáván posun rezonanční frekvence  $f_{rez2}$  směrem k nižším kmitočtům díky přidané hmotě a platícím rovnostem [22]

$$f_{rez1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{m_1 \cdot c_m}} \quad \text{a} \quad f_{rez2} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(m_1 + \Delta m) \cdot c_m}} \quad (17)$$

kde  $m_1$  je hmotnost sekundárního dílu a  $c_m$  je poddajnost membrány reproduktoru. Vyjádřením  $c_m$  z rovnice 17 pro  $f_{rez1}$  získáme poddajnost, která platí i pro výpočet  $f_{rez2}$

$$c_m = \frac{1}{m_1 \cdot (2\pi f)^2}, \quad (18)$$

Hmotnost  $m_1$  je sumou všech dílčích hmotností komponentů sekundárního dílu (viz tabulka 6). Do hmotnosti nebyla připočítána hmotnost membrány, jelikož nebylo jak zjistit její samostatnou hmotnost. Obdobně bude membrána ovlivňovat hodnotu poddajnosti absence vlivu tření ložisek. Správná hodnota poddajnosti by proto měla být o něco menší.

**Tabulka 6:** Hmotnosti komponentů sekundárního dílu

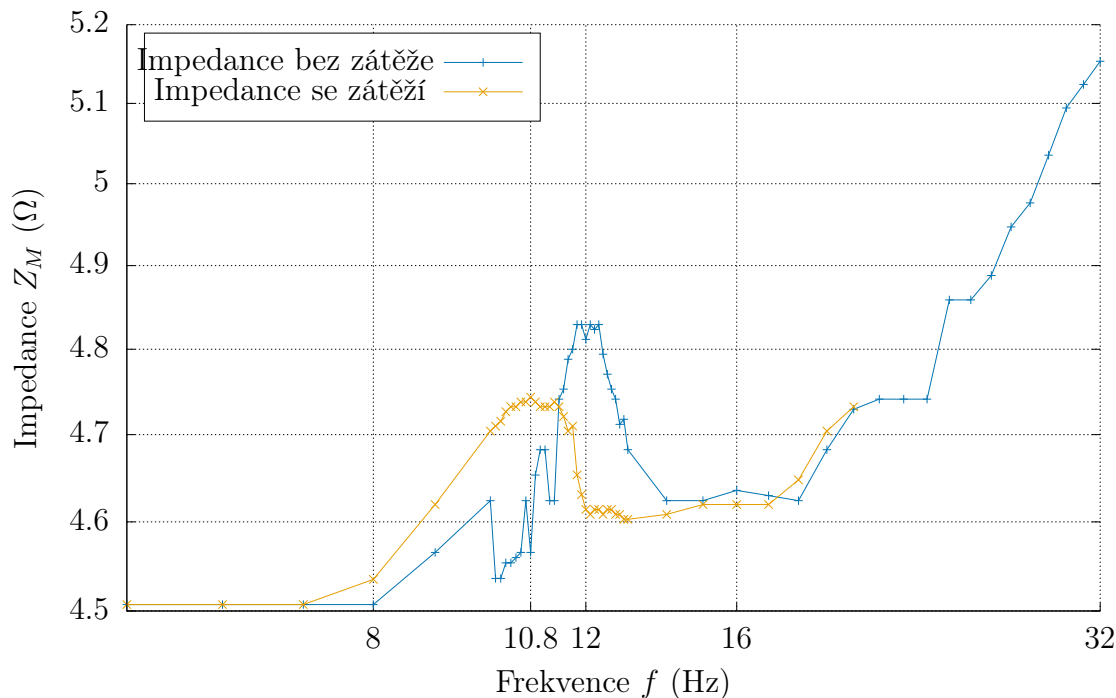
3D vytisknutý model $m_{sek.cast}$	32 g	PM (NdFeB)	2 x 23 g
3D vytisknutý uzávěr membrány	27 g	Matice samojistná M5	4 x 3,2 g
Lineární ložiska	2 x 13 g	Imbusový šroub M5	4 x 7,6 g
Táhlo membrány	25 g	Uzávěr táhla membrány	2 x 10 g

$$m_1 = \sum m_{komponent} = 219,2 \text{ g} \quad (19)$$

$$c_1 = 0,803 \cdot 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{N}^{-1} \quad (20)$$

$$f_{rez2} = 10,845 \text{ Hz} \quad (21)$$

Impedanční charakteristiky měniče bez zátěže a se zátěží



**Obrázek 45:** Posun rezonančního kmitočtu - Graf

Výsledné hodnoty impedance se zátěží opravdu vykazovaly posun lokálního maxima do okolí 10,8 Hz jak lze vidět na obrázku 46. Vypočtené hodnoty souhlasily

s hodnotami změřenými, a proto byl potvrzen předpoklad, že rezonanční frekvence měniče  $f_{rez1} = 12$  Hz.



Obrázek 46: Přidaná zátěž na membránu - Fotografie

### 4.2.3 Akustický tlak v oblasti nízkých kmitočtů

Měření frekvenčních charakteristik pro střední a vysoké kmitočty nebývá obtížné. Pro měření takových kmitočtů se využívají akusticky bezodrazové komory běžných rozměrů. Pro kmitočty pod 100 Hz jsou ale běžné bezodrazové komory nevhodné, jelikož bývají certifikované pro kmitočty od 50 Hz výše. Veliké komory které by umožňovaly měření nižších kmitočtů jsou drahé na výstavbu, a tak jsou charakteristiky nízkých kmitočtů zpravidla měřeny v exteriéru. Existuje ale způsob jak měřit charakteristiky nízkých kmitočtů i v laboratorních podmínkách bez zvláštních nároků na akustické vlastnosti prostředí.

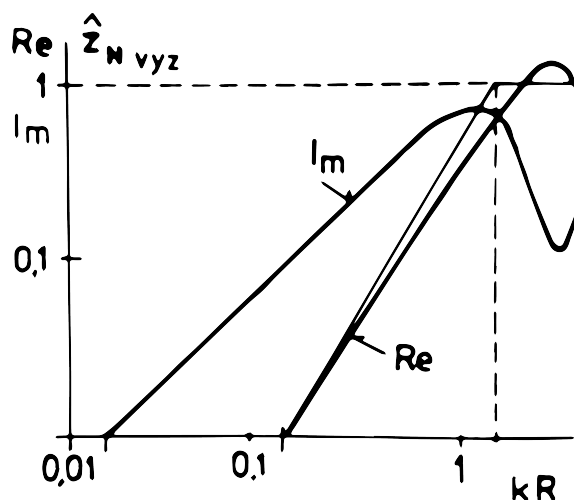
Byl zaveden vztah pro poloměr membrány reproduktoru  $R$ . Definice pro úhlové vlnové číslo  $k$  je poté:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c_0}, \quad (22)$$

kde  $\omega$  je úhlová frekvence a  $\lambda$  je vlnová délka a nechá se spočítat jako

$$\lambda = \frac{c_0}{f}, \quad (23)$$

kde  $c_0$  je rychlost šíření vlnění. Pro nás  $c_0$  je rychlost zvuku ve vzduchu (při 20 ).  $c_0 = 343 \text{ ms}^{-1}$  [18]



Obrázek 47: Průběh  $Re$  a  $Im$  složky vyzářovací impedance kmitající membrány - Graf, upraveno z [23]

Kruhová pístová kmitající membrána umístěná v rovině má průběh reálné a imaginární složky vyzářovací impedance zobrazen na obrázku 47. Pro  $kR < 1$  převládá vliv imaginární složky, která má charakter inertance (reaktance akustické hmotnosti). Z výrazu pro fázor rychlostního potenciálu vysílače 0. řádu je modul akustického tlaku v ose zářiče ve vzdálenosti  $z$  roven

$$p_2 = \omega \rho v_0 \frac{R^2}{2z}, \quad (24)$$

kde  $\rho$  je budící tlak a  $v_0$  je rychlost membrány.

Ze stejného výrazu můžeme určit i relativní hodnoty tlaku v ose zářiče a po dalších úpravách dostaneme výraz pro akustický tlak v blízkém poli

$$p = \rho c_0 v_0 2 \left| \sin \left( \frac{1}{2} \sqrt{(kR)^2 + (kz)^2} - kz \right) \right| \quad (25)$$

a v těsné blízkosti membrány, tj. pro  $z = 0$  platí

$$p = \rho c_0 v_0 2 \left| \sin \left( \frac{kR}{2} \right) \right|. \quad (26)$$

Vztah 26 upravíme a získáme

$$p = \rho c_0 v_0 kR \left| \frac{\sin \frac{kR}{2}}{\frac{kR}{2}} \right|$$

$$p = \omega \rho v_0 R \left| \frac{\sin \frac{kR}{2}}{\frac{kR}{2}} \right|. \quad (27)$$

Pro malé hodnoty  $\frac{kR}{2}$  dostáváme

$$p_1 = \omega \rho v_0 R \lim_{\frac{kR}{2} \rightarrow 0} \left| \frac{\sin \frac{kR}{2}}{\frac{kR}{2}} \right| \quad (28)$$

neboli

$$p_1 = \omega \rho v_0 R \quad (29)$$

Porovnáním tlaku  $p_1$  těsně u membrány (29) a tlaku  $p_2$  ve vzdáleném poli (24) zjistíme jejich jednoduchý poměr

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{R}{2z}. \quad (30)$$

Vztah ukazuje, že lze měřit v oblasti nízkých kmitočtů tlak těsně u membrány a získat tak dokonalý obraz o velikosti tlaku v vzdáleném poli. [23]

Pro 18" membránu je poloměr membrány  $R = 190$  mm. Tím pádem můžeme najít pásmo frekvencí, které splňují podmínku  $kR < 1$ , pomocí rovnic (22) a (23)

$$\frac{2\pi f}{c_0} R < 1$$

$$f < \frac{c_0}{2\pi R} \quad (31)$$

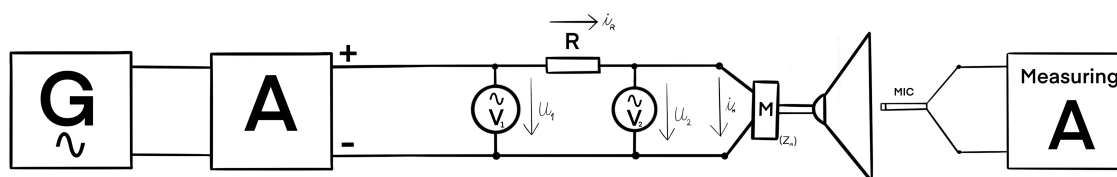
$$f < 287 \text{ Hz}. \quad (32)$$

Vztah (30) platí pro 18" membránu jen do kmitočtu 287 Hz. Vzhledem k nalezené rezonanční frekvenci  $f_{rez1} = 12$  Hz bude toto pásmo naprosto stačit. Pro případné měření vyšších kmitočtů by bylo lepší použít bezodrazové komory.

Tlak ve vzdáleném poli  $p_2$  je po úpravě ze vztahu (30) roven

$$p_2 = \frac{p_1}{2} \cdot \frac{1}{\frac{z}{R}}. \quad (33)$$

Tlak  $p_2$  je přímo úměrný polovině akustického tlaku v těsné blízkosti membrány a nepřímo úměrný normované vzdálenosti  $\frac{z}{R}$ . [23]



Obrázek 48: Měření akustického tlaku v blízkém poli - Schéma zapojení

### Seznam použitých přístrojů

1. **G** - Funkční generátor - Toellner TOE 7741
2. **A** - Audio zesilovač - Show PSA-31500
3. **V** - 2x AC milivoltmeter - GW INSTRON GVT-417B
4. **MIC** - Elektrový měřicí mikrofon - Brüel & Kjær Type 4148
5. **Measuring A** - Digitální měřicí zesilovač - Brüel & Kjær Type 2525

Reproduktor byl buzen konstantním příkonem  $P_A = 0,15$  W, který zesilovač **A** dokázal poskytnout. U střídavých proudů se výkony dělí na zdánlivý, činný a ja-  
lový. U hudebního signálu je situace ještě komplikovanější, neboť tento signál je sice  
střídavý, ale nikoliv periodický, a proto nelze počítat výkon  $P_A$  jako  $P_A = U \cdot I$ .  
V našem měření ale využíváme harmonický sinusový signál a při nulovém fázovém  
posuvu mezi vektory proudu a napětí můžeme počítat výkon činný dle vztahu

$$P = u_2 \cdot i_M \cdot \cos \phi, \quad (34)$$

kde  $\phi$  je fázový posuv.

Měřicí zesilovač zobrazuje hodnotu hladiny efektivního akustického tlaku  $L_{p1}$   
(dB). Hladina akustického tlaku se vypočte pomocí vzorce

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \log \frac{p_{ef}}{p_0}, \quad (35)$$

kde  $p$  je akustický tlak (Pa) a  $p_0$  je referenční hodnota akustického tlaku.  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$   
Pa. [18] Každý vzorek měření tedy musíme přepočítat na akustický tlak pomocí

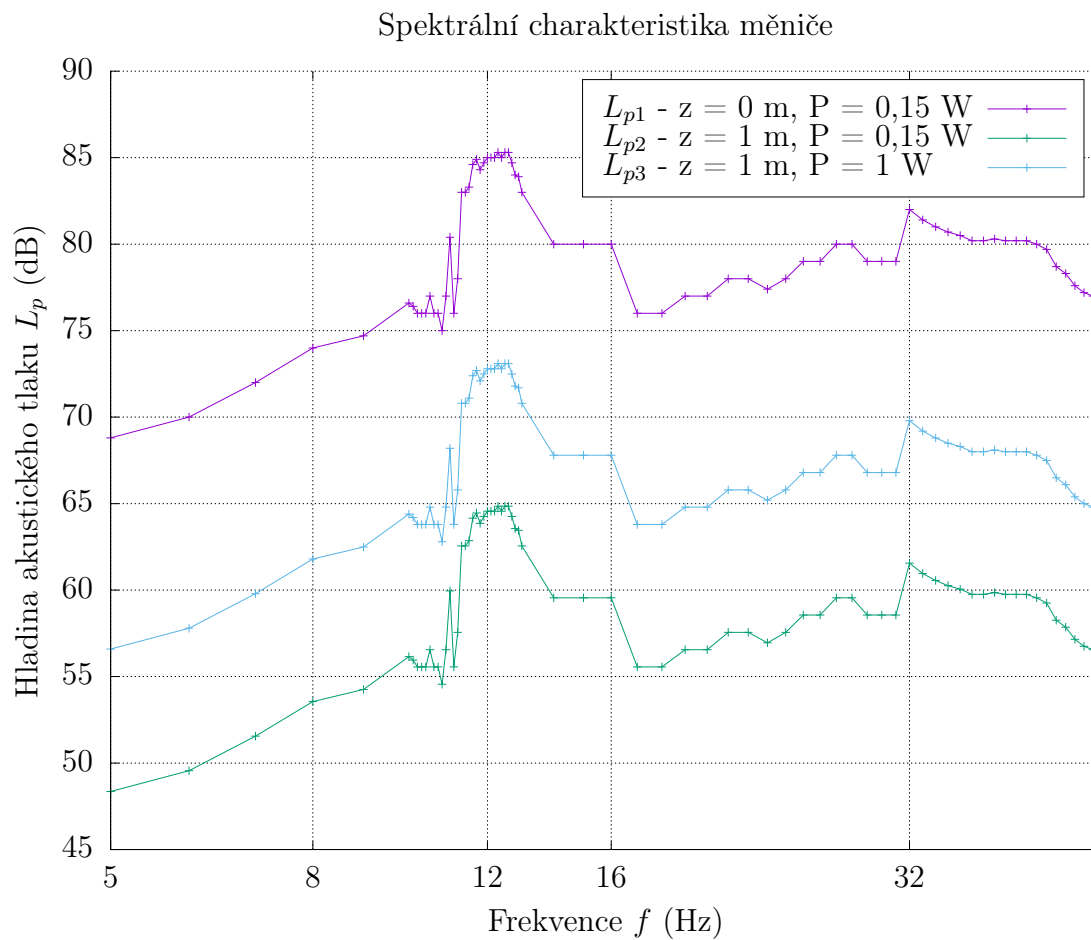
$$p_{ef} = p_0 \cdot 10^{\frac{L_p}{20}} \quad (36)$$

Hodnoty akustického tlaku  $p_1$  byly převedeny do vzdáleného pole ve vzdálenosti  
 $z = 1$  m, za pomoci vztahu 33. Výsledný akustický tlak  $p_2$  byl převeden zpět na  
hladinu akustického tlaku pomocí vztahu 35.

Charakteristická citlivost je definovaná jako úroveň akustického tlaku vyvolaná  
reproduktorem při buzení příkonem 1 W měřeným ve vzdálenosti 1 m. Převod hla-  
diny akustického tlaku  $L_{p2}$ , který je buzený příkonem  $P_A = 0,15$  W na hladinu  
akustického tlaku  $L_{p3}$ , který je buzený normovaným příkonem  $P_N = 1$  W je dán  
vzorcem 37.

$$L_{p3} = L_{p2} + 10 \cdot \log \frac{P_N}{P_A}, \quad (37)$$

$$L_{p3} = L_{p2} + 8,24 \text{ dB}. \quad (38)$$



**Obrázek 49:** Hladiny akus. tlaku v blízkém poli, vzdáleném poli a char. citlivost při 1 W - Graf

Výsledné hodnoty jsou vyneseny do obrázku 49.



**Obrázek 50:** Měření v blízkém poli - Fotografie



**Obrázek 51:** Měřicí zesilovač mikrofonu - Fotografie



---

## 5 Závěr

Tato bakalářská práce se zabývá studiem elektroakustického měniče s lineárním motorem. V úvodní části práce je z teoretických poznatků sestaven analytický model, který co nejvíce vyhovuje požadovaným charakteristikám. Konstrukční část se zabývá řešením analytického modelu měniče a jeho následnou výrobou. Sestavený motor i celý měnič jsou podrobeny charakteristickým měřením v rámci laboratorního prostředí a naměřené výsledky jsou podrobně zpracovány v závěru této práce.

Teoretická část práce seznamuje čtenáře s možností využití lineárního motoru jako pohonu pro elektroakustický měnič. V úvodu jsou rozebrány základní vlastnosti elektroakustických měničů, stejně jako lineárních motorů, a je uvedeno jejich rozdělení. Zároveň jsou v rámci této práce popsány vlastnosti a jevy, díky kterým se lineární motor stává možným pohonem pro buzení membrány reproduktoru.

Konstrukční část popisuje postup práce od tvorby návrhu po finální výrobek. V této části jsou popsány procedury výběru správných komponent, stejně jako prvotní výpočty. Následující kapitoly vystihují nejdůležitější části výroby konstrukce elektroakustického měniče s lineárním motorem za pomoci 3D modelování, 3D tisku a jemné manuální práce. Produktem, který byl vytvořen dle popsaných postupů je funkční, zvuk vyluzující elektroakustický měnič.

Poslední část práce se zabývá měřením základních parametrů elektroakustického měniče. Parametry měniče jsou měřeny obdobnými způsoby jako je tomu u běžných elektrodynamických měničů. V rámci kapitoly měření jsou popsány specifické postupy měření takových parametrů, jejich teoretický základ a analytický postup matematického výpočtu.

Nový princip pohonu elektroakustického měniče přináší spoustu výhodnějších parametrů oproti konvenčním měničům. Z provedených měření impedancí bylo zjištěno, že takto konstruovaný měnič má velice nízký rezonanční kmitočet, který odpovídá  $f_{rez} = 15$  Hz. Rezananční kmitočet je velice důležitý parametr při ladění reproduktorových soustav. Při ladění se obvykle využívá pásmo kmitočetů nad rezonančním kmitočtem. Z toho lze vyvodit, že měnič je vhodný pro infrazvukové aplikace a pro první slyšitelné kmitočty lidským uchem. Z měření bylo dále zjištěno, že největší akustický tlak vytváří měnič okolo rezonančního kmitočtu  $L_{rez} = 73$  dB. Tato citlivost je ale až o 20 dB nižší než jiné komerčně dostupné profesionální měniče stejné kategorie.

Velkou nevýhodou konstrukce elektroakustického měniče s lineárním motorem je přítomnost středícího mechanismu. Nejen že do celého systému přináší nadbytečný odpor, ale způsobuje i hluk při jeho pohybu. V rámci dalšího pokračování práce by proto mělo být odstranění středícího mechanismu prioritou. Obdobně by k lepším parametrům vedlo i využití magnetického obvodu kolem cívek, které by sloužilo k

---

usměrnění toku magnetického pole. Magnetický obvod by odstranil vysoké ztráty magnetického pole oproti využití čistě vzduchových cívek. Návazná práce by se také měla zabývat efektivnějším odvodem tepla z motoru, jelikož motor se při větší zátěži rychle zahřívá. Teplota motoru byla nejvíce omezujícím prvkem při provádění všech vysoko výkonových měření.

Elektroakustický měnič s lineárním motorem se stává nedílnou součástí kategorie elektrodynamických měničů. Od konvenčních měničů má velice odlišné parametry, které se dají využít pro spoustu akustických aplikací. Doufám, že elektroakustické měniče s lineárním motorem budeme ve vědním oboru elektroakustiky potkávat stále častěji.

## Literatura

- [1] LASTRUCCI, Claudio. POWERSOFT S.P.A. *A Novel Moving Magnet Linear Motor: AES Convention Paper 9060* [online]. 2014, 8 s. Dostupné také z: <https://www.powersoft.com/wp-content/uploads/2019/01/AES-136th-Convention-Paper-9060-A-Novel-Moving-Magnet-Linear-Motor.pdf>. Prezentováno na 136. konvenci AES v dubnu roku 2014.
- [2] LASTRUCCI, Claudio. *ELECTROMECHANICAL CONVERSION SYSTEM WITH MOVING MAGNETS; ACOUSTIC DIFFUSER COMPRISING SADDLE SYSTEM AND A MOVING MEMBER THAT GENERATES SOUND WAVES: patent*. US 8,861,776 B2. Uděleno říjen 2014.
- [3] *AES Milan 2018 Presenter or Author: Claudio Lastrucci* [online]. In: AUDIO ENGINEERING SOCIETY, INC. [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://www.aes.org/events/144/presenters/?ID=7034>
- [4] ŠKVOR, Zdeněk. *Elektroakustika a akustika: vysokoškolská učebnice*. V Praze: České vysoké učení technické, 2012. ISBN 978-80-01-05034-7.
- [5] 1925 Chester Rice & Edward Kellogg, General Electric Co. Modern Dynamic Loudspeaker. *MIX magazine* [online]. 2007. Dostupné z: <https://www.mixonline.com/technology/1925-chester-rice-edward-kellogg-general-electric-co-modern-dynamic-loudspeaker-377962>
- [6] RICE, Ch.W. a E.W. KELLOGG. Dynamic Loudspeaker, 1924. In: *Google Arts & Culture* [fotografie]. Schenectady - Schenectady County - New York: General Electric Company, 1924. Dostupné z: <https://g.co/arts/91fGMzsuN6gy8FLM7>
- [7] REICHL, Jaroslav. Elektrodynamický reproduktor. In: *Encyklopedie fyziky: Elektroakustika* [online]. [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/index.php/main/article/view/400-elektrodynamicky-reproduktor>
- [8] Lineární motory. In: <http://www.moogbrno.cz> [online]. b.r. [cit. 2018-09-29]. Dostupné z: [http://www.moogbrno.cz/mt-content/uploads/2017/09/cz\\_linobecne\\_020909.pdf](http://www.moogbrno.cz/mt-content/uploads/2017/09/cz_linobecne_020909.pdf)
- [9] BOLDEA, Ion. *Linear Electric Machines, Drives, and MAGLEVs Handbook*. USA, Florida, Boca Raton: CRC Press, 2013. ISBN 9781439845141.
- [10] BARRETT, J.; HARNED, T.; MONNICH, J.: *Linear motor basics* [online]. Parker Hannifin Corporation, 2018, dostupné z: <http://www.parkermotion.com/whitepages/linearmotorarticle.pdf>.

- [11] CHEVAILLER, Samuel, JUFER, Marcel, ed. *Comparative study and selection criteria of linear motors* [online]. In: . 2006, s. 239 [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: doi:10.5075/epfl-thesis-3569
- [12] Linear Motor Systems: Iron Core, U-Channel, and Tubular Linear Motors. *Nippon Pulse America, Inc* [online]. [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: <https://www.nipponpulse.com/learning/white-papers/linear-motor-systems-iron-core-u-channel-and->
- [13] LF18X400: datasheet. *RCF S.P.A.* [online]. 2022 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://www.rcf.it/en/products/product-detail/lf18x400>
- [14] M-Force 301P02: datasheet. *Powersoft S.p.A.* [online]. [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://www.powersoft.com/en/products/transducers/m-system/m-force-301p02/>
- [15] ŠERÝ, Martin. *Vlastnosti permanentních magnetů*. Plzeň, 2013. Diplomová práce. Fakulta elektrotechnická Západočeské univerzity v Plzni. Vedoucí práce Ing. Karel Hruška Ph.D.
- [16] EMS: Popis produktu. *Autodesk.com* [online]. [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://apps.autodesk.com/INVNTOR/en/Detail/Index?id=2875282000174075270>
- [17] Neodymový magnet kvádr 100x10x3 N 80 °C, VMM5-N38: stránka produktu. *Magsy s.r.o.* [online]. [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://eshop.magsy.cz/neodymovy-magnet-kvadr-100x10x3-n-80-c-vmm5-n38/>
- [18] JAROLÍM, Karel. *Elektrotechnické tabulky pro střední průmyslové školy*. 2. vyd. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1961. ISBN 978-80-7196-507-7.
- [19] Autodesk® Inventor®. *Autodesk, Inc.* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://www.autodesk.cz/products/inventor/>
- [20] STL. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/STL>
- [21] Slic3r (PrusaSlicer). In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Slic3r>
- [22] DICKASON, Vance. *Loudspeaker Design Cookbook*. 7th edition. Peterborough (New Hampshire): Audio Amateur Press, 2006. ISBN 1-882580-47-8.
- [23] ŠKVOR, Zdeněk. *Elektroakustika - Měření II.: skripta pro studenty fakulty elektrotechnické*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 1983, 153 s.