

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh lineárního kompresoru

Originál (kopie) zadání BP/DP

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na vývoj nového typu lineárního pístového kompresoru pro speciální použití. Hlavními cíli této práce jsou konstrukce prototypu a snaha o optimalizaci jeho chodu na základě simulování, zkoušení a měření jednotlivých uspořádání jeho akčního členu. Dalším cílem je shromáždění teorie pro návrh a realizaci obdobných pohonů.

Klíčová slova

Lineární kompresor, cívka, komprese vzduchu, permanentní magnet, translační pohyb.

Abstract

The bachelor thesis is focused on the design of a new type of linear reciprocating air compressor for special applications. The main objectives of this work are design of a prototype and optimization of its operation based on simulating, testing and measurement of its variously designed actuator. Another aim is to collect theories for the design and implementation of similar drives.

Key words

Linear compressor, coil, air compression, permanent magnet, translational motion.

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 8.6.2015

Pavel Štěpánek

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Vladimíru Kindlovi, Ph.D. za cenné profesionální rady a spolupráci.

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	8
INDEXY	9
ÚVOD	10
1 TEORIE PRO NÁVRH KOMPRESORU	11
1.1 KOMPRESORY	11
1.2 AKTUÁTORY A CÍVKOVÁ DĚLA	12
1.2.1 <i>Aktuátory</i>	12
1.2.2 <i>Cívková děla</i>	12
1.3 MIKROKONTROLÉRY	13
1.4 LVDT	14
1.5 SOFTWAREVÉ PROSTŘEDKY MATEMATICKÉHO MODELOVÁNÍ	15
1.5.1 <i>MATLAB</i>	15
1.5.2 <i>Agros 2D a FEMM</i>	16
1.6 PULZNÍ ŠÍRKOVÁ MODULACE	17
1.7 NEODYMOVÉ PERMANENTNÍ MAGNETY	18
2 NÁVRH A PROBLEMATIKA LINEÁRNÍHO KOMPRESORU	19
2.1 VÝZNAM LINEÁRNÍHO KOMPRESORU	19
2.2 PRINCIP POHYBU	19
2.3 NÁVRH LINEÁRNÍHO KOMPRESORU	21
2.3.1 <i>Návrh konstrukce a magnetu</i>	21
2.3.2 <i>Návrh hlavní cívky</i>	22
2.3.3 <i>Návrh a funkce řídicího obvodu</i>	31
2.4 PŘECHODOVÉ DĚJE HLAVNÍ CÍVKY	33
2.5 PROBLEMATIKA SNÍMÁNÍ POLOHY PÍSTU	35
2.6 ŘÍZENÍ A REGULACE VÝKONU	35
3 REALIZACE PROTOTYPU LINEÁRNÍHO KOMPRESORU	37
3.1 KONSTRUKCE LINEÁRNÍHO KOMPRESORU TYPU A	37
3.1.1 <i>Konstrukce statoru</i>	37
3.1.2 <i>Konstrukce pístu</i>	37
3.2 KONSTRUKCE LINEÁRNÍHO KOMPRESORU TYPU B	38
3.2.1 <i>Konstrukce statoru</i>	38
3.2.2 <i>Konstrukce pohyblivé části kompresoru</i>	38
3.3 KONSTRUKCE ŘÍDICÍHO OBVODU	39
ZÁVĚR	40
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	42
PŘÍLOHY	43

Seznam symbolů a zkratek

B	Magnetická indukce [T]
$d\vec{l}$	Element dráhy
$d\vec{S}$	Element plochy
H	Intenzita magnetického pole [$A \cdot m^{-1}$]
I	Proud [A]
L	Indukčnost [H]
n	Látkové množství [mol]
N	Počet závitů [-]
p	Tlak [Pa]
P	Příkon kompresoru [W]
R	Elektrický odpor [Ω]
R	Molární plynová konstanta [$J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$]
t	Čas [s]
U	Napětí [V]
V	Objem [m^3]
\dot{V}	Výkonost kompresoru [$m^3 \cdot s^{-1}$]
ϕ	Magnetický indukční tok [Wb]
π	Tlakový poměr [-]
μ	Permeabilita [$H \cdot m^{-1}$]
Agros 2D.....	Program
DPS	Deska plošného spoje
FEMM.....	Finite element method magnetics (program)
MATLAB.....	Matrix laboratory
NdFeB	Permanentní magnet (neodym-železo-bor)
OZ	Operační zesilovač
RAM	Random access memory (paměť s přímým přístupem)
ROM	Read only memory (paměť pouze pro čtení)
THT.....	Through hole technology

Indexy

- c* Celkový
- ef* Efektivní
- i* Indukované

Úvod

Tato práce je zaměřena na vývoj nového typu lineárního pístového kompresoru malého výkonu. Akční člen lineárního kompresoru je obdobou aktuátoru nebo cívkového děla (coil gun) s tím rozdílem, že vnitřní pohyblivé ocelové jádro je nahrazeno axiálně zmagnetovaným permanentním magnetem. Hlavním parametrem k navrhování tohoto celku je energie přenesená z cívky na píst konstruovaný z NdFeB magnetů za jeden kompresní cyklus (0.1 s), která je nutná k potřebné kompresi vzduchu a následnému vrácení pístu do počáteční polohy. Velikost této energie by měla být alespoň 1.5 J. Kompresor by měl být schopen bez zátěže stlačovat vzduch o objemu 0.1 l alespoň desetkrát za sekundu. Celý systém je navrhován tak, aby mohl být v budoucnosti přenosný.

Text je rozdělen do tří částí. V první části je popsána doposud známá teorie použitá pro návrh, simulaci, konstrukci, regulaci, měření polohy lineárního kompresoru. Druhá část je věnovaná návrhu jednotlivých částí lineárního kompresoru, principu jeho funkce, řízení a regulace. Ve třetí části je popis konstrukce jednotlivých prototypů a konstrukce řídicího obvodu.

1 Teorie pro návrh kompresoru

1.1 Kompresory

Kompresory slouží obecně jako stroje k stlačování plynných látek v uzavřeném prostoru. Z funkčního hlediska se kompresory dají rozdělit na objemové a rychlostní. Objemové kompresory pracují na principu zmenšování uzavřeného prostoru, například pístem nebo membránou, a tím stlačují nasátý vzduch. Rychlostní kompresory (turbokompresory) urychlují nasátý vzduch, jehož kinetická energie je následně v difuzoru měněna na tlak. Podle konečného tlaku se dají kompresory rozdělit na nízkotlaké (do 2.5MPa), středotlaké (2.5 až 10 MPa) a vysokotlaké (nad 10 MPa). Dále se kompresory dají rozdělit například podle počtu stupňů, typu chlazení, plynotěsnosti, typu pohonu, dodávky množství plynu nebo přenosnosti. Tato práce je věnována pouze nízkotlakým objemovým kompresorům velmi malých výkonů, které stlačují vzduch.

Základní vztahy pro charakterizaci kompresoru jsou:

- **tlakový poměr** π je poměr výtlačného tlaku p_v k tlaku sacímu p_s $\pi = \frac{p_v}{p_s}$ (1)
- **výkonnost** \dot{V} je vytlačovaný objem plynu za určitý čas $\dot{V} = \frac{V}{t}$ (2)
- **příkon** P_{ef} je například příkon na hřídeli kompresoru nebo spotřeba pracovní páry proudového kompresoru.

Při malých výtlačných tlacích je možno pro děje v kompresoru uplatnit stavovou rovnici ideálního plynu. [1]

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (3)$$

1.2 Aktuátory a cívková děla

1.2.1 Aktuátory

Za aktuátor je považováno zařízení, které převádí vstupní (řídící, informační) veličinu na výstupní mechanickou veličinu. Aktuátorů je v dnešní době vyráběna celá řada. Liší se od sebe především fyzikální podstatou vstupní veličiny. Vstupní veličina rozhoduje o celkovém technickém uspořádání a principu přeměny energie. Svou technickou podstatou se dají rozdělit do čtyř hlavních skupin:

- *elektromechanické* (vstupní veličinou je elektrické napětí nebo proud),
- *pneumatické* (vstupní veličinou je tlak plynu),
- *hydraulické* (vstupní veličinou je tlak kapaliny),
- *speciální* (vstupní veličinou je například světlo, nebo teplo).

Tato práce je zaměřena pouze na elektromechanické lineární aktuátory pracující na elektromagnetickém principu. Ty jsou v dnešní době používány ve všech možných odvětví průmyslu. Principem přenosu energie elektromagnetických aktuátorů je silové působení feromagnetika nebo permanentního magnetu na magnetické pole, které vytváří cívka. Typickým příkladem takového aktuátoru je elektrodynamický reproduktor. Podle vstupního elektrického signálu, jenž je přiváděn do cívky, se elektromechanické aktuátory dají rozdělit na stejnosměrné a střídavé. [3] [10]

1.2.2 Cívková děla

Cívková děla (coil guns, gauss guns) jsou speciálním typem elektromechanických aktuátorů, které nemají vnější magnetický plášť. Jejich základem je cívka navinutá na hlavni z nemagnetického a elektricky nevodivého materiálu, do které se z nabitého kondenzátoru přivádí elektrický proud (většinou pomocí impulzních transformátorů).

V jádře je uložen feromagnetický projektil, ve kterém se při změně okolního magnetického pole indukují vířivé proudy, které zapříčiní vznik magnetického pole v okolí projektilu a následně jeho translační pohyb směrem do středu cívky. Účinnost přenosu elektrické energie z cívky na kinetickou energii projektilu je proměnná v závislosti na poloze projektilu. Tento typ aktuátoru je významný svou vysokou kinetickou energií projektilu. Ve vícestupňovém provedení může projektil opouštět hlaveň s rychlostí větší jak $1000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

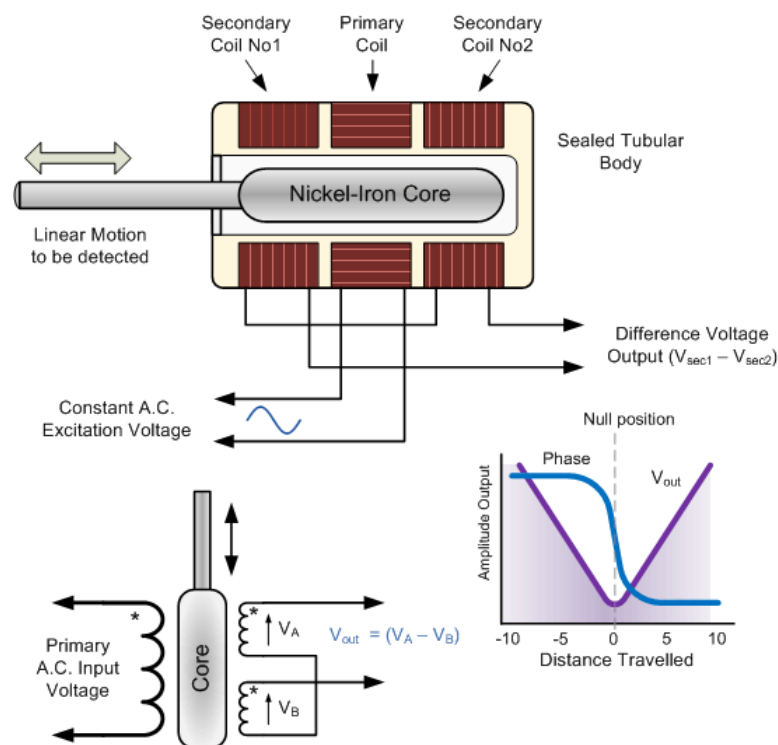
1.3 Mikrokontroléry

Mikrokontroléry jsou jednočipové počítače, které jsou jako celek integrované v jednom monolitickém pouzdře. Jejich programováním můžeme jednoduše realizovat složité elektronické obvody. Mikrokontroléry jsou multifunkční, velmi spolehlivé a zpravidla se používají pro jednoúčelové aplikace typu řízení, měření, regulace apod. Dnes se s nimi můžeme setkat prakticky ve všech odvětvích průmyslu a spotřební elektroniky. Základní strukturu mikropočítače můžeme rozdělit na:

- **procesor** - řídí téměř veškerou činnost celku jako je zpracování dat z paměti, uskutečnění instrukcí dle programu, řízení činnosti sběrnice,
- **paměť programu** - zahrnuje instrukce, kterými je realizována správná činnost počítače. Neměnné programy, konstanty a tabulky se ukládají do paměti typu ROM. Naopak často měnící se programy se ukládají do paměti typu RAM,
- **paměť dat** - zahrnuje dočasně uložená data získaná ze vstupních obvodů (zásadně typu RAM),
- **periferní obvody** - zajišťují komunikaci počítače s okolím, vždy zahrnují vstupní a výstupní obvody. Většinou obsahují i širokou škálu speciálních jednotek jako jsou například A/D, D/A převodníky, časovače apod. [5]

1.4 LVDT

LVDT (linear variable differential transformer) je typ rozdílového transformátoru, který se používá například pro měření polohy lineárního posuvu. Jedná se o dvě měřicí (sekundární) cívky stejných parametrů navinuté ve stejné vzdálenosti před a za hlavní cívku. Měřicí cívky jsou zapojeny anti-sériově a na zbývajících vývodech se měří rozdíl napětí transformovaného z hlavní cívky (primární). Hlavní cívka je napájena ze střídavého zdroje o frekvenci $1 \div 10$ kHz. Pokud jsou měřicí cívky správně navinuty a hlavní cívkou protéká jakýkoliv nekonstantní proud, transformuje se do obou měřících cívek napětí stejné velikosti, ale opačné polarity a na jejich koncích naměříme nulové napětí. Po umístění jádra do cívky dojde k ovlivnění indukčnosti měřících cívek v závislosti na poloze jádra. Pokud je jádro přesně ve středu hlavní cívky, indukčnost obou měřících cívek je stejná a rozdíl transformovaného napětí je nulový. Při oddalování jádra od středu hlavní cívky dojde ke snížení indukčnosti jedné cívky a ke zvýšení indukčnosti druhé v závislosti na směru pohybu. Rozdíl měřeného napětí tak bude nenulový. Velikost měřeného napětí je úměrná posuvu jádra a fáze udává směr pohybu. Tato metoda je známá svou vysokou spolehlivostí z důvodů bezkontaktního měření. Princip LVDT je znázorněn na obr. 1.1. [10]



Obr. 1.1 Princip LVDT [7]

1.5 Softwarové prostředky matematického modelování

1.5.1 MATLAB

MATLAB (matrix laboratory) je programovací prostředí vyvíjené společností MathWorks, které slouží pro vědecko technické účely, výpočty, simulace apod. První placená verze programu MATLAB pro PC byla uvedena na trh v roce 1985. Od té doby je neustále vyvíjen. V dnešní době je MATLAB vysoce výkonným nástrojem používaným v mnoha odvětvích průmyslu pro analýzu a výzkum nebo například jako výukový nástroj pro řešení pokročilé matematiky. Struktura programu MATLAB je rozdělena do pěti hlavních částí:

- *vývojové prostředí,*
- *knihovna matematických funkcí,*
- *jazyk MATLAB,*
- *grafika,*
- *rozhraní MATLAB.*

Za základní vlastnosti systému MATLAB lze považovat to, že všechny objekty v programu jsou považovány za matice a jednotlivé proměnné není třeba deklarovat. Deklarace velikosti a typu proměnných je dána při prvním použití proměnné v samotném programu, poté jsou změny parametrů proměnných upravovány automaticky. Vytvořené programy jsou ukládány jako soubory s příponou *. m nazýváme je „m-files“. [4]

1.5.2 Agros 2D a FEMM

Agros 2D a FEMM (finite element method magnetics) jsou do značné míry velmi podobné programy pro modelování fyzikálních polí včetně důsledků, které samotná pole vyvolávají. Za předpokladu správných vstupních dat se jimi dá modelovat například elektrostatické, magnetické, proudové nebo teplotní pole. Základní struktura těchto programů je v obou případech téměř stejná, dá se rozdělit do tří hlavních skupin:

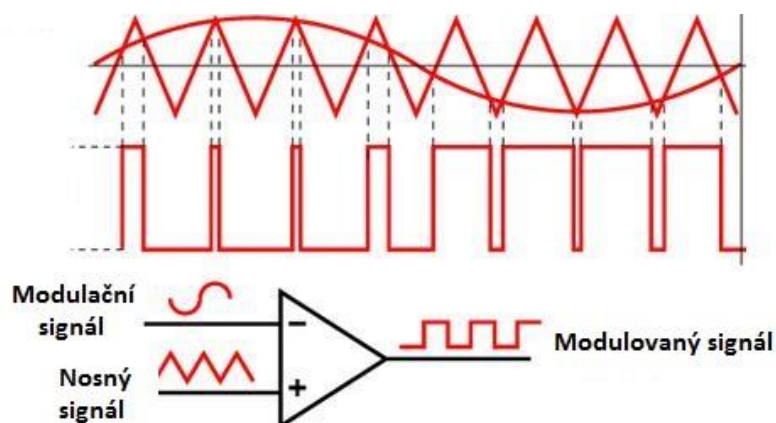
- **preprocesor** zpracovává veškerá vstupní data řešeného modelu, tak jak jsou mu zadána uživatelem. Jeho výstupní data jsou vstupními daty pro procesor. Vstupními daty jsou například geometrické údaje, hodnoty hraničních podmínek, hodnoty materiálových charakteristik, veličiny budící řešené pole nebo diskretizace řešeného modelu,
- **procesor** zpracovává výstupní data preprocesoru, počítá numerické řešení daného problému a zkoumané veličiny v uzlech diskretizační sítě. Zkoumanými veličinami mohou být například skalární a vektorový elektrický nebo magnetický potenciál a teplota. Procesor má několik samostatných nezávislých modulů pro řešení různých typů úloh. Jeho výstupní data jsou vstupními daty pro postprocesor,
- **postprocesor** zpracovává výstupní data procesoru a zobrazuje je uživateli nejčastěji v grafické podobě, provádí „mapování pole“ (graficky znázorňuje rozložení ekvipotenciál, siločar a mnoha dalších údajů). V postprocesoru je možné dále pracovat s výsledky simulace, dopočítávat další zkoumané veličiny v rámci oblasti, hran, bodů apod. Dále je schopen exportovat výsledky v různých formátech. [3]

1.6 Pulzní šířková modulace

Pulzní šířková modulace (PWM – pulse width modulation) je často používanou diskrétní modulací přenášející analogový signál pomocí dvouhodnotového signálu. U PWM jsou určeny tři hlavní typy signálu:

- **modulační signál** je vstupní signál, který je modulován na nosný signál,
- **nosný signál** je vstupní periodický signál (většinou trojúhelníkový nebo pilový), který je modulován modulačním signálem,
- **modulovaný signál** (přenosový signál) je výstupním signálem modulátoru nesoucím zakódované informace, nabývá hodnot zapnuto nebo vypnuto. [6]

Základem takového PWM členu je komparátor, který porovnává hodnoty modulačního a nosného signálu. Modulovaný signál nabývá hodnoty zapnuto, pokud je okamžitá hodnota nosného signálu větší než okamžitá hodnota modulovaného signálu a naopak. Procentuální poměr zapnuto/vypnuto v jedné periodě nazýváme střídou, ta například běžně slouží k regulaci výkonu ve výkonové elektronice nebo v audiotechnice u zesilovačů třídy D. Střídu můžeme ovlivnit frekvencí a amplitudou nosného nebo modulačního signálu. Princip PWM s trojúhelníkovým tvarem nosného signálu je znázorněn na obr. 1.2.



Obr. 1.2 Princip pulzní šířkové modulace [9]

1.7 Neodymové permanentní magnety

Neodymové permanentní magnety jsou vyráběny spékáním směsi práškových kovů neodymu, železa a boru. Přesněji $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. Práškový polotovar je před i během spékání silně magnetizován. NdFeB magnet je v současné době nejsilnějším typem magnetu na trhu. Díky svým výborným magnetickým vlastnostem nacházejí NdFeB magnety uplatnění v široké řadě aplikací. Tyto magnety se vyznačují především vysokou remanencí. Díky své vysoké koercivitě jsou NdFeB magnety velmi odolné vůči působení vnějšího demagnetizačního pole. Samotný sintrový materiál velmi snadno koroduje, proto se u magnetů provádí povrchová úprava. Tato úprava se je nejčastěji realizována nanášením tenké vrstvy niklu, zinku nebo pryskyřice na povrch magnetu. Dalším způsobem je například plastem pojený magnet. Jedná se o směs polyamidu a materiálu NdFeB s obsahem pryskyřice v poměru do max. 1:5. Tento typ NdFeB magnetu je mechanicky odolnější v závislosti na obsahu pryskyřice ve směsi. NdFeB magnety mají obecně lepší mechanické vlastnosti než ostatní feritové magnety, ale i tak jsou stále křehké. Při silném nárazu může dojít k mechanickému poškození povrchové vrstvy nebo k úplné destrukci. Oproti ostatním typům mají NdFeB magnety ve většině provedení mnohem nižší teplotu ($80\div 130\text{ }^\circ\text{C}$), při které začíná materiál ztrácet své magnetické vlastnosti.

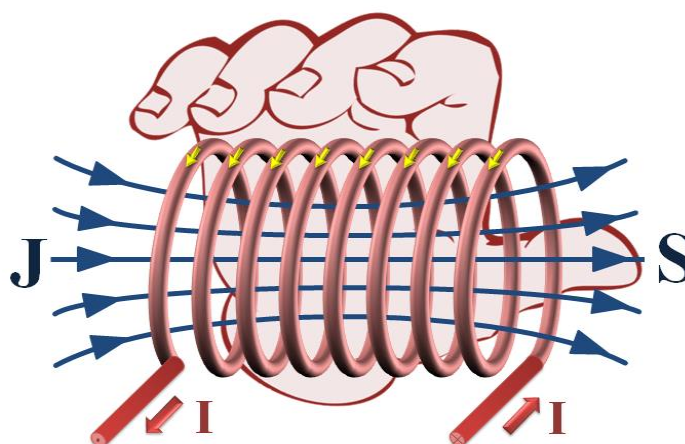
2 Návrh a problematika lineárního kompresoru

2.1 Význam lineárního kompresoru

V dnešní době je na trhu mnoho různých typů objemových kompresorů. Všechny jsou navrhovány a realizovány pro konkrétní účely. Například membránový vzduchový kompresor pro okysličování vody v akváriu nebo pístový kompresor pro huštění pneumatik. Tyto kompresory se skládají z mnoha různých funkčních částí, které jsou prostorově náročné a jejich minimalizace do válcového tvaru je prakticky nemožná. Akční člen lineárního kompresoru popisovaný v předkládané práci je navrhován právě tak, aby mohl být uložen a pracovat v cylindrickém prostoru o maximálním průměru 26 mm a maximální délce 200 mm. Lineární kompresor je nezbytné ovládat řídicím obvodem v podobě plošného spoje a napájet z akumulátoru. Řídicí obvod i akumulátor jsou uloženy mimo prostor vyhrazený pro akční člen.

2.2 Princip pohybu

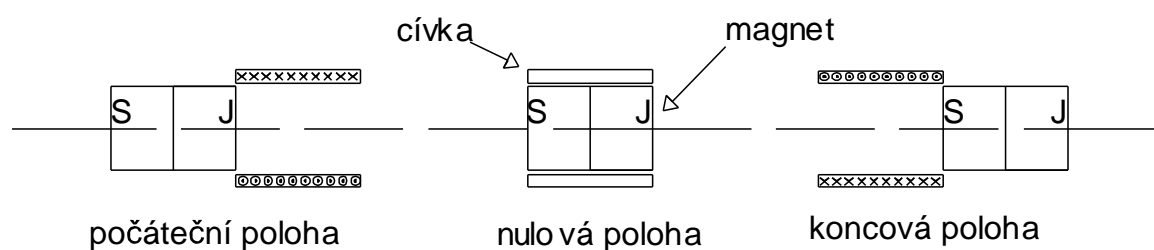
Magnetické pole uvnitř reálné solenoidové cívky, kterou protéká stejnosměrný proud, je téměř homogenní. Jeho náčrt je znázorněn na obr. 2.1. Směr indukčních čar v jádře je dán ampérovým pravidlem pravé ruky. Směr indukčních čar permanentního magnetu je dán jeho prvotní magnetizací. NdFeB magnet, uložený v jádře cívky lineárního kompresoru, je zmagnetizován axiálně. Princip pohybu magnetu v jádře cívky spočívá ve spínání cívky v závislosti na poloze magnetu. Permanentní magnet má neměnnou orientaci magnetického pole, které kolem sebe vytváří. Při průchodu proudem cívkou se v okolí cívky vytvoří magnetické pole, které deformuje pole magnetu. Jelikož jsou cívky pevně navinuty na válci a nemohou se hýbat, působí na magnet uvnitř cívky síla, která zapříčiní jeho translační pohyb. Velikost a směr síly závisí na mnoha parametrech. Mezi nejvýznamnější patří poloha magnetu vztahovaná ke středu hlavní cívky, velikost proudu protékaného cívkou, počet vrstev a závitů cívky, rozměry cívky, magnetu a vodiče.



Obr. 2.1 Solenoidová cívka protékána stejnosměrným proudem [8]

Polaritu proudu v cívce lze například pomocí H-můstek řídit v obou směrech, z čehož vyplývá, že píst s permanentními magnety může být magnetickým polem cívky vtahován do středu cívky nebo vytlačován ze středu ven, v závislosti na polaritě proudu protékajícího cívkou a poloze magnetu. Princip pohybu pístu lze rozdělit do tří skupin:

- **pohyb tlakem** (pohyb magnetu je zapříčiněn vznikem magnetického pole uvnitř cívky, které má takovou orientaci, že tlačí magnet z cívky ven),
- **pohyb tahem** (pohyb magnetu je zapříčiněn vznikem magnetického pole uvnitř cívky, které má takovou orientaci, že táhne píst do středu cívky),
- **kombinovaný pohyb** (pohyb magnetu je zapříčiněn kombinací pohybu tlakem a tahem pomocí změny orientace proudu v cívce, jeho princip je znázorněn na obr. 2.2).



Obr. 2.2 Princip kombinovaného pohybu

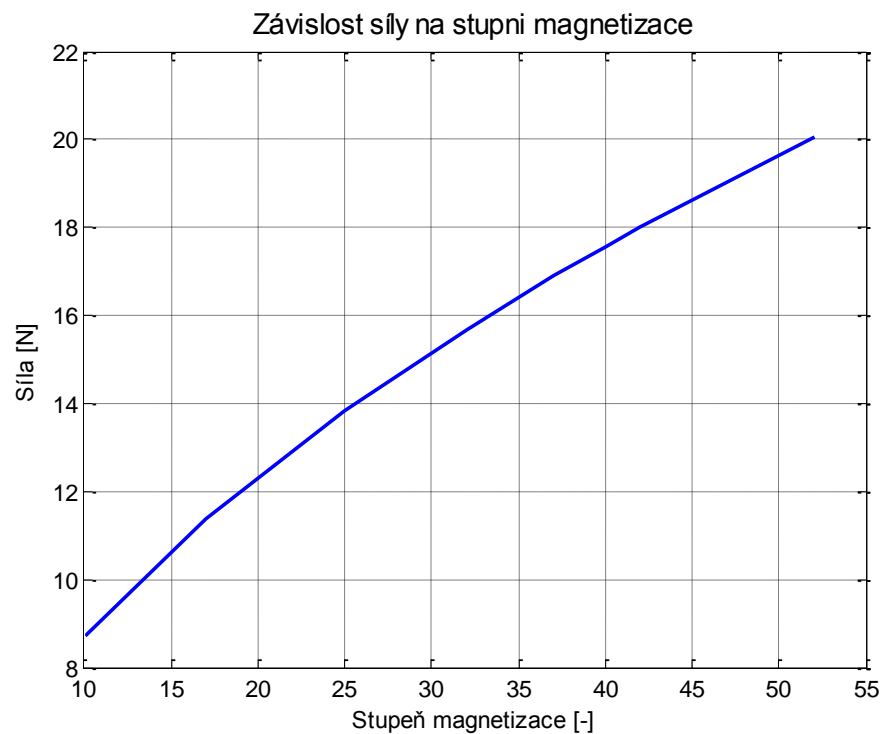
2.3 Návrh lineárního kompresoru

2.3.1 Návrh konstrukce a magnetu

Základem konstrukce celého prototypu je trubka z elektricky nevodivého materiálu, na které je navinutá hlavní cívka, v níž je uložen volně permanentní magnet. Od trubky je požadována co nejmenší tloušťka její stěny a co nejlepší mechanické vlastnosti (tvrdost, pevnost, teplotní stabilita). Z důvodu nedostupnosti konkrétních rozměrů magnetů a běžně dostupných normovaných trubek bude prototyp vytvořen z laminátové trubky vlastní výroby o rozměrech, které závisí na rozměrech magnetu. Magnet bude vybrán z úzkého, běžně dostupného sortimentu. Zde popisovaný návrh je pro lineární kompresor typu B, který je popsán v kapitole 3.

Pro výběr stupně magnetizace permanentního magnetu je vytvořena simulace pomocí programů FEMM a MATLAB, která má objasnit závislost velikosti síly působící na magnet při konstantní poloze magnetu, konstantním proudem a proměnném stupni magnetizace. Její výsledek je na obr. 2.3 a soubory potřebné jsou na CD a v příloze A. Pro každý stupeň magnetizace je blokovou integrací ve výstupním souboru programu FEMM vypočtena síla, která působí na magnet ve směru osy z. Data jsou ukládána do textového souboru a následně načtena a zpracována v programu Matlab.

Z grafu na obr. 2.3 je vidět, že velikost síly působící na magnet roste téměř lineárně se zvyšujícím se stupněm magnetizace, z čehož vyplývá, že je vhodné zvolit magnet s co největším stupněm magnetizace. Dle vybraného kruhového magnetu (od firmy Unimagnet s.r.o) o parametrech 20 mm vnější průměr, 8 mm vnitřní průměr, 15 mm délka, stupeň magnetizace N42, maximální pracovní teplota 80 °C, je vytvořena laminátová trubka o rozměrech 20.5 mm vnitřní průměr, 22.5 mm vnější průměr. Z důvodů nedostupnosti magnetů budou spojeny dva výše popsané magnety do série. Délka celkového magnetu bude 30 mm. Detailní popis celého prototypu je popsán v kapitole 3.



Obr. 2.3 Závislost síly na stupni magnetizace při konstantní poloze magnetu

2.3.2 Návrh hlavní cívky

V tomto případě je navrhován kompresor, jenž bude za jeden kompresní cyklus stlačovat vzduch v cylindrickém prostoru o vzdálenosti 6 cm, průměru 24 mm a výkonosti 1.08 l/s. Délka magnetu bude stejně velká jako délka jedné hlavní cívky. Akční člen musí být schopen posunout magnet o 6 cm desetkrát za sekundu tam a zpět. Z obr. 2.2 je předpokladem, že magnet stejně dlouhý jako hlavní cívka je efektivně schopen urazit dvojnásobnou vzdálenost své délky. Na základě toho je zvolena délka hlavní cívky (3cm), tedy polovina z požadované vzdálenosti. Vnitřní průměr cívky je dán vnějším průměrem laminátové trubky, tedy 22.5 mm.

Pro orientační usnadnění návrhu cívek je vytvořena simulace v programu MATLAB, jejímž cílem je vypočítat jednotlivé parametry samotné solenoidové cívky bez jádra v ustáleném stavu, připojené ke stejnosměrnému zdroji napětí, při konstantní délce cívky, vnitřním průměru, počtu vrstev a proměnném průměru vodiče. Výstupem této simulace jsou jednotlivé grafy funkcí: $L=f(d)$, $R=f(d)$, $N=f(d)$, $H=f(d)$, $I=f(d)$, $\tau=f(d)$, $H=f(I)$. Její výsledky jsou na obr. 2.3÷2.9. Soubory potřebné jsou na CD a v příloze B.

Vypočítané parametry platí pro čtyřvrstvou cívku napájenou ze zdroje o velikosti 20 V. Proměnou této simulace je průměr vodiče, který je postupně inkrementován (0÷1 mm, po 0.001 mm). Pro každou jeho hodnotu jsou vypočítány parametry výše popsaných funkcí. Dle výše popsaných geometrických údajů je nejprve vypočítána délka vodiče a počet závitů cívky. Poté jsou následujícím pořadím vypočítány jednotlivé parametry: elektrický odpor cívky dle vztahu (4), magnetický odpor jádra dle vztahu (5), indukčnost cívky dle vztahu (6), proud protékající cívku v ustáleném stavu dle vztahu (7), intenzita magnetického pole dle vztahu (8), časová konstanta dle vztahu (9).

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (4)$$

$$R_m = \frac{l}{\mu S} \quad (5)$$

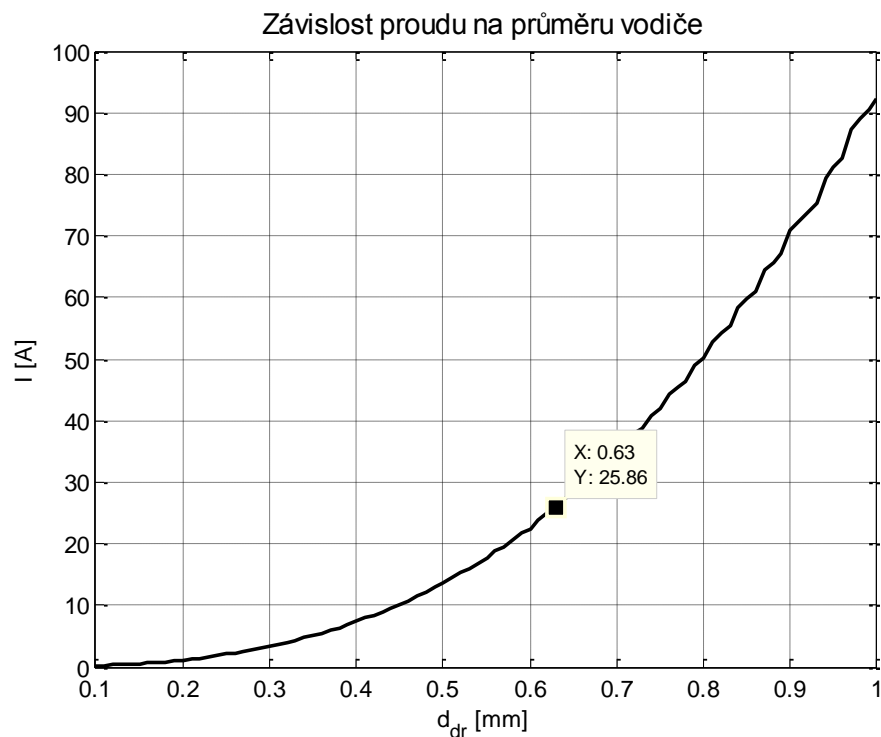
$$L = \frac{N^2}{R_m} \quad (6)$$

$$I = \frac{U}{R} \quad (7)$$

$$H = \frac{N \cdot I}{l} \quad (8)$$

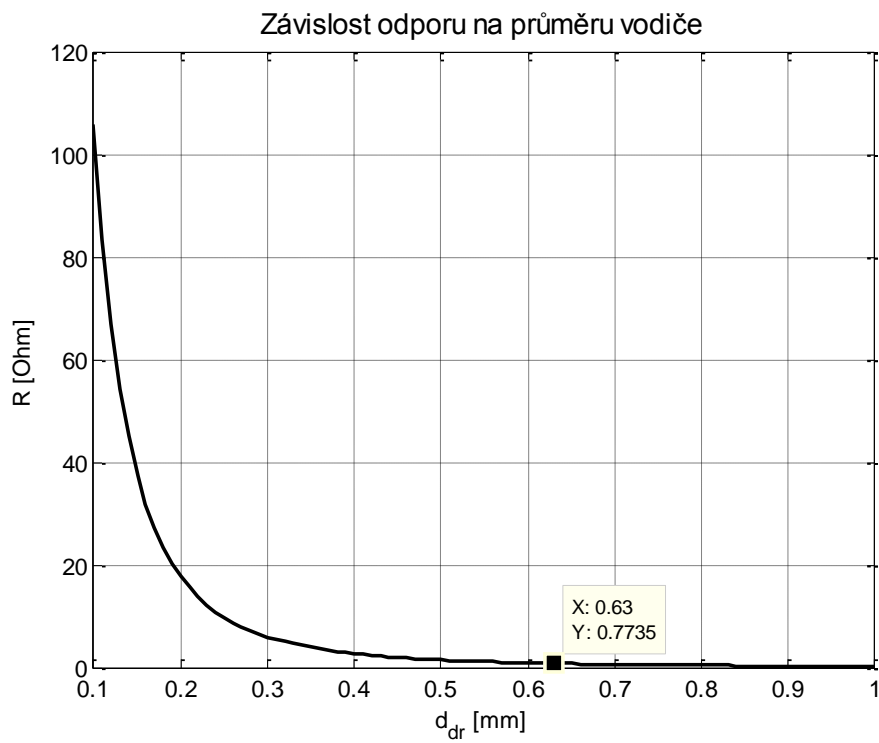
$$\tau = \frac{L}{R} \quad (9)$$

V Obr. 2.3 je navrhován průměr vodiče v závislosti na maximálním proudu, který může zdroj dodat nebo na proudu, podle kterého je navrhován řídicí obvod. Průměr vodiče 0.63 byl vybrán z důvodu vlastnictví značné zásoby tohoto materiálu. V grafu je kurzorem znázorněna velikost proudu pro daný průměr. Velikost tohoto proudu je dále použita v níže popsané simulaci statické charakteristiky.

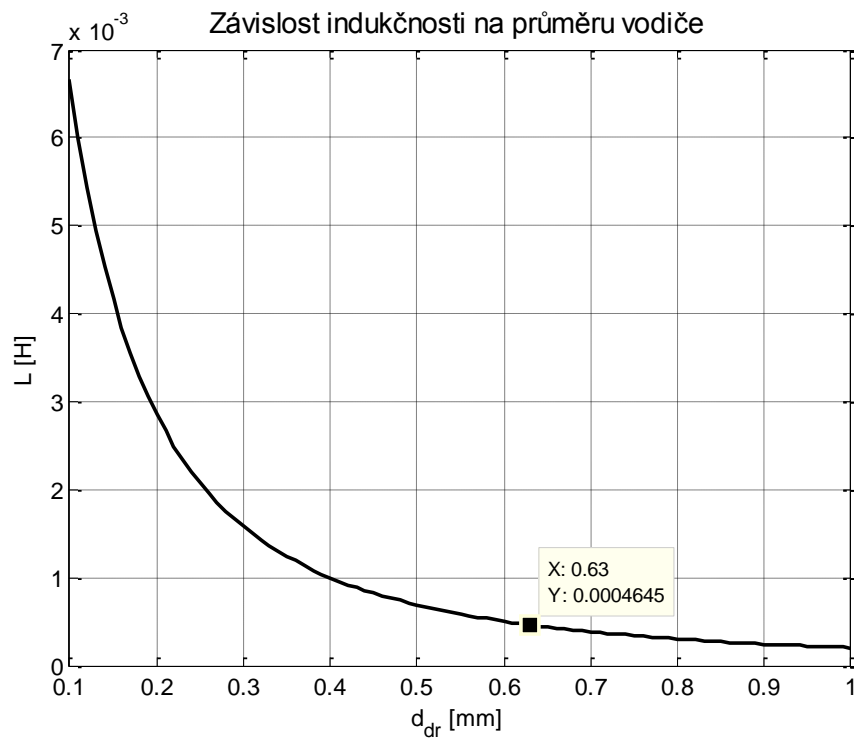


Obr 2.3 Závislost proudu na průměru vodiče

Obr. 2.4 ÷ 2.7 jsou pouze orientační. Hodnoty znázorněné kurzorem mohou být použity například pro simulování funkce řídicího obvodu v programu MULTISIM nebo pro simulování rozložení mag. pole v programech Agros 2D a FEMM.



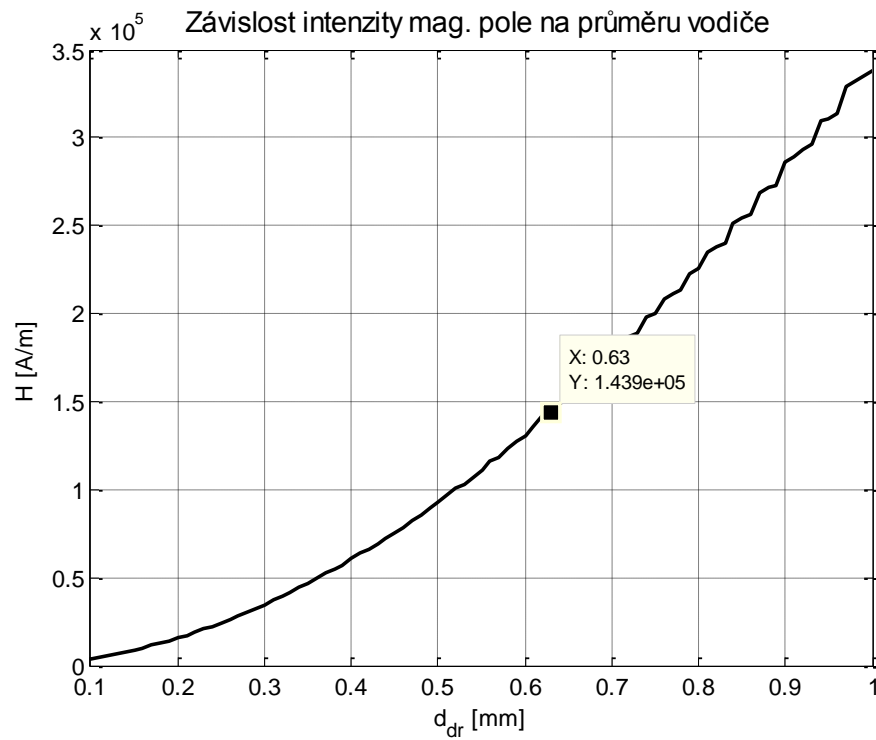
Obr 2.4 Závislost odporu na průměru vodiče



Obr 2.5 Závislost indukčnosti na průměru vodiče

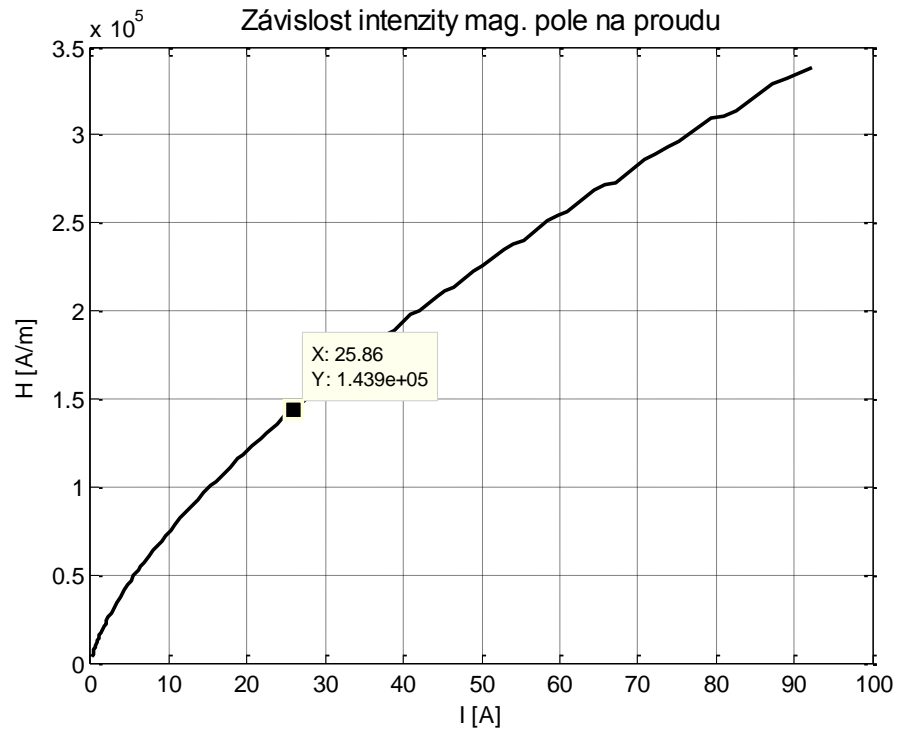


Obr 2.6 Závislost počtu závitů na průměru vodiče



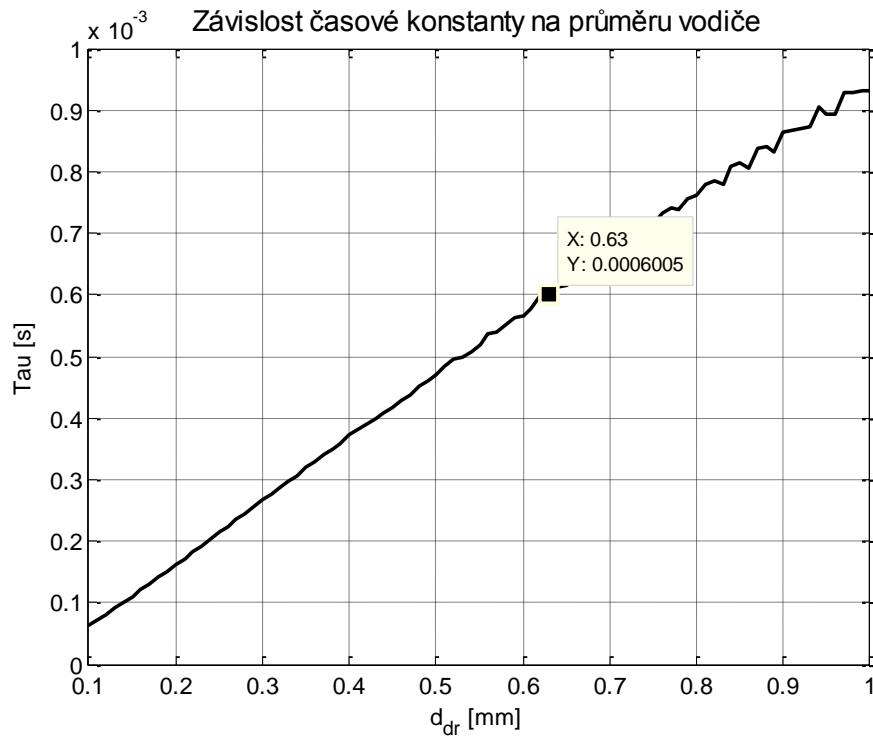
Obr 2.7 Závislost intenzity magnetické pole na průměru vodiče

Na obr 2.8 je graf funkce $H=f(I)$, která znázorňuje energetickou náročnost simulované cívky. Z grafu je vidět, že se zvyšujícím se proudem, závislým na průměru vodiče, roste intenzita mag. pole nelineárně. V oblasti největšího nárůstu intenzity mag. pole (v grafu 0.1 ÷ 15 A) je cívka energeticky výhodnější, než v oblasti nižšího nárůstu.



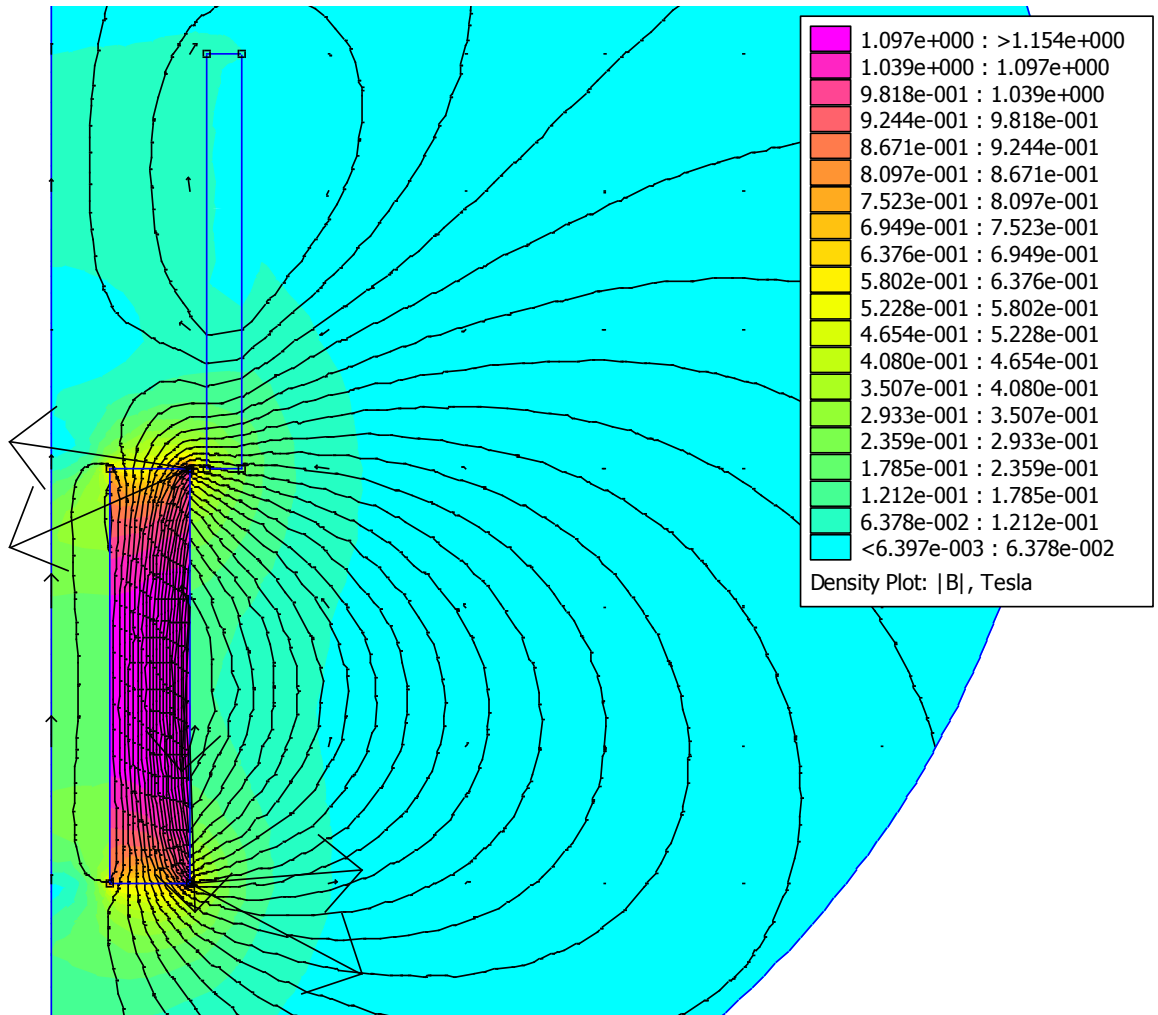
Obr 2.8 Závislost intenzity magnetické pole na proudu

Z obr 2.9 je pomocí kursoru odečtena hodnota časové konstanty, která je dále uvažována například pro výpočet času, za který se cívka nabije a vybije.



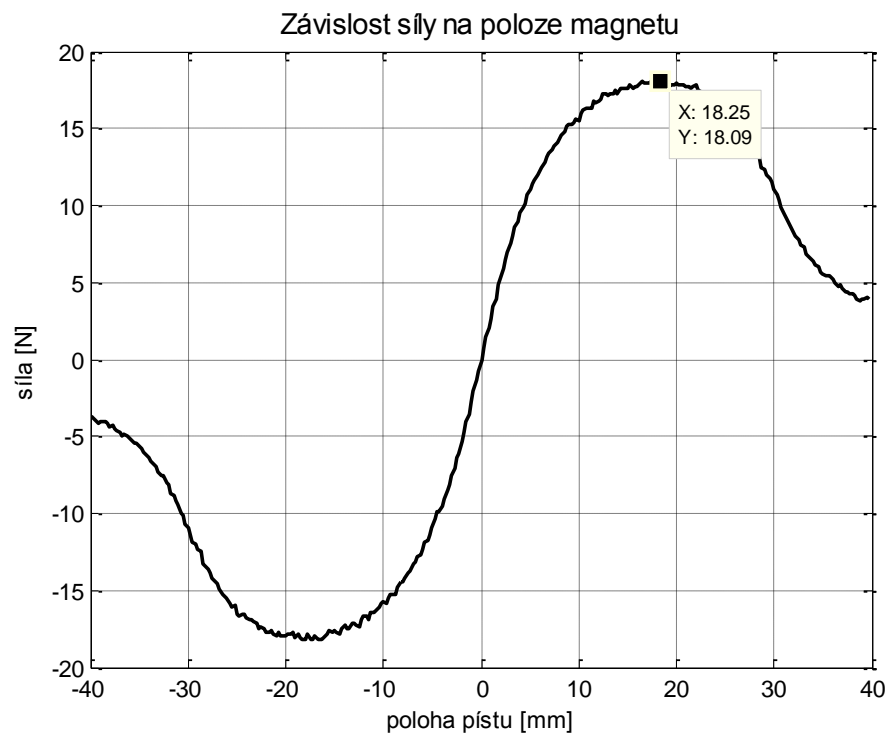
Obr 2.9 Závislost časové konstanty na průměru vodiče

Základním poznatkem pro návrh a aplikaci všech aktuátorů je sestavení statické charakteristiky, proto je vytvořena orientační simulace pomocí programů FEMM a Matlab, které mají za úkol objasnit velikost statické síly působící na magnet v závislosti na jeho poloze, při konstantním proudu protékáném hlavní cívkou. Její výsledky jsou na obr. 2.10 a 2.11 Příslušné soubory simulace jsou v příloze C a na CD. Magnet je pomocí Lua skriptu postupně posouván z polohy -40 mm do polohy + 40 mm. Pro každou jeho polohu je blokovou integrací ve výstupním souboru programu FEMM vypočtena síla, která působí na magnet ve směru osy z. Data jsou ukládána do textového souboru a následně načtena a zpracována v programem Matlab.



Obr 2.10 rozložení mag. pole v koncové poloze

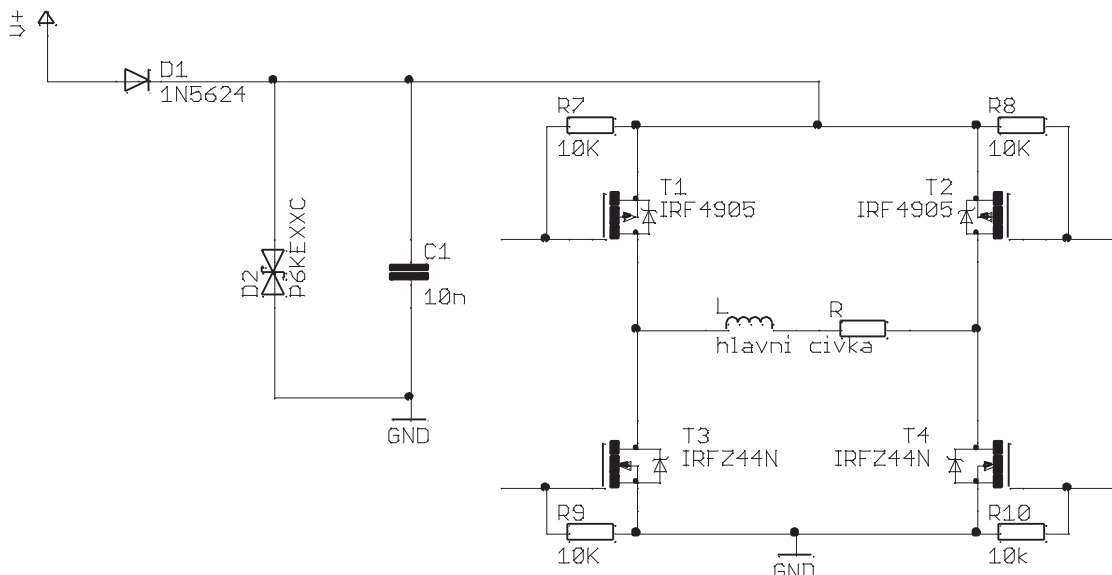
Na obr. 2.10 je znázorněno rozložení magnetického pole v koncové poloze, kdy cívka tlačí magnet ze svého středu ven. Stejný vstupní soubor (*.femm) byl použit i pro simulaci návrhu stupně magnetizace, který je na obr. 2.3.



Obr 2.11 Závislost síly působící ve směru osy z na poloze magnetu

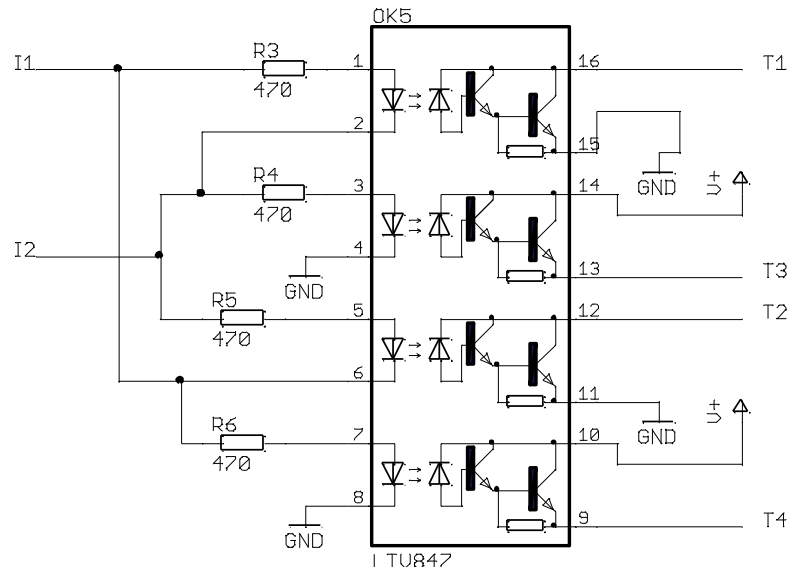
Na obr. 2.11 je znázorněna velikost síly v závislosti na poloze magnetu. V jejích špičkách očekáváme největší účinnost přenosu energie z elektrické na mechanickou. Poloha magnetu je vztahována ke středu cívky. V oblasti -30 a +30 mm se nacházejí inflexní body této funkce, za kterými účinnost přenosu energie exponenciálně klesá. Proto bude magnet pro kombinovaný pohyb využívat prostor v rozmezí -30 až +30 mm od středu hlavní cívky. Kursorem je znázorněna hodnota a poloha maximální možné síly působící na magnet.

2.3.3 Návrh a funkce řídicího obvodu



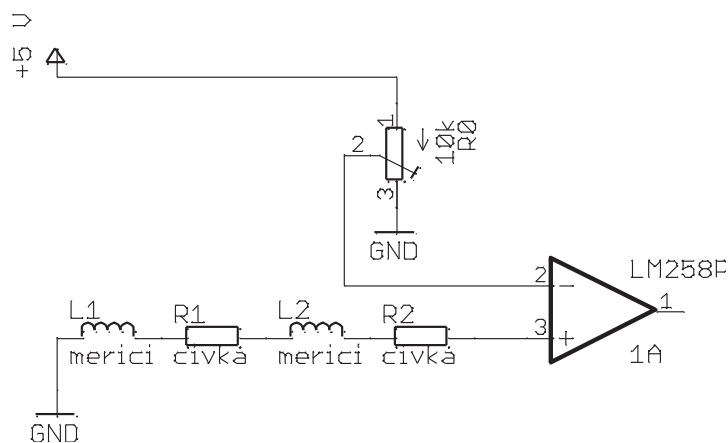
Obr. 2.12 Výkonová část řídicího obvodu

Základem řídicího obvodu je mikrokontrolér ATmega2560, který slouží k vyhodnocování polohy pístu, řízení a regulaci jednotlivých větví H-můstku složených z kombinace NPN a PNP unipolárních tranzistorů. Pokud chceme řídit proud v obou směrech, připadá jednu hlavní cívku právě jeden H-můstek. Volba správných tranzistorů je hlavním krokem ke konstrukci celého obvodu. Hlavními parametry tranzistorů jsou maximální napětí, proud a výkon, se kterými je tranzistor schopen pracovat. Tyto maximální parametry by měli být vždy vyšší než požadované pracovní parametry hlavní cívky, aby nedocházelo k přetěžování tranzistorů. V tomto případě je navrhován univerzální obvod, který by měl být schopen řídit veškeré zkušební vzorky lineárního kompresoru s maximálním napětím 30 V a trvalým proudem do 40A. V sérii s baterií je zapojená dioda, která zabraňuje dobíjení baterie při vybíjení hlavní cívky. Paralelně k baterii je zapojený transil s tranzientním napětím 27 V, který má za úkol svést přepětí vzniklé při vypínání hlavní cívky. Zároveň je paralelně k baterii zapojený kondenzátor, do kterého se vybíjí zbytek akumulované energie cívky po svedení přepětí transilem. Nabitý kondenzátor slouží při následujícím sepnutí jako krátkodobý zdroj energie pro cívku. Schéma výkonové části obvodu je na obr 2.12.



Obr. 2.13 Ovládací část řídicího obvodu

Jelikož je hradlo unipolárního tranzistoru izolované, vykazuje určitou kapacitu, která se ve spínacím režimu projeví. Proto je nutné zapojit vybíjecí odpor ($470 \Omega \div 10 \text{ k}\Omega$, v závislosti na požadovaném vybíjecím čase) mezi „GATE“ a „SOURCE“ každého unipolárního tranzistoru. Mikrokontrolér ATmega2560 pracuje s pěti-voltovou logikou. K plnému otevření tranzistorů IRFZ44N (NPN) a IRF4905 (PNP), které vyhovují všem požadovaným parametrům, je zapotřebí alespoň 9 V, proto je nutné do obvodu zapojit například optočlen LTV847, který umí pracovat na výstupu s větší napětovou hladinou a zajistí plné otevření tranzistorů. Před optočlen je nezbytné zapojit do série předřadný odpor ($200 \Omega \div 1 \text{ k}\Omega$, v závislosti na maximálním a minimálním proudu v propustném směru) pro omezení proudu protékajícího diodou optočlenu. Jiné řešení lze nalézt například pomocí budičů. Schéma ovládací části obvodu je na obr 2.13.



Obr. 2.14 Měřicí část řídicího obvodu

Rozdíl napětí na měřících cívkách je připojen na neinvertující vstup operačního zesilovače LM258P (komparátor), který porovnává měřené napětí s referenčním. Na výstupu OZ je log (1), pokud je měřené napětí větší než napětí referenční. Referenční napětí je nastaveno pomocí odporového děliče napětí (otočný potenciometr 10 k Ω). Napájecí napětí OZ je 5 V. Parametry OZ jsou zvoleny dle maximálního indukovaného napětí na měřících cívkách způsobeného pohybem permanentního magnetu tak, aby maximální vstupní napětí OZ bylo větší. Výstup OZ je přiveden na digitální vstup mikrokontroléru. Zapínání pohonu je ovládáno z PC přes sériový monitor mikrokontroléru. Kompletní schéma řídicího obvodu je v příloze D a soubory potřebné na CD. Schéma měřící části obvodu je na obr 2.14.

2.4 Přechodové děje hlavní cívky

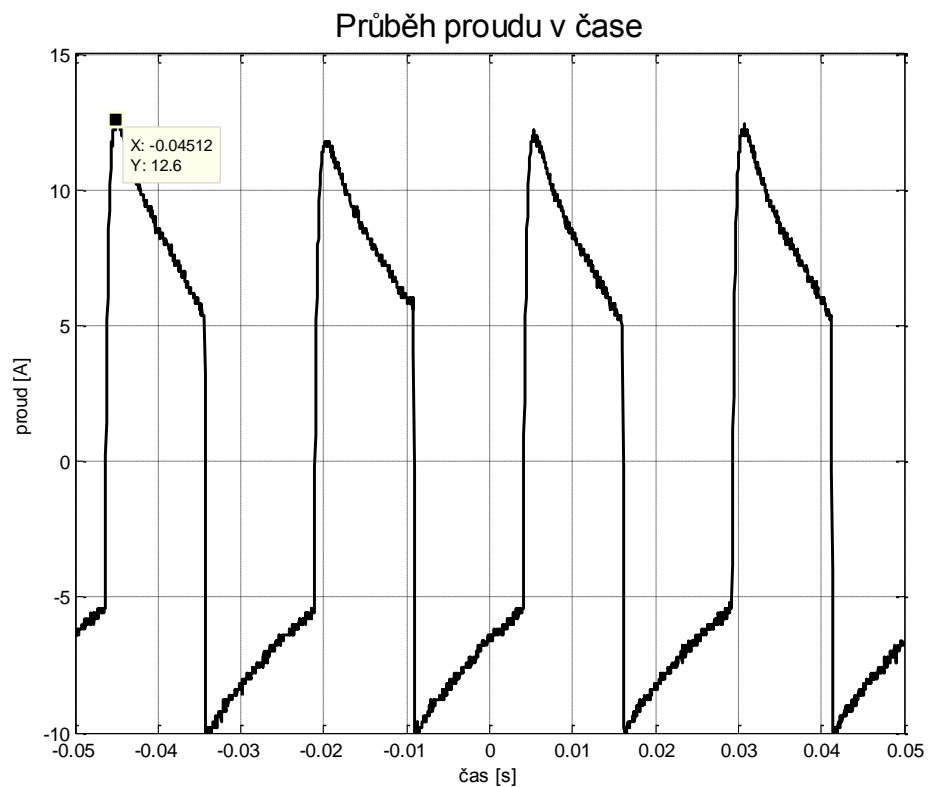
K prvnímu přechodovému ději dochází při sepnutí jednotlivých větví H můstku. Cívka o indukčnosti L a odporu R je rázem připojena ke stejnosměrnému zdroji napětí. Proud je na začátku přechodového děje nulový a po sepnutí začne exponenciálně narůstat až do okamžiku ustálení přechodového děje. Napětí na cívce je úměrné časové změně indukčního toku a zpočátku je stejně velké a orientované jako napětí zdroje. Napětí během přechodového děje exponenciálně klesne až na nulu. Přechodový děj je považován za ukončený v době $3\div 5 \tau$. U malých a krátkých cívek bez jádra, navinutých z tenkých vodičů, je časová konstanta velmi malá (do 0.5 ms). V takto zapojeném obvodu je časová konstanta τ přímo úměrná své sériové indukčnosti a nepřímo úměrná celkovému sériovému odporu. Po ustálení přechodového děje protéká obvodem pouze konstantní proud. Jeho velikost vypočítáme ze vztahu (7). Tento proud je zároveň i maximálním proudem, kterého můžeme při daném napájecím napětí docílit a podle kterého je navrhován řídicí obvod.

K druhému přechodovému ději dojde v okamžik, kdy se začne permanentní magnet pohybovat. Jeho změna polohy ovlivňuje indukčnost cívky a její indukované napětí, což má za následek ovlivnění průběhu napětí a proudu v čase.

K třetímu přechodovému ději dochází při vypínání jednotlivých větví H-můstku. Proud protékající hlavní cívkou se exponenciálně vybíjí skrz diody zapojené antiparalelně k tranzistorům. V cívce se začne indukovat napětí s opačnou polaritou než v prvním přechodovém ději, protože akumulovaná energie v cívce se nemůže ztratit bez náhrady. Napětí během přechodového děje exponenciálně klesne až na nulu.

Na obr 2.13 je znázorněn průběh proudu v čase, změřený pomocí osciloskopu. Při měření byl použit prototyp s načasovaným chodem. V následujícím pořadí byly nastaveny časy: 12 ms pro pohyb tahem, 1 ms „dead-time“, 10 ms pro pohyb tlakem.

Vlivem zvětšování indukčnosti hlavní cívky při pohybu magnetu a ztrát ve výkonové části řídicího obvodu je vždy očekávána menší velikost maximálního dosažitelného proudu. V grafu je kurzorem vyznačena hodnota maximálního proudu, který v obvodu nastal. Jeho velikost je přibližně o polovinu nižší, než velikost vypočítaného maximálního proudu, který může protékat samotnou cívkou v ustáleném stavu. Pomocí kursoru byla odečtena doba, za kterou proud dosáhl své maximální hodnoty. Její velikost se pohybuje v rozmezí $1.1 \cdot 10^{-3} \div 1.4 \cdot 10^{-3}$ s. Doba vybíjení se pohybuje v okolí $5 \cdot 10^{-4}$ s.



Obr. 2.13 Průběh proudu hlavní cívkou v čase změřený osciloskopem

2.5 Problematika snímání polohy pístu

LVDT je primárně používanou měřicí metodou pro lineární posuvy pomocí tří cívek, které mají kolem sebe vnější magnetický plášť. Ten podstatně zvětšuje indukčnost cívek a zároveň zastává funkci stínění. Aplikací této metody na lineární kompresor bez vnějšího magnetického pláště docílíme podstatně menšího napětí, transformovaného z hlavní cívky na cívky měřicí. Měřicí cívky je vhodné navinout ze slabého drátu ve vzdálenosti 1 cm od hlavní cívky (například 100÷350 závitů z drátu o průměru 0.1÷0.2 mm), čímž docílíme dalšího zmenšení transformovaného napětí z hlavní cívky a zlepšení celkové chyby měření. Hlavní cívka slouží v tomto případě k zapříčinění translačního pohybu jádra. Bude tedy napájena ze stejnosměrného zdroje a spínána pomocí H-můstků. Veškeré přechodové děje, ke kterým bude docházet na hlavní cívce při spínání, budou při měření bez uloženého magnetu jádře vlivem anti-sériového zapojení měřicích cívek eliminovány. Takto upravenou rozdílovou transformací je možné odladit pomocí měkkého střídavého zdroje (například transformátor s výstupními parametry 12 V, 0.3 A, 50 Hz), kterým budeme napájet hlavní cívku a osciloskopem, kterým budeme měřit rozdíl napětí na měřicích cívkách. Správně navinuté cívky poznáme tak, že na osciloskopu naměříme nulové rozdílové napětí. Pokud se na osciloskopu objeví průběh o dané frekvenci, je třeba upravit indukčnost první nebo druhé cívky. Pro zajištění správné funkce měření je třeba umístit zkušební vzorek lineárního kompresoru do značné vzdálenosti od všech materiálů, které by mohli ovlivňovat indukčnost cívek a tím i celkové měření.

2.6 Řízení a regulace výkonu

Akční člen navrhovaný v této práci využívá výše zmíněného kombinovaného pohybu. Regulace výkonu je realizovaná pomocí PWM výstupu mikrokontroléru ATmega2560. Nejjednodušším způsobem řízení je načasování spínání cívky, ale pro regulaci je tento typ řízení nevhodný. Načasování spínání je vhodné pouze pro jednotvárnou činnost nebo pro orientační ověření principu činnosti. Kdybychom začali načasovanou cívku regulovat pomocí PWM, došlo by ke změně celkové dynamiky pohybu v závislosti na proudu, který protéká hlavní cívkou. Ke změně polarit by došlo dříve než v nulové poloze a permanentní magnet by byl určitou dobu brzděn.

Pro zajištění regulace výkonu a celkového řízení kompresoru je nejlepší znát údaj o okamžité poloze permanentního magnetu nebo alespoň o počáteční, koncové a nulové poloze. Na základě těchto tří údajů lze regulovat proud protékající cívkou pomocí PWM výstupů a jeho orientaci pomocí H-můstku tak, aby pohyb permanentního magnetu byl co nejefektivnější. Změna orientace v nulové poloze je nezbytná. Pokud by k ní nedošlo, magnet bude po překonání nulové polohy brzděn a následně vrácen do nulové polohy. Proud protékající cívkou je stavová veličina, nemůže měnit skokově, a proto je při změně orientace proudu v cívce nutné uvažovat „dead-time“ pro vybití cívky přes diody zapojené antiparalelně k tranzistorům. Od lineárního kompresoru popisovaného v této práci je vyžadována regulace v rozmezí 0÷30% směrem dolů z maximálního výkonu. Mikrokontrolér ATmega2560 umožňuje řízení PWM výstupů pomocí nastavení střídy (0÷100%) a nosné frekvence.

$$U_i = -\frac{d\phi_c}{dt} \quad (10)$$

Ze vztahu (10) je patrné, že napětí indukované v cívce je nulové, pokud je magnetický tok Φ v čase konstantní, k čemuž dochází právě v počáteční a koncové poloze, kdy je poloha magnetu v čase konstantní. Zpočátku je magnet v počáteční poloze. Po sepnutí první větve H-můstku začne být magnet vtahován směrem do středu hlavní cívky. Samotné měření na měřicích cívkách začne o několik milisekund později, čímž se eliminuje nulové indukované napětí v počáteční poloze. Jakmile se magnet přesune do blízkosti nulové polohy, rozdíl napětí na měřicích cívkách je menší než referenční napětí OZ, což zaznamená mikrokontrolér, přestane měřit a vypne první větev H-můstku. Poté následuje „dead-time“ pro vybití cívky a následné sepnutí druhé větve H-můstku. Magnet pokračuje v pohybu směrem do koncové polohy, nyní je hlavní cívkou tlačěn směrem od jejího středu. Měření začíná opět o několik milisekund později. V koncové poloze se magnet zastaví nebo odrazí (mechanický náraz), z čehož vyplývá, že rozdíl napětí na měřicích cívkách změní polaritu, což vyhodnotí mikrokontrolér a vypne druhou větev H-můstku. Pohyb zpět je realizován naprosto stejným způsobem. U tohoto typu řízení je nezbytné, aby magnet začínal vždy v počáteční nebo koncové poloze. Dle výše popsaných poznatků je sestaven řídicí program pro mikrokontrolér ATmega2560, který je uveden v příloze E.

3 Realizace prototypu lineárního kompresoru

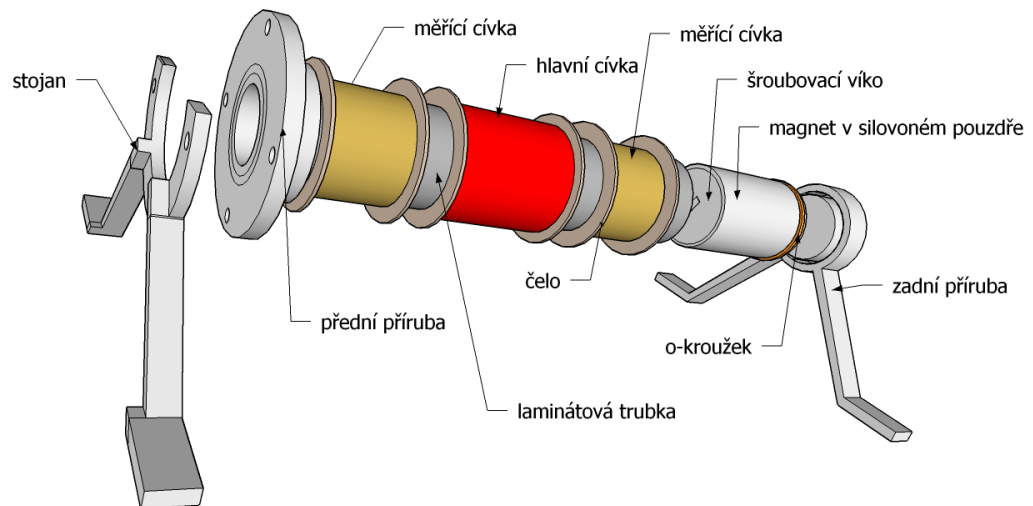
3.1 Konstrukce lineárního kompresoru typu A

3.1.1 Konstrukce statoru

Základem statoru kompresoru typu A je laminátová trubka o vnějším průměru 20 mm a délce 11 cm, na jejímž povrchu jsou navinuty jednotlivé cívky. Tyto cívky jsou navinuty z měděného lakovaného vodiče a z obou stran jsou zajištěny proti translačnímu pohybu. Lak na povrchu vodiče slouží jako izolace mezi jednotlivými závity cívky. Cívky mohou být zality speciální pryskyřicí s vysokou tepelnou vodivostí pro dobrý odvod tepla a zajištění deformace cívek. Vnější povrch laminátové trubky musí mít hladký povrch. Celý výrobek je uchycen v plastových držácích a přírubách zkonstruovaných pomocí 3D tiskárny.

3.1.2 Konstrukce pístu

Uvnitř statoru je uložen dutý píst ze silonu s vnitřním závitem. Uvnitř pístu je uložen jeden nebo více spojených permanentních NdFeB magnetů. Tyto magnety jsou proti pohybu zajištěny silonovým šroubovacím víkem. Na povrchu pístu je úzká drážka, v níž jsou vyvrtány malé dírky, které zajišťují průchod vzduchu při zpětném pohybu pístu. V drážce je volně uložen o-kroužek, který se při působení síly na píst hýbe, a tím uvolňuje nebo ucpává vzduchové dírky. Píst je proto schopný stlačovat vzduch uvnitř trubky pouze v jednom směru. V opačném směru klade píst při pohybu minimální odpor. Mezi pístem a vnitřním povrchem trubky je malá vzduchová mezera, která umožňuje volný translační pohyb pístu bez styku s vnitřním povrchem trubky. Píst při pohybu dosedá na vnitřní povrch trubky pouze svým o-kroužkem. Vnitřek trubky je nastříkán sprejem obsahujícím silikonový olej, a to z důvodů zmenšení třecí síly o-kroužku a jeho opotřebení. Velmi důležitá je volba správných rozměrů o-kroužku. Například moc silný o-kroužek by mohl ucpávat vzduchové dírky permanentně a zároveň by zvyšoval třecí sílu, která působí mezi o-kroužkem a vnitřním povrchem trubky. O-kroužek s tenkou stěnou by mohl tvořit vzduchové mezery a píst by profukoval. O-kroužek s velkým průměrem by se mohl z drážky úplně vysmyknout. Model prototypu A je popsán na obr. 3.1.



Obr. 3.1 Lineární kompresor typu A

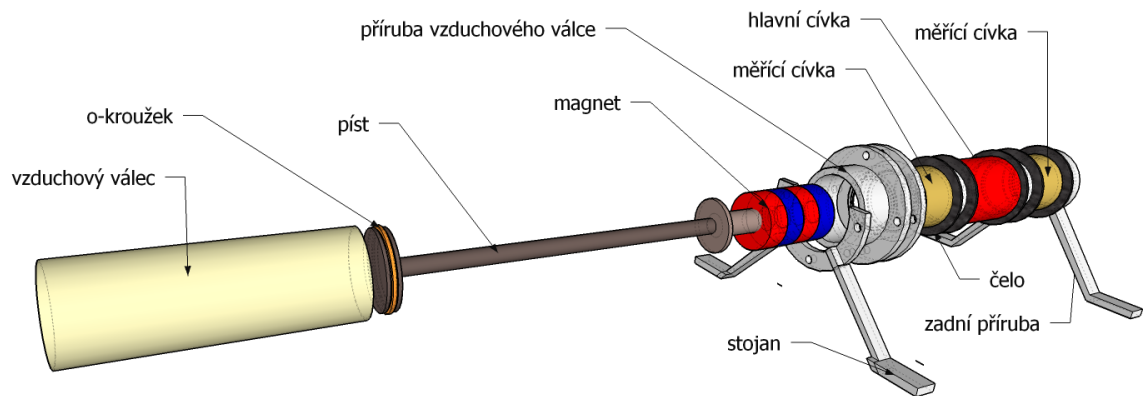
3.2 Konstrukce Lineárního kompresoru typu B

3.2.1 Konstrukce statoru

Konstrukce statoru lineárního kompresoru typu B je téměř stejná jako konstrukce typu A. K samotné kompresi dochází ve vzduchovém válci, který je uložen před laminátovou trubkou. V laminátové trubce je uložen pouze samotný magnet, mechanicky spojený s pístem, jenž je uložen ve vzduchovém válci. Celý výrobek je uchycen v plastových držácích a přírubách zkonstruovaných pomocí 3D tiskárny tak, aby byl osově souměrný a nedocházelo ke kroucení a zvětšování třecí síly. Laminátová trubka i vzduchový válec by měly mít co nejhladší vnitřní povrch. Na vnější povrch jsou kladeny minimální nároky. Před a za hlavní cívkou jsou ve vzdálenosti 1 cm navinuty měřicí cívky o délce 2 cm. Měřicí cívky jsou navinuty 350 závitů z měděného lakovaného drátu o průměru 0.2 mm.

3.2.2 Konstrukce pohyblivé části kompresoru

Základem pohyblivé části je samotný kruhový magnet uložený v laminátové trubce. Magnet je plastovou tyčí mechanicky spojen (šroubovým spojením) s tenkým plastovým pístem, jenž je uložen ve vzduchovém válci. Píst pracuje na stejném principu jako u lineárního kompresoru typu A, a zároveň jsou na něj kladeny stejné nároky. Model prototypu popsán B je na obrázku 3.2.



Obr. 3.2 Lineární kompresor typu B

3.3 Konstrukce řídicího obvodu

Návrh řídicího obvodu je realizován v programu EAGLE. Řídicí obvod je konstruován na cuprexitové desce, na kterou se nažehlením přenese vrstva toneru z lepicího papíru a následně je leptán v chloridu železitém. Jiným řešením je například osvit fotocitlivé cuprexitové destičky pomocí UV záření, následně její vývoj pomocí vývojky (1.5% roztok $NaOH$) a leptání. Dalším krokem je cínování jednotlivých cest a následné vrtání děr pro THT součástky. Posledním krokem je osazení všech elektronických součástí a mechanických součástí. Zkonstruovaná deska plošného spoje je navržena tak, aby se dala nasadit pomocí „pinheaderů“ jako celek na mikrokontrolér ATmega2560. Na jednom plošném spoji je vždy jen jeden H-můstek využívající pouze několik výstupů. Zbytek vstupů a výstupů je pomocí „pinheaderů“ vyveden skrz desku tak, aby se na mikrokontrolér mohli připojit další H-můstky, DPS pro měření atd.

Závěr

V kapitole 1 byla popsána část teorie použitá pro návrh a konstrukci prototypu. Princip vzniku uvažovaného translačního pohybu magnetu v lineárním kompresoru byl naznačen v kapitole 2 a následně experimentálně potvrzen pomocí načasování spínání hlavní cívky. Simulováním a zkoušením bylo navrženo a zkonstruováno několik prototypů. Návrh a princip řízení, měření polohy a regulace posledního z nich (kompresoru typu B) je popsán v kapitole 2. V kapitole 3 jsou popsány dva základní typy navrhovaného systému. Principem se od sebe liší pouze místem, ve kterém dochází ke kompresi vzduchu. Typ A je výhodný z hlediska úspory místa (přibližně o polovinu kratší než typ B) a své větší spolehlivosti. Nevýhodný je z hlediska menší výkonnosti kompresoru v maximálním uvažovaném průměru celého zařízení. Typ B je výhodný z hlediska vyšší výkonnosti kompresoru v maximálním uvažovaném průměru celého zařízení a nevýhodný pro svou složitější konstrukci a tím i poruchovost. Zkoušením jednotlivých prototypů bylo zjištěno, že pro krátké vzdálenosti je nejvhodnější konstruovat navrhovaný systém pouze s jednou hlavní cívkou. Prototypy s více cívkami byly nestabilní z důvodů nepřesnosti celkové výroby a horšího způsobu měření a řízení.

U předchozích prototypů byly vyzkoušeny i jiné metody měření polohy magnetu. Například měření vzdálenosti na základě snímání intenzity osvětlení v uzavřeném osvětleném prostoru fotorezistorem nebo hallových sond. Měření pomocí hallových sond se ukázalo jako nedostačující pro celkové řízení, ale je možné je použít například pro snímání počáteční a koncové polohy. Jeho nevýhodou je složitější konstrukční provedení a vliv magnetického pole hlavní cívky na velikost hallova napětí. Měření pomocí intenzity osvětlení v uzavřeném prostoru bylo nestabilní a lehce narušitelné mnoha faktory. Měření pomocí dvou anti-sériově zapojených cívek se při chodu bez zátěže osvědčilo jako funkční, lehce konstruovatelné, ale nedostačující pro celkové řízení. Při návrhu měření polohy nebyla uvažována celková dynamika translačního pohybu. Při zvyšující se zátěži má píst tendenci pružit, což má za následek krátkodobé kmitání indukovaného napětí na měřicích cívkách a tím i ovlivnění vyhodnocování polohy. Vliv pružení je možno částečně filtrovat například pomocí kondenzátoru zapojeného paralelně k vývodům měřicích cívek nebo mezi zem a výstup operačního zesilovače. Vzhledem ke špatné funkci vyhodnocování polohy pístu je do budoucna uvažováno vyhodnocovat polohu pístu pomocí 4 optických závor.

Tento systém snímání je odolný vůči vlivu pružení při zvětšující se zátěži. Jeho nevýhodou je horší konstrukční provedení.

Načasování chodu cívky se osvědčilo jako funkční, ale pro regulaci nevhodné. Regulace pomocí PWM výstupů u výše popisovaného kompresoru typu B se osvědčila jako nefunkční z důvodu chybného vyhodnocování polohy pístu. Bylo ověřeno, že zatěžováním kompresoru s načasovaným chodem cívky dojde ke změně celkové dynamiky pohybujícího se pístu, to má většinou za následek kmitání pístu v okolí nulové polohy.

Vzhledem k neúplnosti teoretických údajů při navrhování je do budoucna uvažováno simulovat nové prototypy v programu ANSOFT Maxwell, kterým je možno simulovat i dynamiku pohybu.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] CHLUMSKÝ, V., LIŠKA, A., *Kompresory*. 2. vyd. Praha: SNTL, 1982
- [2] MAYER, Daniel. *Aplikovaný elektromagnetismus: úvod do makroskopické teorie elektromagnetického pole pro elektrotechnické inženýry*. 2. vyd. České Budějovice: Kopp, 2012, 538 s. ISBN 978-80-7232-436-1.
- [3] MAYER, DANIEL A BOHUŠ ULRYCH. *ELEKTROMAGNETICKÉ AKTUÁTORY*. 1. ČESKÉ VYD. PRAHA: BEN - TECHNICKÁ LITERATURA, 2008, 120 S. ISBN 978-80-7300-216-9.
- [4] *WIKIPEDIA: THE FREE ENCYCLOPEDIA* [ONLINE]. SAN FRANCISCO (CA): WIKIMEDIA FOUNDATION, 2001- [CIT. 2015-04-23]. DOSTUPNÉ Z: [HTTP://CS.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/MATLAB](http://cs.wikipedia.org/wiki/MATLAB)
- [5] PINKER, Jiří. *Mikroprocesory a mikropočítače*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2004, 159 s. ISBN 80-7300-110-1.
- [6] PRCHAL, Josef. *Signály a soustavy*. Praha: Alfa, 1987, 323 s.
- [7] IHS 2005 [ONLINE] Obrázek ve formátu PNG [CIT. 2015-05-16] DOSTUPNÉ Z: http://www.globalspec.com/learnmore/sensors_transducers_detectors/linear_position_sensing/lvdt_position_sensors
- [8] [ONLINE] Obrázek ve formátu PNG [CIT. 2015-05-16] DOSTUPNÉ Z: <http://www.spsemoh.cz/vyuka/zae/el7.htm>
- [9] DIYAUDIO.PL – fórum [ONLINE] Obrázek ve formátu JPG [CIT. 2015-05-16] DOSTUPNÉ Z: <http://diyaudio.pl/showthread.php/16428-Wzmacniacze-w-klasie-D/page2>
- [10] BRAUER, John R. *Magnetic actuators and sensors*. Second edition. XVII, 377 pages. ISBN 9781118505250.

Přílohy

Příloha A - Výpočet vlivu stupně magnetizace

Lua skript

```
showconsole()
open("zmenamagnetizace.fem")
mi_saveas("zmenamagnetizace.fem")
mi_seteditmode("group")
vystup1=openfile("sila.txt", "w")
--- N10 ----
mi_addblocklabel(8,40)
mi_selectlabel(8,(40))
mi_setblockprop("n10",1,0,"none",-90,2,0)
mi_clearselected()
    mi_analyze()
    mi_loadsolution()
    mo_selectblock(8,40)
    sila1=mo_blockintegral(21)
    write(vystup1,sila1, "\n")
    mo_close()
--- N17 ----
mi_addblocklabel(8,40)
mi_selectlabel(8,(40))
mi_setblockprop("n17",1,0,"none",-90,2,0)
mi_clearselected()
    mi_analyze()
    mi_loadsolution()
    mo_selectblock(8,40)
    sila1=mo_blockintegral(21)
    write(vystup1,sila1, "\n")
    mo_close()
--- N25 ----
mi_addblocklabel(8,40)
mi_selectlabel(8,(40))
mi_setblockprop("n25",1,0,"none",-90,2,0)
mi_clearselected()
    mi_analyze()
    mi_loadsolution()
    mo_selectblock(8,40)
    sila1=mo_blockintegral(21)
    write(vystup1,sila1, "\n")
    mo_close()
--- N32 ----
mi_addblocklabel(8,40)
mi_selectlabel(8,(40))
mi_setblockprop("n32",1,0,"none",-90,2,0)
mi_clearselected()
    mi_analyze()
    mi_loadsolution()
    mo_selectblock(8,40)
    sila1=mo_blockintegral(21)
    write(vystup1,sila1, "\n")
    mo_close()
--- N37 ----
mi_addblocklabel(8,40)
mi_selectlabel(8,(40))
mi_setblockprop("n37",1,0,"none",-90,2,0)
mi_clearselected()
    mi_analyze()
    mi_loadsolution()
    mo_selectblock(8,40)
    sila1=mo_blockintegral(21)
    write(vystup1,sila1, "\n")
    mo_close()
--- N40 ----
mi_addblocklabel(8,40)
mi_selectlabel(8,(40))
mi_setblockprop("n40",1,0,"none",-90,2,0)
mi_clearselected()
    mi_analyze()
    mi_loadsolution()
```

```

    mo_selectblock(8,40)
    sila1=mo_blockintegral(21)
    write(vystup1,sila1, "\n")
    mo_close()
--- N42 ----
mi_addblocklabel(8,40)
mi_selectlabel(8,(40))
mi_setblockprop("n42",1,0,"none",-90,2,0)
mi_clearselected()
    mi_analyze()
    mi_loadsolution()
    mo_selectblock(8,40)
    sila1=mo_blockintegral(21)
    write(vystup1,sila1, "\n")
    mo_close()
--- N52 ----
mi_addblocklabel(8,40)
mi_selectlabel(8,(40))
mi_setblockprop("n52",1,0,"none",-90,2,0)
mi_clearselected()
    mi_analyze()
    mi_loadsolution()
    mo_selectblock(8,40)
    sila1=mo_blockintegral(21)
    write(vystup1,sila1, "\n")
    mo_close()
closefile(vystup1)

```

M-file

```

clc, clear
soubor1=fopen('sila.txt','r');
sila=fscanf(soubor1,'%f');
sila=sila';
fclose(soubor1);
magnetizace=[10,17,25,32,37,40,42,52];

figure(1)
plot(magnetizace,sila,'linewidth',2)
xlabel('Stupeň magnetizace [-]')
ylabel('Síla [N]')
title('Závislost síly na stupni magnetizace','FontSize',16)
grid on

```

Příloha B - Výpočet parametrů solenoidové cívky**M-file**

```

clc,clear
Ub=20;
delka_pistu=183e-3;
vnejsi_D_pistu=22.5e-3;% vnejsi prumer pistu
pocet_stupnu=1;
rho_cu=1.8e-8;
Vc=4;%pocet_vrstev_civky
izolace_dratu=0.1e-3;
max_delka_civky=delka_pistu/pocet_stupnu;%max delka jednoho stupne
delka_civky=21e-3;
mi_0=4*pi*10^-7;
count=0;
for i =0.1e-3:0.01e-3:1e-3
count=count+1;
prumer_dratu(count)=i;
celkovy_prumer_dratu(count)=prumer_dratu(count)+2*izolace_dratu;
Nc(count)=round(Vc*delka_civky/celkovy_prumer_dratu(count)); %pocet zavitu stupne
for j = 1:1:Vc
    l(j)=2*pi*(vnejsi_D_pistu/2+celkovy_prumer_dratu(count)*(1/2+j-1));
    R20(j)=rho_cu*round(Nc(count)/Vc)*l(j)/(pi*(prumer_dratu(count)/2)^2); % proximity efekt
zanedbame
end
Rm(count)=delka_civky/(mi_0*pi*(vnejsi_D_pistu/2)^2);
Rcivky(count)=sum(R20);
Lcivky(count)=Nc(count)^2/Rm(count);
Tcivky(count)=Lcivky(count)/Rcivky(count);
I(count)=Ub/Rcivky(count);
H(count)=Nc(count)*I(count)/delka_civky;

```

```

end
figure(1)
plot(prumer_dratu*1000,I,'k','LineWidth',2)
xlabel('d_{dr} [mm]')
ylabel('I [A]')
title('Závislost proudu na průměru drátu','FontSize',16)
grid on
figure(2)
plot(prumer_dratu*1000,H,'k','LineWidth',2)
xlabel('d_{dr} [mm]')
ylabel('H [A/m]')
title('Intenzita mag. pole','FontSize',16)
grid on
figure(3)
plot(prumer_dratu*1000,Nc,'k','LineWidth',2)
xlabel('d_{dr} [mm]')
ylabel('N [-]')
title('Počet závitů','FontSize',16)
grid on
figure(4)
plot(I,H,'k','LineWidth',2)
xlabel('I [A]')
ylabel('H [A/m]')
title('H/I','FontSize',16)
grid on
figure(5)
plot(prumer_dratu*1000,Rcivky,'k','LineWidth',2)
xlabel('d_{dr} [mm]')
ylabel('R [Ohm]')
title('Odpor','FontSize',16)
grid on
figure(6)
plot(prumer_dratu*1000,Lcivky,'k','LineWidth',2)
xlabel('d_{dr} [mm]')
ylabel('L [H]')
title('Indukčnost','FontSize',16)
grid on
figure(7)
plot(prumer_dratu*1000,Tcivky,'k','LineWidth',2)
xlabel('d_{dr} [mm]')
ylabel('Tau [s]')
title('Časová konstanta','FontSize',16)
grid on

```

Příloha C – Simulace statické charakteristiky

Lua skript

```

showconsole()
open("pohyb.fem")
mi_saveas("pohyb.fem")
mi_seteditmode("group")
    vystupl=openfile("silaz.txt", "w")
    z=openfile("y.txt", "w")
kroku=320
delka=80
dy=delka/kroku
for n=1,kroku do
    y=(n*dy-(delka/2)-dy)
    mi_analyze()
    mi_loadsolution()
    mo_selectblock(8,-6+(n*dy))
    silazz=mo_blockintegral(21)
    write(vystupl,silazz, "\n")
    write(z,y, "\n")
    mi_selectgroup(2)
    mi_movetranslate(0,dy)
    mo_close()
end
mi_selectgroup(2)
mi_movetranslate(0,-(delka))
mi_saveas("pohyb.fem")
closefile(vystupl)
closefile(z)

```

M-file

```

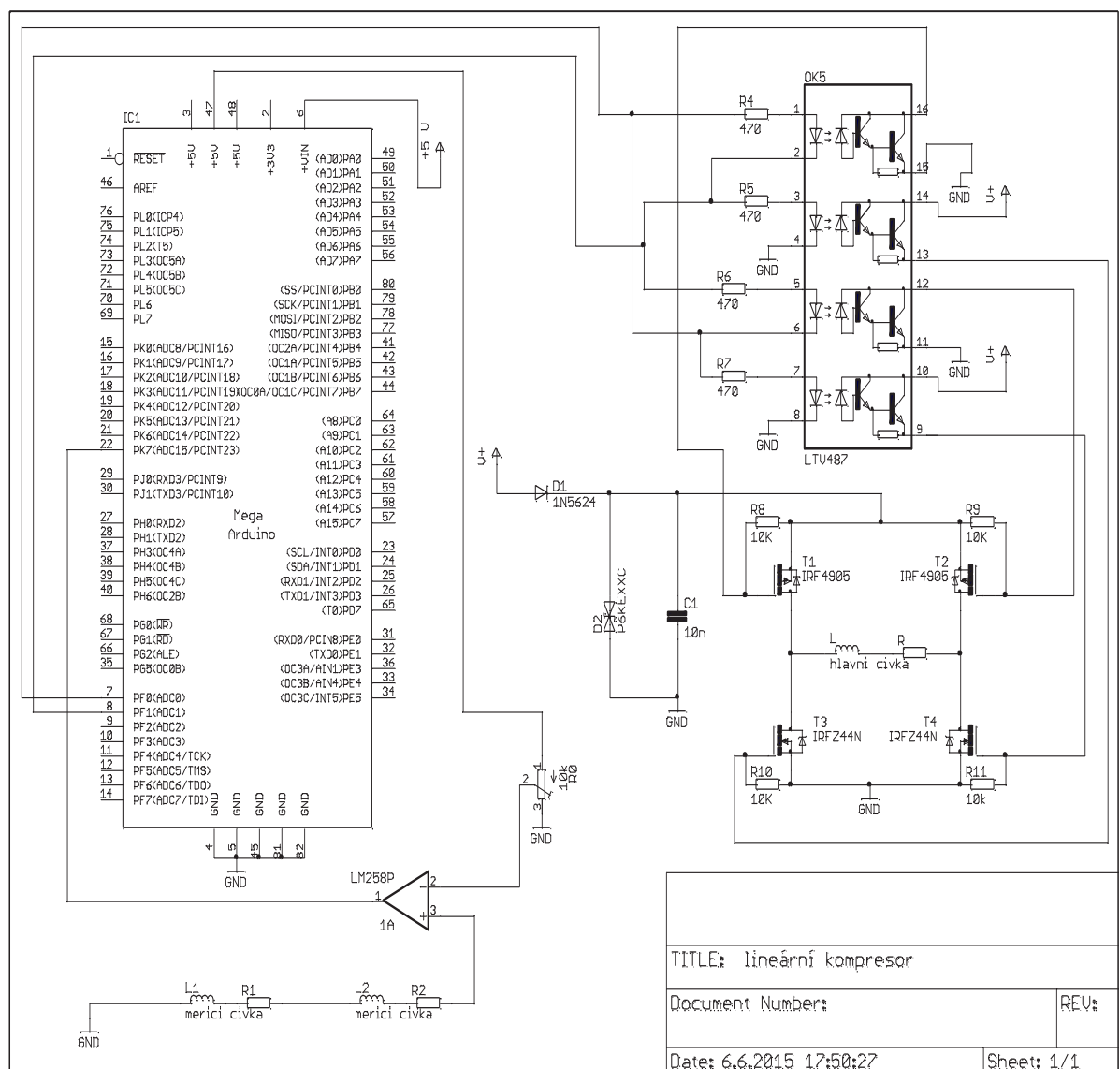
clc, clear
soubor1=fopen('silaz.txt','r');
silaz=fscanf(soubor1,'%f');
silaz=silaz';
soubor2=fopen('y.txt','r');
delka=fscanf(soubor2,'%f');
delka=delka';
delka=delka/1000;
fclose(soubor1);
fclose(soubor2);

```

```

figure(1)
plot(delka*1000,silaz,'k','LineWidth',2)
xlabel('poloha pistu [mm]')
ylabel('síla [N]')
title('Závislost síly na poloze pistu','FontSize',16)
grid on

```

Příloha D – schéma řídicího obvodu

Příloha E – Program pro ATmega2560

Řízení pomocí měřících cívek

```
int motorPin1=11;
int motorPin2=10;
int senzorPin1=22;
int val=0,senz=0;

void setup(){
  Serial.begin(9600);
  pinMode(senzorPin1,INPUT);
  pinMode(motorPin1,OUTPUT);
  pinMode(motorPin2,OUTPUT);
  digitalWrite(motorPin1,0);
  digitalWrite(motorPin2,0);
}

void loop(){

  if (Serial.available() > 0) {int val=Serial.read()-48;
    if(val!=0){
      val=0;
      Serial.println("Bum");

      digitalWrite(motorPin1,1);
      delay(4);

      do{
        delay(1);
        senz++;
        if(senz>50){
          digitalWrite(motorPin1,0);
          digitalWrite(motorPin2,0);
          Serial.println("Error1");
        }
        while(1){};
      }
      }while(digitalRead(senzorPin1)==0);

      digitalWrite(motorPin1,0);
      delay(2);

      digitalWrite(motorPin2,1);
      delay(4);

      do{
        delay(1);
        senz++;
        if(senz>50){
          digitalWrite(motorPin1,0);
          digitalWrite(motorPin2,0);
          Serial.println("Error2");
        }
        while(1){};
      }
      }while(digitalRead(senzorPin1)==1);

      digitalWrite(motorPin2,0);
      delay(15);
    }
  }
}
```

Řízení pomocí načasování hlavní cívky

```
int motorPin1=11;
int motorPin2=10;
int val=0,

void setup(){
  Serial.begin(9600);
  pinMode(motorPin1,OUTPUT);
  pinMode(motorPin2,OUTPUT);
  digitalWrite(motorPin1,0);
  digitalWrite(motorPin2,0);
}

void loop(){

  if (Serial.available() > 0) {int val=Serial.read()-48;
    if(val!=0){
      val=0;
      Serial.println("Bum");

      digitalWrite(motorPin1,1);
      delay(12);

      digitalWrite(motorPin1,0);
      delay(1);

      digitalWrite(motorPin2,1);
      delay(10);

      digitalWrite(motorPin2,0);
      delay(1);
    }
  }
```