

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Návrh vidlicového motoru s lineárními
elektromagnetickými aktuátory**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin LUFINKA**
Osobní číslo: **E13B0198P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**
Název tématu: **Návrh vidlicového motoru s lineárními elektromagnetickými aktuátory**
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Proveďte rešerši konstrukčního provedení a praktického využití motorů využívajících lineárních elektromagnetických aktuátorů pro pohon klikové hřídele.
2. Vytvořte základní konstrukční návrh tohoto typu motoru ve dvouválcové variantě.
3. S využitím matematického modelu proveďte návrh elektromagnetických aktuátorů pro daný motor a určete jejich hlavní parametry.
4. Proveďte studii dynamických vlastností aktuátorů a stanovte provozní parametry motoru.
5. Navržený motor zkonstruujte a proveďte základní ověření jeho funkce.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. H. Janocha. **Actuators: Basics and Applications**. Springer, 2010
2. F. M. Jachim. **Electric vehicle solenoid motor**. US Patent 5,469,004, 1995
3. O. Gomis-Bellmunt, L. F. Campanile. **Design Rules for Actuators in Active Mechanical Systems**. Springer, 2010
4. D. Mayer, B. Ulrych. **Elektromagnetické aktuátory**. BEN-technická literatura, 2009
5. F. Mach. **Pokročilé metody a algoritmy pro analýzu sdružených úloh v elektromagnetismu**. dizertační práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2014

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. František Mach, Ph.D.

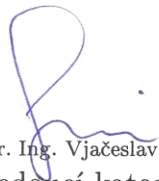
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2015**

Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2016**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce se zabývá komplexním návrhem prototypu vidlicového motoru se dvěma lineárními elektromagnetickými aktuátory. Jedná se zejména o návrh mechanické konstrukce, přídatné konstrukce potřebné k řízení a návrh samotných aktuátorů, ale práce se stručněji zabývá také problematikou řízení a to hlavně elektronickými spínači. Algoritmus řízení je pouze stručně popsán. Dále je zde řešena praktická výroba prototypu a jeho experimentální ověření.

Klíčová slova

Motor, elektromagnetický aktuátor, statická charakteristika, cívka, jádro, hřídel, spínač, konstrukce, síla, magnetické pole.

Abstract

The bachelor theses presents a complex design of the prototype V-engine with two linear electromagnetic actuators. These include the design of mechanical construction, additional structures for control and design of actuators themselves. But work also briefly deals with the issue of control and especially electronic switches. The control algorithm is only briefly outlined. There is also dealt with the prototype practical production and its experimental verification.

Key words

Motor, electromagnetic actuator, static characteristic, coil, armature, shaft, switch, construction, force, magnetic field

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 24.5.2016

Martin Lufinka

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Františku Machovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych rád poděkoval kolegovi Tomášovi Bauerovi, se kterým jsem na projektu spolupracoval a bez kterého by projekt nebyl úspěšný.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 POPIS PROBLEMATIKY	11
1.1 ZÁKLADNÍ PRINCIP	11
1.2 AKTUÁTOR.....	11
1.2.1 Rozdělení	12
1.2.2 Využití.....	13
1.3 HISTORIE	13
1.4 SOUČASNÝ STAV ZNALOSTÍ.....	15
2 KONSTRUKČNÍ NÁVRH PROTOTYPU	19
2.1 VLASTNÍ KONSTRUKCE	19
2.1.1 Nosná konstrukce	20
2.1.2 Konstrukce aktuátorů	21
2.1.3 Hřídel	24
2.1.4 Přídavná konstrukce potřebná k řízení.....	25
2.2 POHYBOVÁ STUDIE	26
2.2.1 Trajektorie význačných bodů	26
2.2.2 Lineární posunutí	28
3 NÁVRH AKTUÁTORŮ	29
3.1 MATEMATICKÝ MODEL	29
3.1.1 Model magnetického pole	29
3.1.2 Model elektrického obvodu.....	30
3.1.3 Další důležité vztahy.....	30
3.2 NUMERICKÝ MODEL	32
3.3 VÝSLEDNÝ NÁVRH	34
3.4 DYNAMICKÉ VLASTNOSTI	37
4 STRUČNÝ POPIS ŘÍZENÍ MOTORU	40
4.1 NAPÁJENÍ A ELEKTRONICKÝ SPÍNAČ	40
4.2 PRINCIP ŘÍZENÍ	43
5 SESTAVENÍ PROTOTYPU A JEHO VERIFIKACE	46
ZÁVĚR	51
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	52
PŘÍLOHY	1

Seznam symbolů a zkratek

A	vektorový magnetický potenciál
B	vektor magnetické indukce
C	kapacita
γ	elektrická vodivost
δ	poloha jádra
F	vektor síly
H	vektor intenzity magnetického pole
i	časově proměnný elektrický proud
I_b	budící proud
J_b	vektor budící proudové hustoty
L	indukčnost
m	hmotnost jádra
N	počet závitů
R	elektrický odpor
t	čas
T	teplota
μ	permeabilita
U_o	napájecí napětí zdroje
v	rychlost jádra
Φ	magnetický indukční tok
w_m	hustota magnetické energie
W_m	magnetická energie
DPS.....	deska plošného spoje
el.	elektrický / elektrická
elmag.	elektromagnetický
mag.	magnetický / magnetická
MATLAB	Matrix Laboratory
MOSFET	metal oxide semiconductor field effect transistor
THT	through hole technology

Úvod

Práce navazuje na studentský projekt, který vznikl na Katedře teoretické elektrotechniky na podzim roku 2014 a na kterém jsem pracoval s kolegou Tomášem Bauerem. Projekt byl časem pojmenován jako T3F (Tetřev). Jedná se o prototyp vidlicového motoru se dvěma lineárními elektromagnetickými aktuátory, který je založen na principu válcového spalovacího motoru, pouze zde jsou válce nahrazeny elmag. aktuátory. Cílem projektu nebylo vytvořit alternativní pohon pro elektromobily, nýbrž vytvořit funkční prototyp a naučit se nové postupy a poznatky z vývoje. Tato práce se zabývá spíše konstrukcí a aktuátory, řízení je zde pouze stručně popsáno – více se mu ve své práci věnuje kolega Bauer [5].

Text je členěn do pěti kapitol. První kapitola se zabývá úvodem do problematiky, je zde uveden základní princip a popis motoru, dále obecné informace o aktuátorech a jejich využití, poté je zde v krátkosti zmíněna historie tohoto typu motoru. První kapitola se věnuje také současnému stavu znalostí – patenty obdobných prototypů a společností, která je zkouší vyrábět. Ve druhé kapitole se řeší problematika konstrukčního návrhu prototypu a vytvoření jeho 3D modelu v programu SolidWorks. Je zde detailně popsána mechanická nosná konstrukce, konstrukce aktuátorů, hřídel a přídatná konstrukce potřebná k řízení. Detaily všech mechanických částí jsou vidět ve výkresech v přílohách. Dále jsou v této kapitole rozebrány pohybové studie vytvořené v modelu. Třetí kapitola se věnuje nejdůležitější části motoru – lineárním elektromagnetickým aktuátorům. Je zde popsán jejich matematický model pomocí důležitých vztahů a rovnic. Dále je zde vytvořen numerický model aktuátoru v programu Agors2D, ze které se získalo rozložení mag. pole v aktuátoru a statická charakteristika. Je zde popsán postup návrhu a finální návrh a poté jsou ukázány dynamické vlastnosti. Čtvrtá kapitola se věnuje stručnému popisu řízení. Zabývá se napájením, návrhem elektronických spínačů včetně výroby desky plošného spoje, zpětnovazebními prvky a velmi stručně je zmíněn algoritmus řízení. V poslední kapitole je v krátkosti popsán výsledný vyrobený prototyp, jeho vlastnosti a je provedena jeho verifikace.

Prototyp by měl do budoucna sloužit k výuce algoritmů řízení (předměty KTE/MEL, KTE/ATE), dále pak na JuniorFEL a při dnech otevřených dveří.

1 Popis problematiky

Tato kapitola se věnuje uvedení do problematiky. Je zde stručně popsána konstrukce prototypu a jeho princip. Dále jsou zde informace o lineárních elektromagnetických aktuátorech – jejich popis, princip a využití. Dále jsou zde uvedeny některé historické vynálezy týkající se našeho prototypu. Nakonec jsou zde zmíněny existující patenty a výrobky obdobných zařízení.

1.1 Základní princip

Vidlicový motor s lineárními elektromagnetickými aktuátory v našem provedení je pístový motor, který je složen z nosné konstrukce pro aktuátory, dvou lineárních elektromagnetických aktuátorů, které jsou umístěny nad klikovou hřídelí pod úhlem, tvoří tak písmeno „V.“ Feromagnetická jádra aktuátorů jsou spojena pomocí tažných ojníc a kloubu s klikovou hřídelí. Hřídel je uložena v kuličkových ložiscích v konstrukci, která je podrobně rozebrána v kapitole č. 2. Možnosti konstrukce jsou mnohé, lišit se mohou počtem aktuátorů, různé mohou být úhly, které aktuátory svírají vzhledem k hřídeli, a i samotná hřídel může být různého typu.

Motor využívá přeměny elektrické energie na energii mechanickou, pomocí které je roztáčena kliková hřídel. Řídící veličinou je elektrický proud, jehož změnou řídíme změnu rychlosti otáčení. Funkce tohoto motoru je založena na tom, že průchodem elektrického proudu cívkou vzniká kolem cívky magnetické pole, které svým silovým působením uvádí do pohybu feromagnetické jádro, které svůj lineární pohyb převádí pomocí tažných ojníc a kloubu na klikovou hřídel, která se tak otáčí s úhlovou rychlostí a momentem. Pomocí elektronických spínačů a řídicí desky Arduino je spínán v určitých intervalech el. proud, který tak vždy teče do jednoho nebo do druhého aktuátoru a ty tak působí proti sobě. Je zde tedy analogie s ostatními pístovými motory, jen je jiný princip uvedení pístu do pohybu. Ostatní pístové motory podle typu vstupní energie jsou například motory spalovací, pneumatické nebo hydraulické.

1.2 Aktuátor

Aktuátor, též zvaný akční člen nebo výkonový převodník, je zařízení převádějící řídicí veličinu (veličinu na vstupu) na výstupní mechanickou veličinu. Výstupní veličina se nazývá

akční veličina a je vždy mechanického charakteru – je to silové působení a jeho projevy, nejčastěji mechanický pohyb, ale třeba i deformace. Velikost akční veličiny je řízena velikostí řídicí veličiny. [1] [3]

1.2.1 Rozdělení

Podle charakteru (fyzikální podstaty) vstupní řídicí veličiny lze aktuátory rozdělit na několik druhů, přičemž každý má nějaké výhody a nevýhody. Každý druh má jiný princip transformace energie ze vstupu na výstup. Jedná se o aktuátory elektromechanické (vstupní veličinou je el. proud), hydraulické (řízené tlakem), pneumatické (řídicí veličinou je kapalina) a speciální. [1] [3]

Elektromechanické aktuátory se dále dělí na dvě skupiny, a to podle silového působení. Za prvé je to silové působení magnetického pole na feromagnetické jádro – elektromagnetické aktuátory. Mají vysokou hustotu mag. pole, díky čemuž se dosahuje velkého silového působení. Za druhé se jedná o působení el. pole na elektricky nabitý vodič nebo na dielektrikum. Tyto aktuátory mají oproti prvnímu typu velmi malou hustotu energie el. pole, tudíž se dosahuje pouze nepatrných sil a tedy se moc nepoužívají, jediné využití je v mikroaktuátorech. [1] [3]

Nejrozšířenější skupinou jsou tedy elektromagnetické aktuátory, jež lze rozdělit podle dvou kritérií. Prvním kritériem je rozdělení podle vstupního el. signálu – dělí se na aktuátory střídavé (speciálně třífázové) a aktuátory stejnosměrné. Druhé rozdělení je podle typu mechanického pohybu na výstupu:

- rotační aktuátory – točivý pohyb, elektromotory,
- lineární aktuátory – posuvný pohyb (translace), mají omezenou dráhu pohybu, často konají periodický vratný pohyb, lineární motory,
- aktuátory s větším počtem stupňů volnosti. [1] [3]

Elektromagnetické aktuátory lze také rozdělit na aktuátory s aktivním anebo pasivním jádrem. Aktivní jádro je zdrojem magnetického pole – může to být permanentní magnet nebo cívka. Pasivní jádro je tvořeno feromagnetickým materiálem. Oba typy se můžou vhodně kombinovat. [1]

1.2.2 Využití

Elektromechanické aktuátory tvoří důležité součásti dopravních a výrobních mechatronických soustav. Můžeme je najít v mnoha odvětvích a to v různých provedeních a velikostech, např. v řízení technologických procesů ve strojírenství, robotických soustavách, manipulátorech, automobilovém, leteckém a železničním průmyslu, jaderných elektrárnách pro řízení pohybu regulačních tyčí a v mnoha dalších oborech. [1]

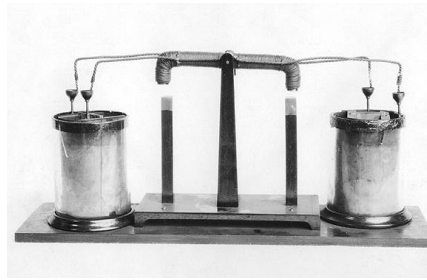
1.3 Historie

Do 30. let 19. století byly jen dva způsoby jak vyrábět vysoké napětí. Jedním z nich byl Wimshurstův stroj, druhým jednoduché baterie složené z Voltových sloupů, jež byly velmi drahé. První krok k vynálezu elektromagnetu, jenž vedl k vynálezu generátoru a transformátoru, byl proveden dánským profesorem Hansem C. Oerstedem, který objevil, že vodič protékaný proudem způsobí, že magnetická jehla v jeho okolí se natočí do pravého úhlu vzhledem k vodiči. Záhy to bylo potvrzeno dalšími vědci. Ve 20. a 30. letech 19. století byly provedeny dva významné objevy. Michael Faraday a Joseph Henry sestrojili zařízení založené na předchozím objevu, tyto zařízení jsou považovány za první elektrické motory. Faraday pokračoval v bádání a objevil elektromagnetickou indukci. Na základě Faradayových objevů Hippolyte Pixii vyvinul první rotační generátor, jehož princip je využíván dodnes. [8]

Od 30. do 60. let 19. století následovaly vývoje mnoha motorů na principu elektromagnetismu, elektřina se stala mezinárodní záležitostí. Vynálezci se snažili vyrobit takové motory, které by mohly nahradit parní, a proto se i principem parním podobaly – byly to vratné motory, které konvertovaly lineární pohyb na rotační. [8]

- ***The Henry magnetic rocker (1831)***

Tento malý motor lze považovat za první elektromagnetický motor, zkonstruoval ho v roce 1831 americký vědec Joseph Henry a nazval ho „filozofická hračka,“ neměl v plánu ho nijak využít. Je vyobrazen na *Obr. 1.1*. V roce 1838 ho v britském časopise „Philosophical Magazine“ vysvětlil pan F. Watkins, detailněji ho popsal jako první cyklický motor takový, který pokračuje v práci bez manuálního přepínání nebo resetování. [9]



Obr. 1.1: The Henry Magnetic Rocker [9]

- ***Dal Negro's engine (1832)***

Italský vědec vyrobil první elektrický motor s kvantifikovatelným výkonem. Otočný pohyb se získal pomocí kyvadla s ráčnou a zařízení bylo schopno zvednout 60 g o 5 cm za 1 s, tedy měl výkon asi 30 mW. [9]

- ***The Jacobi engine (1838)***

Pruský fyzik zkonstruoval jako první na světě loď s pohonem, konkrétně využívající vratný cívkový elektromagnetický motor, který řídil dvě pádla. Elektrická energie byla získávána z řady chemických baterií, díky čemuž hrozila toxikace pasažérů. [9]

- ***The Magrini engine (1840)***

Italský fyzik sestrojil vratný elektrický motor (viz Obr. 1.2), který byl složen ze dvou klik nastavených v úhlu 90 stupňů, aby se zabránilo problému mrtvého centra. Motor byl navržen tak, aby se sám roztočil. Spínání bylo provedeno pomocí komutátoru na hřídeli. [9]

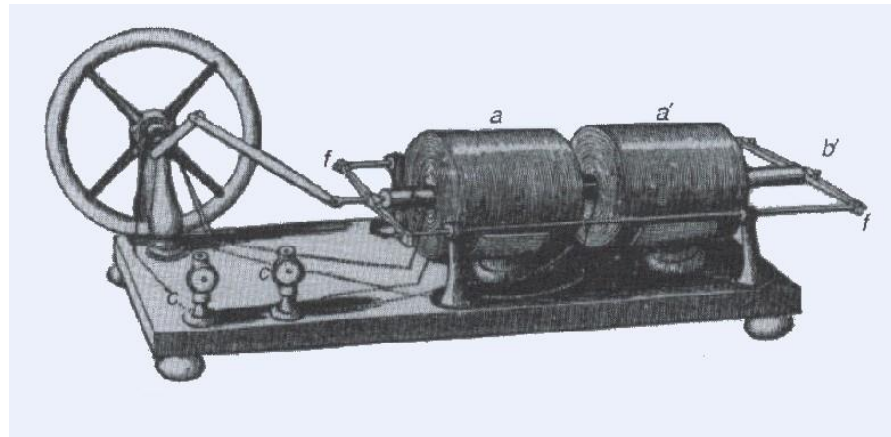


Obr. 1.2: The Magrini engine [9]

- ***The Page engine (1844)***

Charles Grafton Page byl americký vynálezce, fyzik a profesor chemie, nechal si patentovat mnoho zařízení. Jako inspiraci si vzal horizontální parní motor. Vratný elektrický motor, jenž nazval axiální motor, je složen ze dvou solenoidů umístěných za sebou, dvou jader, vstupních svorek a třmenů spojujících jádra a vodivé tyče. Pracoval v obou směrech

otáčení. Proud procházející skrz solenoidy byl rovnoměrně rozdělen pomocí komutátoru na hřídeli. Motor je vidět na *Obr. 1.3.* [9]



Obr. 1.3: The Page engine [9]

Poté se již vývoj elektrických pohonů začal ubírat jiným směrem – začaly se preferovat rotační motory. Zmínil bych zde například rotační motor Francouze Paul-Gustava Fromenta z roku 1944, kde byly elektromagnety pod napětím, aby tak táhly železné tyče umístěné na kole. Dosáhl konstantní rotace. Další motory následovaly. [8]

1.4 Současný stav znalostí

V této kapitole je detailněji zmíněno pět patentů, jež jsou nejvíce shodné s naším prototypem a další obdobné jsou pouze zmíněny. Dále jsou zde informace o společnosti Zekou Industries, která se výrobou obdobných zařízení zabývá. V bodech níže jsou popsány relevantní patenty.

- ***Electric vehicle solenoid motor***

Číslo patentu je US5469004 A, je schválený, práce byla publikována 21. listopadu 1995. Je našemu prototypu asi nejbližší. V pouzdře obsahuje klikovou hřídel, přičemž nejméně jeden solenoid má jádro vždy v kontaktu s hřídelí. Ovládací prvek na řízení el. proudu je umístěn vedle klikové hřídele v místě výstupku, kde se také nachází pohyblivý kontakt, který slouží k tomu, že při otáčení se posouvá tak, aby byl umožněn průchod el. proudu ze zdroje do solenoidu. Proud napájí solenoid a způsobuje, že se jádro zatáhne do solenoidu a přitáhne tažnou ojnicí dovnitř, čímž způsobí otočení klikové hřídele. [12]

- ***Electromagnetic motor with plural reciprocating members***

Číslo patentu je US3676719 A, je schválený, byl publikován 11. července 1972. Jedná se o přístroj pro přeměnu el. energie na rotační pohyb k výkonu práce – například pohon

kolového vozidla. Zařízení obsahuje soustavu solenoidů s jádry, každé jádro je excentricky spojeno s hnaným ozubeným kolem, které je v záběru s hnaným kolem neseným hřídelí. Takto se získává mechanická energie a je způsoben rotační pohyb hřídele. Solenoidy jsou napájeny sekvenčně, aby se hřídel otáčela kontinuálně. [14]

- ***Power engine***

Tento patent má číslo EP1753115 A1 a zatím nebyl schválen, publikován byl 14. února 2007. Motor obsahuje mag. píst, elmag. vinutí, klikovou hřídel, setrvačnick a dělič napětí. Magnet je připevněn k pístu spojeným s držákem, k němuž je připevněno vinutí. Pomocí děliče je generován střídavý proud, který způsobuje přitahování nebo odtahování pístu, který tak pohybuje klikovou hřídelí a zajišťuje výstupní kinetickou energii. [15]

- ***Servo rotary motor***

Tento patent s číslem US4510420 A byl publikován 9. dubna 1985 a je schválen. V jeho provedení je využit obvod pulsně šířkové modulace k řízení pulsů posílaných do cívek pro roztočení motoru. Pulsně šířkový modulátor spolupracuje s distribučním systémem motoru pro generování sekvence impulsů, které jsou postupně aplikovány na výkonový tranzistor z důvodu vypnutí nebo sepnutí tranzistoru s danou střídou. Součástí každého pístu jsou dvě cívky. [13]

- ***Reciprocating dual-action piston magnetic force motor and method***

Patent má číslo US8058755 B2, byl publikován 15. listopadu 2011, je schválen. Vyznačuje se tím, že systém obsahuje akumulární zařízení, píst včetně magnetu, nejméně dvě koncové sestavy s elektromagnety, které za provozu pohybují písty. Dále obsahuje kontrolér, který řídí dodávky el. proudu do prvního a druhého elektromagnetu první a druhé koncové sestavy tak, že první polarita prvního elektromagnetu je opačná oproti druhé polaritě druhého elektromagnetu. První a druhá polarita jsou přerušovaně zaměňovány dodávkami el. proudu. Takže magnet na pístu je přitahován a odtahován od první a druhé koncové sestavy. [16]

- ***Další patenty:***

Existuje celá řada dalších relevantních patentů. Jsou to například tyto: *Magnetically operable engine* (US4093880 A, 1978), *Solenoid motor* (US4473763 A, 1984), *Electromagnetic engine* (US4345174 A, 1982), *Reciprotating electromagnetic engine* (US5457349 A, 1995), *Electromagnetic reciprocating engine* (US7557473 B2, 2009), *Opposed piston electromagnetic engine* (US7950356 B2, 2011) a *Electro-magnetic internal combustion engine* (US7793634 B2, 2010). [17] [18] [19] [20] [21] [22] [23]

Americká soukromá společnost Sekou Industries vlastní US Patent 7,557,473, schválený 7. července 2007, na elektromagnetický vratný motor. Několik aplikací bylo představeno na trhu pro nové technologie. Její výrobky se dají rozdělit do čtyř kategorií:

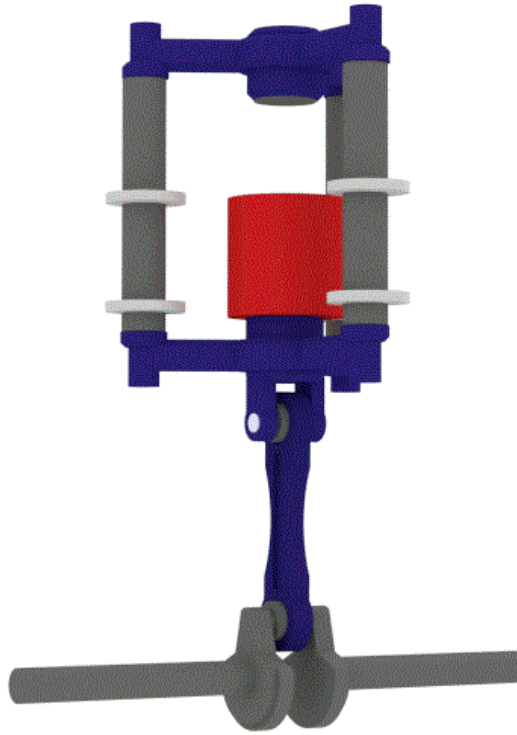
- **magnetický pulsní motor pro vozidla** (napájen z alternátoru, 30 000 otáček za minutu, zejména pro kamiony, viz *Obr. 1.4*),
- **magnetický pulsní generátor** (navržen pro produkci obnovitelné energie, 3 různé výkonové rozsahy),
- **magnetický pulsní motor pro lodě a vlaky** (navržen s magnetickým pulsním generátorem a klasickým el. motorem, u lodí více generátorů napájejících el. motory, u vlaků jeden generátor pro více motorů),
- **magnetický pulsní letecký motor** (navržen pro lehká letadla, napájen z alternátoru). [10]



Obr. 1.4: Magnetický pulsní motor společnosti Sekou Industries [10]

Motor této společnosti má dvě hlavní části – magnetickou komoru (viz *Obr. 1.5*) a klikovou hřídel. Magnetická komora je složena z jednoho protipólu elektromagnetu, dvou permanentních magnetů, tří magnetických nosníků a dvou pokovených rámu. Magnety vytvářejí magnetické síly, které se buď vzájemně přitahují anebo odpuzují. Pól elektromagnetu může být severní anebo jižní, je možno ho změnit obrácením polarity. Je zavěšen ve středu rámu s permanentním magnetem na obou koncích a je napájen ze zdroje el. energie. Magnetická síla od magnetů pohybuje rámem, který je připojen k ojnici. Rám a nosníky jsou sloučeny do jednoho. Celkového zdvihu se dosahuje skrze lineární pohyb rámu, který se pohybuje po celé délce magnetické komory v obou směrech. Při pohybu je tlačěn nebo přitahován mag. silou magnetů. Nosníky jsou připojeny k bloku motoru, tyče s permanentními magnety jsou přidělané na ně. Ojnice je tvořena dvěma tyčemi

s mag. ložisky na obou koncích. Ojnice je spojena s hřídelí. Kliková hřídel je připevněna k bloku motoru ze strany pomocí mag. ložisek a je připojena k setrvačníku a generátoru. Hřídel konvertuje lineární pohyb na otáčivý. Výhodou je poměr mezi silou působící na ojnici a točivým momentu na hřídeli. [11]



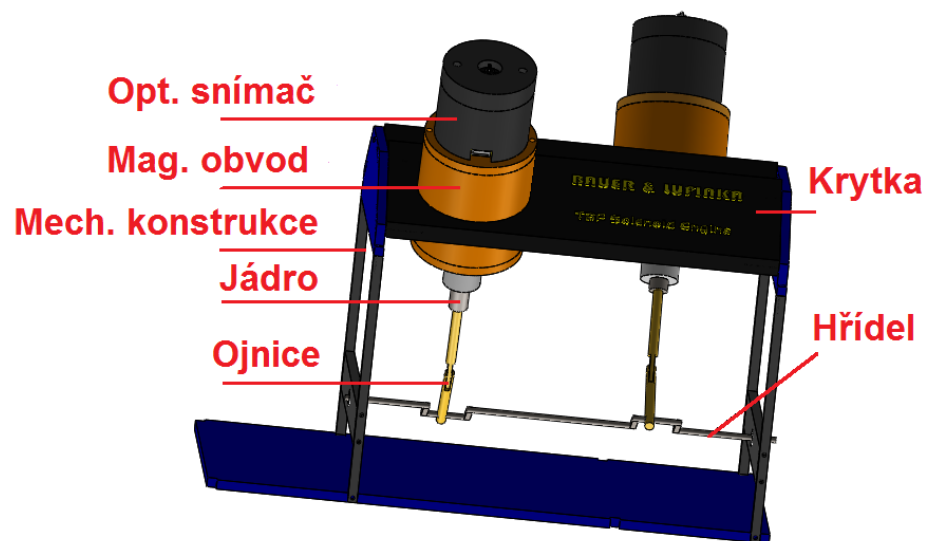
Obr. 1.5: Magnetická komora [11]

2 Konstrukční návrh prototypu

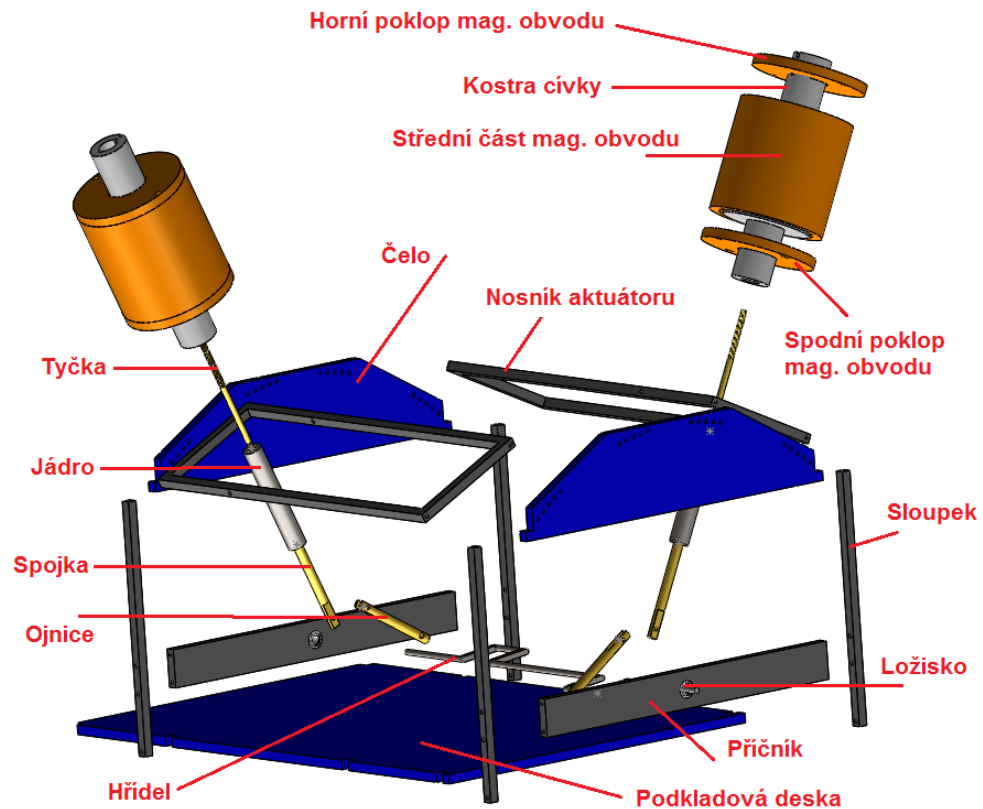
Pro studijní účely bylo rozhodnuto vyrobit motor ve dvouválcové variantě – tedy se dvěma lineárními elektromagnetickými aktuátory, a to z důvodu, že se dvěma aktuátory dochází v čase k delšímu silovému působení na hřídel, než kdyby byl využit pouze jeden. Umístění aktuátorů nad hřídelí ve tvaru písmena „V“ bylo vybráno vzhledem k analogii se spalovacím motorem a také pro lepší přístup k aktuátorům a lepšímu využití místa a také možnosti využít jednodušší klikovou hřídel. Základními požadavky na konstrukci byla jednoduchost, kompaktnost a zároveň mechanická stabilita.

2.1 Vlastní konstrukce

Pro návrh konstrukce motoru byl využit software SolidWorks, ve kterém byl vytvořen kompletní 3D model, a jeho doplněk SolidWorks Motion, ve kterém byla nasimulována jeho funkce a vytvořena pohybová studie. Většina dílů byla poté vyrobena v univerzitní prototypové dílně, přičemž některé speciální součásti byly vytištěny na 3D tiskárně na Katedře teoretické elektrotechniky. Výsledný motor je složen z několika částí – z nosné konstrukce, aktuátorů, konstrukce pro řízení, klikové hřídele a elektronických částí – dvou desek plošných spojů pro elektronické spínače, řídicí desky Arduino Mega, LCD displeje a relé modulu. Výsledný model motoru bez elektroniky je zobrazen na *Obr. 2.1*. Na *Obr. 2.2* se nachází rozložený model konstrukce s popsány částmi, které budou posléze podrobně popsány a rozebrány v následujících podkapitolách.



Obr. 2.1: Výsledný model motoru



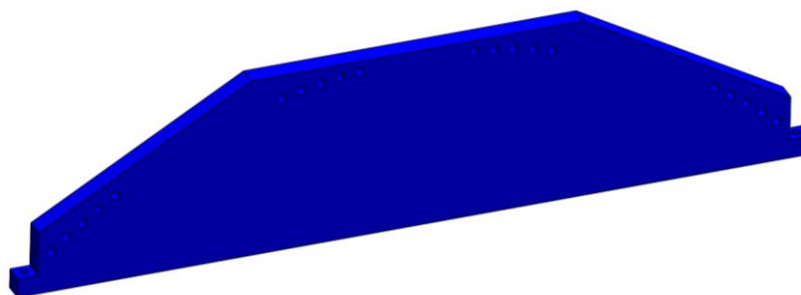
Obr. 2.2: Rozložený model konstrukce s popsanými částmi

2.1.1 Nosná konstrukce

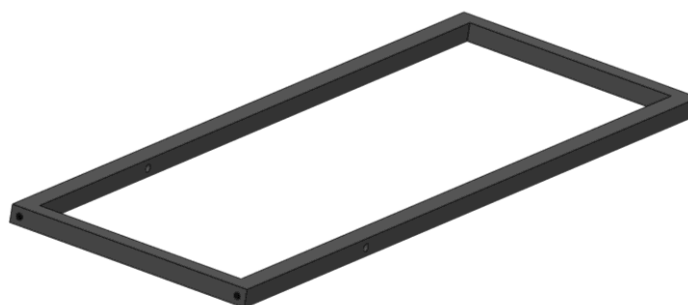
Všechny uvedené rozměry jsou ve formátu $x \times y \times z$ (šířka \times výška \times délka) z pohledu zepředu na motor, tedy ve směru hřídele.

Základem je podkladová deska (výkres je v příloze A) o rozměrech $200 \times 5 \times 300$ mm, ve které jsou 5 mm od jednoho okraje a 75 mm od druhého vytvořeny otvory $5 \times 5 \times 5$ mm, do kterých jsou usazeny a přišroubovány nosné sloupky (výkres v příloze B), jejichž výška je 133 mm. 25 mm nad plochou podkladové desky jsou mezi nosné sloupky přišroubovány dvěma šroubky z každé strany příčnický (výkres v příloze C) o šířce 190 mm, délce 5 mm – jsou tedy rovnoběžné s kratší stranou desky – a výškou 20 mm. V příčnicích jsou uprostřed vyvrtány otvory o průměru 9 mm, ve kterých jsou uložena kuličková ložiska, v nichž je uchycena kliková hřídel. Ze shora na nosné sloupky jsou na obou stranách přidělena čela o rozměrech $200 \times 47 \times 5$ mm, výkres se nalézá v příloze D, jsou zobrazeny na Obr. 2.3. V čele jsou po obvodu imaginární kružnice se středem v se hřídele vyvrtány otvory pro šrouby pro uchycení nosníků pro aktuátory. Okraje jednotlivých děr jsou od sebe vzdáleny 2,82 mm, každá příslušná dvojice děr má mezi sebou vzdálenost (mezi okraji) přibližně

62,9 mm. Průměr děr je 3 mm. Více otvorů je zde proto, že nosníky aktuátorů je možno přidělat pěti způsoby a tak měnit úhel mezi aktuátory. Nosníky aktuátorů (viz *Obr. 2.4*), jejichž výkres se nachází v příloze E, jsou složeny ze 4 částí – 2 kratších a 2 delších. Delší části jsou $5 \times 5 \times 200$ mm, kratší $70 \times 5 \times 5$ mm. Všechny části jsou sešroubovány v jeden celek (v kratší i delší části je závit, šroub je šroubován skrze čelo). Do delších stran jsou 55 mm od okraje celku vyvrtány otvory s průměrem 2,2 mm pro uchycení aktuátorů. U druhého nosníku jsou díry inverzně 55 mm od druhého kraje, aby aktuátory nebyly přímo proti sobě. Nosníky jsou překryty krytkami vytisknutými na 3D tiskárně, dodávají motoru ucelenější tvar.



Obr. 2.3: Čelo – pohled zepředu



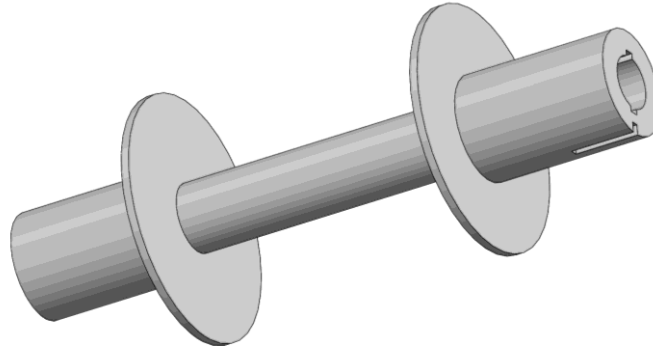
Obr. 2.4: Nosník pro aktuátory

2.1.2 Konstrukce aktuátorů

Dva aktuátory tvoří hlavní část celého motoru, jejich detailním návrh je rozebrán v kapitole č. 3. Zde je popsána pouze jejich mechanická konstrukce. Ta se skládá z elektrického obvodu – navinuté cívky, z magnetického obvodu tvořeného pláštěm a pohyblivým jádrem, kostry cívky ze silonu, na kterou je navinutá cívka, a spojky jádra s klikovou hřídelí.

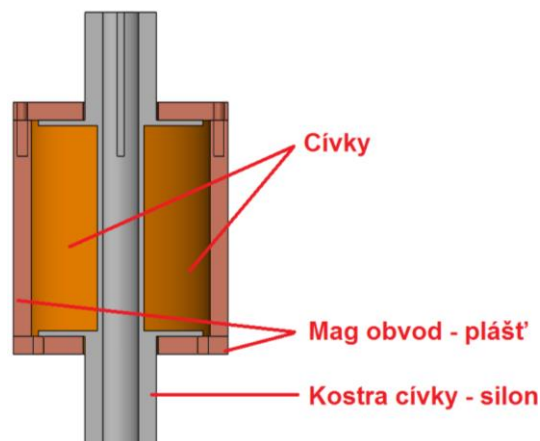
Konstrukce nosného silonu pro cívky je vidět na *Obr. 2.5*. Silon byl využit z důvodu dobrého kluzného kontaktu mezi jádrem a kostrou cívky. Vnitřní poloměr je všude 5 mm.

Vnější poloměr těch částí, kde již není cívka, je 10 mm, na horní části je vyříznutá drážka pro uchycení kloboučku. Vnější poloměr vnitřní části, na které je namotaná cívka, je 7,5 mm. Poloměr kotoučů ohraničujících cívku je 23 mm. Výkres se nachází v příloze F.



Obr. 2.5: Silonová kostra cívky

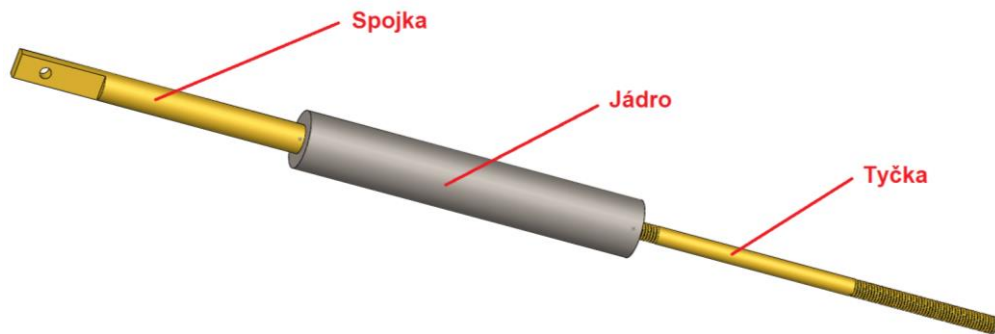
Plášť magnetického obvodu je vyroben z oceli a je složen ze tří částí – horního a spodního poklopu a střední části. Vnitřní poloměr střední části činí 25 mm, vnější 30 mm, tloušťka stěny je tedy 5 mm, výška je 60 mm. Vnitřní poloměr horní a dolní části je 10,5 mm, vnější 30 mm, tloušťka 5 mm. Na Obr. 2.6 je zobrazen řez magnetickým obvodem včetně silonu. Výkres mag. obvodu je zobrazen v příloze G.



Obr. 2.6: Řez magnetickým obvodem včetně silonu

Součástí magnetického obvodu je i feromagnetické pohyblivé jádro z oceli (výkres v příloze H), což je váleček o poloměru 5 mm a délce 60 mm. Na horní straně je do jádra vytočen závit o poloměru 1,5 mm a délce 10 mm, do kterého je zašroubovaná mosazná tyčka (výkres v příloze CH), na které je upevněn kód sloužící k určení polohy jádra. Na spodní straně je do jádra vytočen závit o poloměru 2,5 mm a délce 15 mm, do kterého je zašroubována mosazná spojka (výkres se nachází v příloze I) s ojnicí o délce 62 mm,

poloměru 2,5 mm, na spodní straně 15 mm od kraje je spojka zploštěna na tloušťku 2,3 mm a 4 mm od kraje je vyvrtána díra o poloměru 1 mm sloužící k pohyblivému spojení s ojnicí. Delší závit je zde z důvodu možnosti přesného nastavení vzdálenosti jádra od hřídele. Celé toto spojení je vidět na *Obr. 2.7*.

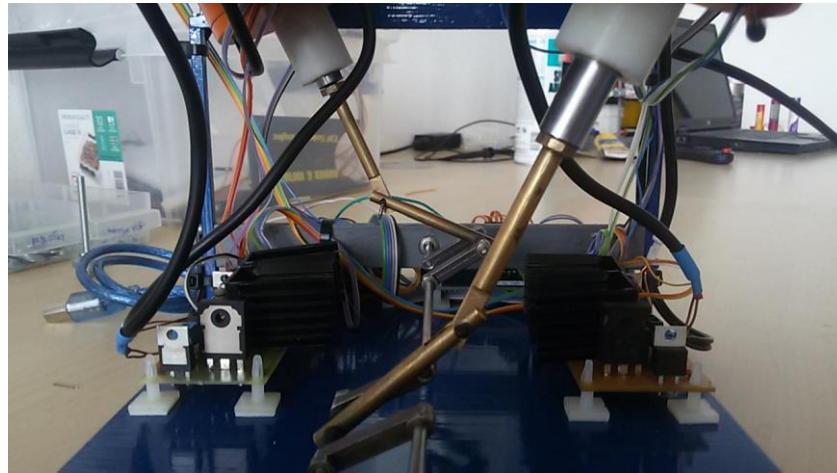


Obr. 2.7: Sestava jádra, spojky a tyčky

Pro pohyblivé spojení mezi jádrem, respektive spojkou, a klikovou hřídelí je využita jednoduchá mosazná ojnice (viz *Obr. 2.8*), jejíž výkres se nalézá v příloze J. Jejím základním tvarem je válec o poloměru 2,5 mm a délce 50,5 mm. Na jedné straně je do ojnice vyvrtaná díra o poloměru 1,5 mm, její střed se nachází 5,5 mm od kraje, slouží k pohyblivému spojení ojnice s hřídelí. Na druhé straně je ojnice vyříznuta v délce 15 mm a šířce 2,5 mm. Na obou stranách jsou vyvrtány díry o poloměru 1 mm, jejich střed se nachází 5 mm od kraje. Tyto díry slouží k pohyblivému spojení se spojkou vedoucí z jádra. Na *Obr. 2.9* je pro porovnání vidět reálně vyrobená ojnice, spojka a jádro.



Obr. 2.8: Ojnice



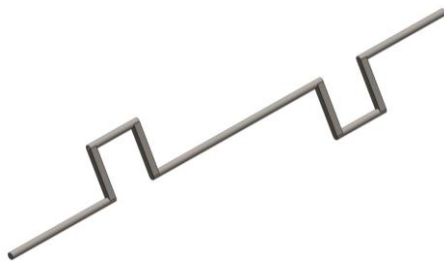
Obr. 2.9: Reálná podoba ojnice, spojky a jádra

2.1.3 Hřídel

Kliková hřídel společně s ojnici slouží k přeměně energie přímočarého vratného pohybu feromagnetického jádra lineárního elektromagnetického aktuátoru na rotační pohyb. Je to základní prvek pístových motorů. Během činnosti hřídele na ní působí mnoho sil a hřídel je tak namáhána v tlaku, ohybu i krutu. Je namáhána hlavně následujícími způsoby:

- silami přenášenými jednotlivými ojnici,
- setrvačnými účinky těles rotujícími s klikami,
- silami a momenty od torzního, ohybového a podélného kmitání,
- silami, způsobenými výrobními nepřesnostmi a deformacemi podpěr ložisek nebo materiály. [24]

Kliková hřídel může být vyrobena třemi způsoby. Prvním je kování v zápustkách, druhý je výroba tlakovým litím a třetí je skládáním z jednotlivých elementů. Pro naše účely používáme nejjednodušší typ vytvoření skládáním jednotlivých částí, které jsou k sobě sešroubované. Na Obr. 2.10 je jednak zobrazen návrh hřídele, ale také její skutečná podoba z výroby. Celková délka hřídele je 230 mm, její poloměr je 1,5 mm. 42 mm od jednoho konce začíná první klika, šířka ramen je opět 3 mm, délka kliky mezi rameny je 20 mm a poloměr 1,5 mm. Druhá klika začíná ve vzdálenosti 52 mm od druhého konce, ramena i vzdálenost ramen má stejnou jako první klika. Vzdálenost obou klik (měřena mezi rameny) je tedy 84 mm. Výkres je přiložen v příloze K, hřídel je vyrobena ze železa. [24]

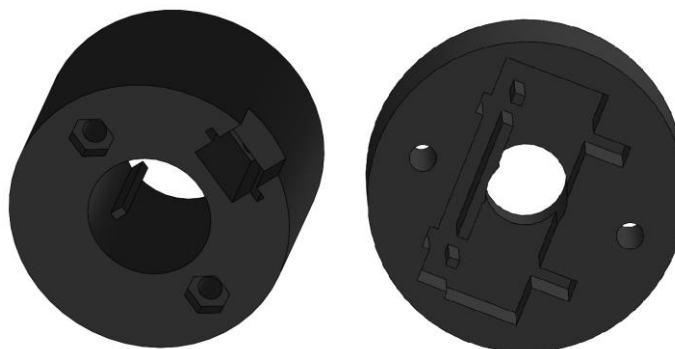


Obr. 2.10: Vlevo: návrh klikové hřídele, vpravo: reálně vyrobená kliková hřídel

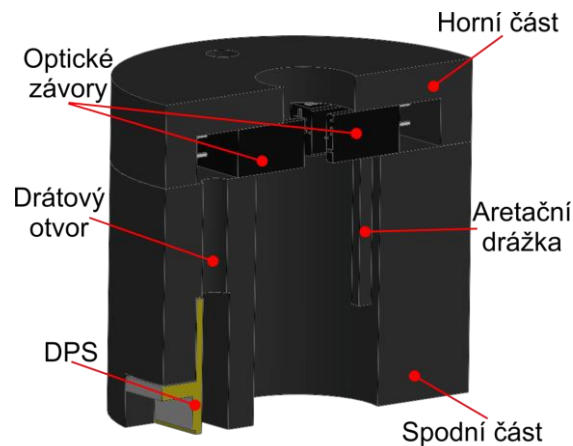
2.1.4 Přídavná konstrukce potřebná k řízení

Tato konstrukce byla navržena pro řízení prototypu. Jedná se o konstrukci, která je nad každým aktuátorem a jsou v ní uloženy dva optické snímače, destička plošného spoje, na které jsou referenční odpory, a stínítko reprezentující binární kód (Obr. 2.13). Konstrukce je tvořena dvěma částmi, každá je válcového tvaru, jsou k sobě přišroubované. Obě části byly vytisknuty na 3D tiskárně z materiálu ABS.

Spodní část obsahuje zobáček, kterým je konstrukce nasazena do drážky v silonu aktuátoru. Vnější poloměr spodní části je 25 mm, vnitřní pak 11 mm. Výška je 33 mm. Na vnější straně naproti zobáčku je zdířka pro destičku plošného spoje. V konstrukci jsou tři díry – dvě pro šrouby sloužící ke spojení s vrchní částí s průměrem 4,3 mm, jedna pak pro dráty vedoucí k destičce s průměrem 4 mm. Konstrukce spodní části je vidět na Obr. 2.11 vlevo. Horní část má stejný vnější poloměr jako spodní, vnitřní je pouze 6,5 mm a vysoká je 11 mm. Jsou zde opět dvě díry pro sešroubování částí k sobě. Ze spodu části je v ní místo vysoké 6,3 mm pro uložení dvou optických snímačů. Díl je zobrazen na Obr. 2.11 vpravo. Řez celým nástavcem včetně popisu je vidět na Obr. 2.12.

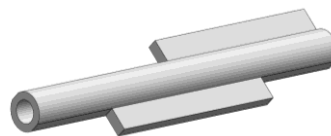


Obr. 2.11: Vlevo – spodní část konstrukce pro řízení, vpravo – horní část



Obr. 2.12: Řez nástavcem včetně popisu [5]

Pro řízení prototypu se využívá optických snímačů umístěných v konstrukci, která byla popsána výše. Tyto snímače snímají binární kód, který je přidělán na tyčkách vedoucích z jader aktuátorů. Výška kódu je 52 mm, vnější poloměr je 2,4 mm, vnitřní poloměr měří 1,5 mm. Hrany jsou zploštělé a vycházejí z nich výstupky reprezentující binární jedničku. Tyto výstupky jsou 3,14 mm široké, 1,5 mm vysoké a 26 mm dlouhé. Nižší výstupek začíná 13 mm od spodní hrany, vyšší začíná souběžně s horní hranou. Kódy na obou aktuátorech jsou vůči sobě pootočený o 180 stupňů. Kód je vyobrazen na Obr. 2.13.



Obr. 2.13: Stínítko s binárním kódem

2.2 Pohybová studie

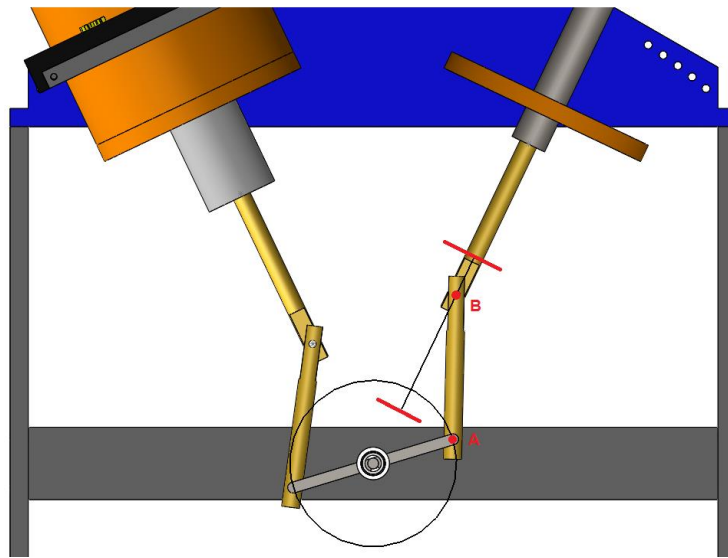
Pro simulaci pohybu hřídele byl využit software SolidWorks Motion, ve kterém byla vytvořena pohybová studie. Nejdříve se zkoumala dráha význačných bodů – první je na horní straně jádra (bod C), druhý na spodní straně jádra (bod D), třetí na konci spojky jdoucí z jádra (bod B) a čtvrtý na spoji ojnice s hřídelí (bod A). Poté se zkoumala závislost velikosti lineárního posunutí vzhledem k podkladu na čase pro oba body na jádru.

2.2.1 Trajektorie význačných bodů

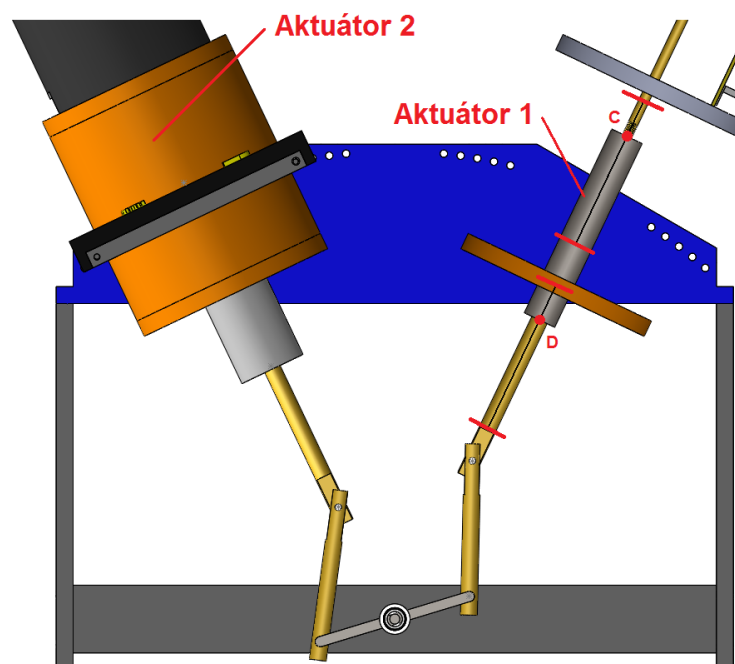
V první studii se zkoumala dráha, po které se pohybují význačné body hnacího ústrojí. Na Obr. 2.14 je vidět trajektorie bodu na spojnici hřídele s ojnicí (bod A), který se pohybuje po kružnici o poloměru daném velikostí kliky na hřídeli. Druhá trajektorie patří bodu na

spojnici ojnice a spojky vedoucí z jádra (bod B), tento bod se pohybuje po přímce nahoru a dolů, jeho ohraničení je označeno červenými čarami.

Také body na horním (bod C) a spodním konci (bod D) jádra se pohybují po přímkách, dohromady přímky znázorňují, odkud kam se pohybuje jádro. Tato trajektorie je na *Obr. 2.15*. Červené čáry na obrázku vymezují pozice, odkud kam se pohybuje bod C resp. bod D. Je vidět, že bod C se pohybuje celou dobu uvnitř aktuátoru, oproti tomu bod D do aktuátoru vůbec nezajíždí – končí na spodní hraně mag. obvodu.



Obr. 2.14: Trajektorie bodu na hřídeli (A) a bodu na spojici ojnice se spojkou (B)

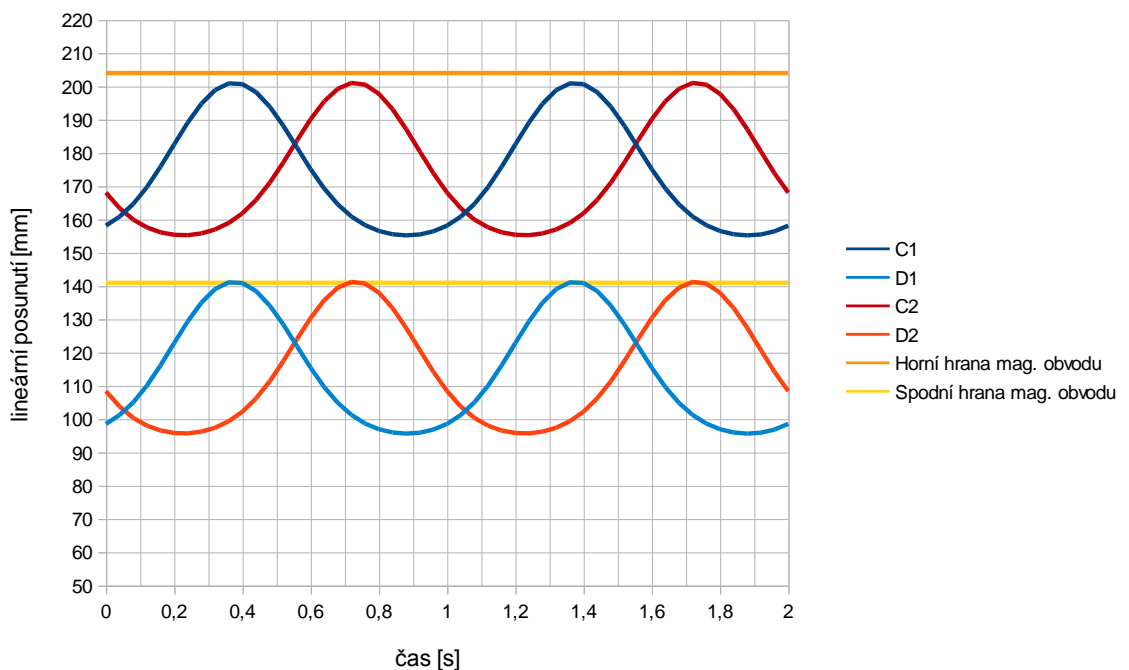


Obr. 2.15: Trajektorie bodů na horní (C) a spodní straně jádra (D)

2.2.2 Lineární posunutí

Tato pohybová studie se zaměřila na velikost lineárního posunutí bodů v závislosti na čase. Zvolena byla rychlost otáčení 60 otáček za minutu. Studie byla provedena pro obě jádra a pro dva body na každém jádře – pro bod na horní straně jádra (bod C) a pro bod na spodní straně jádra (bod D). Číslo za bodem značí aktuátor – 1 znamená jádro na předním aktuátoru, 2 potom jádro na zadním aktuátoru. Velikost lineárního posunutí je dána souřadnicemi v prostoru. Spočítá se jako druhá odmocnina ze součtu druhých mocnin jednotlivých prostorových souřadnic x , y , z . Mění se pouze dvě souřadnice, jedna zůstává konstantní. Poloha se určovala vzhledem k bodu ležícímu na podkladové desce pod hřídelí a pod příslušným aktuátorem. Výsledná závislost pro všechny čtyři body je zobrazena na *Obr. 2.16*. Vodorovné oranžové přímkové čáry v grafu značí polohu mag. obvodu aktuátoru, konkrétně jeho horní a spodní vnitřní hranu. Je tak názorně vidět, v jakých polohách vzhledem k mag. obvodu se body na jádrech aktuátorů nacházejí v čase.

Funkce může připomínat funkci sinus, ale není tomu tak. V oblasti maximálního posunutí je jádro kratší dobu, než v oblasti minimálního posunutí.



Obr. 2.16: Závislost velikosti lineárního posunutí 2 bodů na obou jádrech na čase

3 Návrh aktuátorů

V našem projektu byl řešen lineární stejnosměrný elektromagnetický aktuátor s pasivním feromagnetickým jádrem, který využívá působení sil magnetického pole na jádro. Obecný popis a rozdělení aktuátorů je nastíněno v kapitole 1. Konstrukce aktuátoru byla popsána již v kapitole 2. Funkce je založena na tom, že průchodem budícího proudu I_b skrze N závitů cívky se indukuje v mag. obvodu tvořeném pláštěm a jádrem magnetické pole o mag. indukci \mathbf{B} . Toto pole se uzavírá skrze plášť do jádra a vytváří na něm silové působení \mathbf{F}_m , které se projeví vtahováním jádra do středu aktuátoru.

Aktuátor je tvořen dvěma základními částmi. První je elektrický obvod tvořený vinutím cívky na silonové nosné kostře. V našem aktuátoru jsou na sobě koaxiálně navinuty dvě cívky se shodným počtem závitů a to z důvodu snížení indukčnosti. Je možno přivádět proud pouze do jedné anebo do obou cívek a tím získat větší sílu. Druhou částí je magnetický obvod tvořený feromagnetickým pláštěm a pohyblivým feromagnetickým jádrem.

3.1 Matematický model

V této kapitole je formulován matematický model obecného lineárního elektromagnetického aktuátoru jak pro magnetický obvod, tak i pro elektrický obvod, dále jsou zde uvedeny nejdůležitější vztahy pro elektromagnetické pole.

3.1.1 Model magnetického pole

Rozložení magnetického pole v okolí aktuátoru lze v případě obecného případu popsat parciální diferenciální rovnicí, která vychází z první Maxwellovy rovnice formulované pro vektorový magnetický potenciál \mathbf{A}

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu(\mathbf{B}, T)} \operatorname{rot}(\mathbf{A} - \mathbf{B}_r)\right) - \boldsymbol{\nu} \times \operatorname{rot} \mathbf{A} + \gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = \mathbf{J}_{\text{ext}}. \quad (1)$$

V této rovnici $\mu(\mathbf{B}, T)$ označuje nelineárně závislou permeabilitu na velikosti mag. indukce \mathbf{B} a teplotě T . \mathbf{B}_r je remanentní indukce permanentních magnetů, γ elektrická vodivost, t čas, \mathbf{J}_{ext} externí proudová hustota. Tento vztah lze v mnoha případech značně zjednodušit. Například lze zanedbat vznik vířivých proudů vlivem časové změny mag. pole a zároveň při

nízkých rychlostech rovněž vznik vířivých proudů vlivem pohybu el. vodivých těles. Také závislost relativní permeability na teplotě lze v mnohých případech zanedbat – i v běžných provozních podmínkách, kdy je teplota aktuátoru stálá. Pro náš případ lze zanedbat samozřejmě remanentní indukci permanentních magnetů, protože zde žádné nemáme. Díky stejnosměrnému budícímu proudu je magnetické pole stacionární, a proto je i parciální derivace podle času nulová. Po všech zjednodušeních vznikne mnohem jednodušší vztah [4]

$$\operatorname{rot} \frac{1}{\mu(B)} \operatorname{rot} \mathbf{A} = \mathbf{J}_{\text{ext}}. \quad (2)$$

3.1.2 Model elektrického obvodu

V základním modelu neuvažujeme řídicí a regulační obvody. Takto zjednodušený el. obvod elektromagnetického aktuátoru představuje RLC obvod. Ten je v obecném případě popsán obyčejnou diferenciální rovnicí

$$Ri + L(i, \delta, v) \frac{di}{dt} = U_0. \quad (3)$$

R je el. odpor vinutí cívky, i časově proměnný proud v obvodu, L indukčnost cívky, která závisí nelineárně na budícím proudu, na poloze pohyblivého jádra δ a jeho rychlosti v . U_0 je napájecí napětí zdroje. Také u tohoto modelu je možno provést několik zjednodušení. Při nízké rychlosti jádra lze uvažovat závislost indukčnosti pouze na velikosti budícího proudu a poloze jádra. [4]

Model el. obvodu je propojen s modelem mag. pole pomocí nelineární indukčnosti L a zároveň pomocí obvodového proudu i . Platí vztah

$$i = \int_S \mathbf{J}_{\text{ext}} d\mathbf{S}. \quad (4)$$

3.1.3 Další důležité vztahy

Jestliže cívku prochází el. proud I , dojde v jejím okolí ke vzniku mag. pole reprezentovaného intenzitou mag. pole \mathbf{H} . V našem případě uvažujeme proud I stejnosměrný,

nedochází tedy ke vzniku posuvného proudu. Pro jeden závit cívky má první Maxwellova rovnice integrální tvar

$$\int_c \mathbf{H} \, dl = I, \text{ v diferenciálním tvaru pak } \operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J}. \quad [2] \quad (5)$$

Mag. pole, spřažené s jedním závitem cívky, vytváří v mag. obvodu v okolí cívky mag. indukční tok Φ , pro který platí

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \, dS, \quad (6)$$

kde \mathbf{B} je mag. indukce, kterou lze snadno spočítat z \mathbf{H} jakožto $\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}$. Jak již bylo zmíněno výše, μ je permeabilita feromagnetického materiálu a je nelineárně závislá na intenzitě mag. pole \mathbf{H} . Z toho plyne, že také závislost mezi \mathbf{B} a \mathbf{H} je nelineární. Pro celkový mag. tok Φ_c vytvořený N závity cívky pak platí

$$\Phi_c = N \cdot \Phi. \quad [2] \quad (7)$$

Mag. energii akumulovanou v aktuátoru lze zjistit dvěma způsoby. Prvním je výpočet z indukčnosti, pro který platí

$$W_m = \frac{1}{2} LI^2, \quad (8)$$

kde L je indukčnost cívky. [2]

Druhou možností pro výpočet energie mag. pole ze stavových vektorů \mathbf{B} a \mathbf{H} . Nejdříve spočteme hustotu mag. energie w_m

$$w_m = \int_0^B \mathbf{H} \, d\mathbf{B}. \quad [2] \quad (9)$$

Potom lze již jednoduše zjistit energii mag. pole jako

$$W_m = \int_V w_m dV . [2] \quad (10)$$

3.2 Numerický model

Aby byl navrhnut pro naše účely vyhovující aktuátor, bylo nejdříve nutné stanovit jeho rozměry a proudovou hustotu \mathbf{J}_b vytvořenou průchodem budícího el. proudu I_b skrze závity cívky. Proudová hustota je klíčová k dosažení požadovaného silového působení na jádro a spočítá se podle vztahu

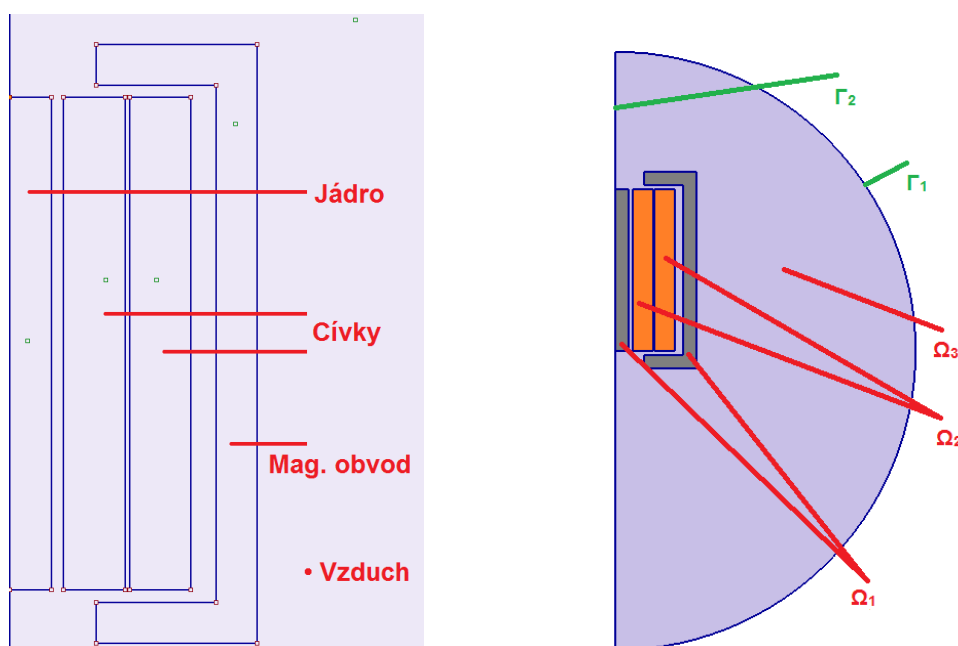
$$\mathbf{J}_b = \frac{NI}{(R-r) \times h}, \quad (11)$$

kde N je počet závitů cívky, I je stejnosměrný proud tekoucí cívkou, R je vnější poloměr cívek a r je vnitřní poloměr cívek, h je výška cívek. [6]

K vytvoření numerického modelu byl využit software Agros2D. Úloha by šla řešit i analyticky, ale bylo by to náročné, proto je mnohem lepší využít numerickou metodu konečných prvků. Protože mag. pole je stacionární (časově neproměnné), k vytvoření numerického modelu byla použita metoda okrajové úlohy pro potenciál, která je založena na vyjádření rovnic popisujících řešené mag. pole s využitím vektorového mag. potenciálu.

Zprv je nutné stanovit definiční oblast numerického modelu a její hranice – takzvanou geometrii modelu. Oblast je složena z jednotlivých podoblastí, které jsou oddělené rozhraními. Námi řešený aktuátor je rotačně symetrický podle osy procházející jeho středem, je tedy řešený ve válcových souřadnicích (z, r, φ). Definiční oblasti v modelu v Agros2D včetně popisu jsou zobrazeny na *Obr. 3.1* vlevo, vpravo jsou pak vidět jednotlivé oblasti včetně okolí. V Tab. 1 jsou jednotlivé oblasti a podmínky detailněji popsány a jsou zde uvedeny i rovnice. Jedná se o mag. obvod, cívky, jádro a okolí – vzduch. Jádro aktuátoru má poloměr 5 mm a výšku 60 mm, každá cívka má poloměr 7,5 mm a výšku rovněž 60 mm. Tloušťka mag. obvodu je 5 mm, jeho výška 84 mm, vzduchová mezera mezi cívkami a mag. obvodem je 1,5 mm nahoře a dole, resp. 3 mm na straně. Mag. obvod začíná 5,5 mm od hrany jádra.

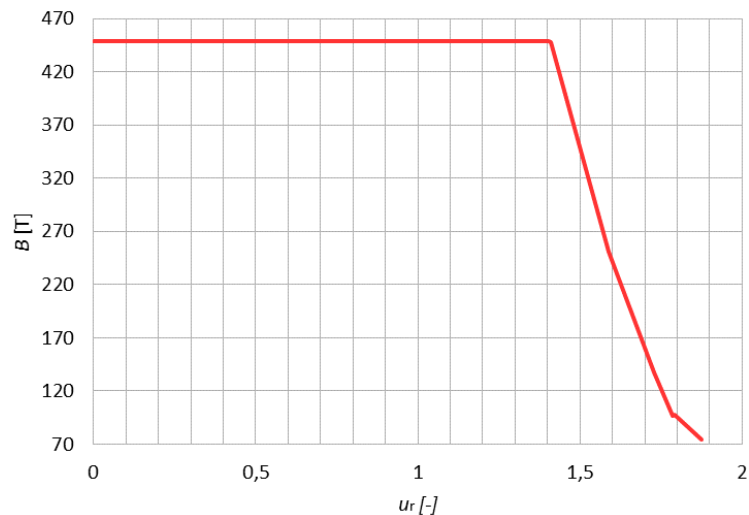
Je nutné definovat materiálové vlastnosti jednotlivých podoblastí. Vzhledem k řešené úloze se jedná pouze o relativní permeabilitu μ_r . Ta je pro všechny podoblasti kromě mag. obvodu a jádra konstantní a rovna jedné. Mag. obvod tvořený feromagnetickým materiálem a feromagnetické jádro mají nelineární závislost mag. indukce \mathbf{B} na intenzitě mag. pole \mathbf{H} , relativní permeabilita teda není konstantní. V numerickém modelu byla využita charakteristika závislosti relativní permeability na magnetické indukci pro ocel podle normy ČSN 12040 (viz Obr. 3.2). [6]



Obr. 3.1: Vlevo: geometrie modelu aktuátoru v Agros2D, vpravo: kompletní geometrie oblastí

Tab. 1: Jednotlivé oblasti a okrajové podmínky v numerickém modelu a rovnice v nich platící

Oblasti	Název	Materiál	Rovnice
Ω_1	Mag. obvod	Ocel	$\text{rot} \frac{1}{\mu_0 \mu_r(B)} \text{rot } \mathbf{A} = \mathbf{0}$
Ω_2	Cívky	Měď	$\text{rot} \frac{1}{\mu_0} \text{rot } \mathbf{A} = \mathbf{J}_{\text{ext}}$
Ω_3	Okolí	Vzduch	$\text{rot} \frac{1}{\mu_0} \text{rot } \mathbf{A} = \mathbf{0}$
Okrajové podmínky	Typ	Veličina	Rovnice
Γ_1, Γ_2	Dirichletova okr. podmínka	Vektorový mag. potenciál	$\mathbf{A} = \mathbf{0}$



Obr. 3.2: Závislost magnetické indukce na relativní permeabilitě oceli

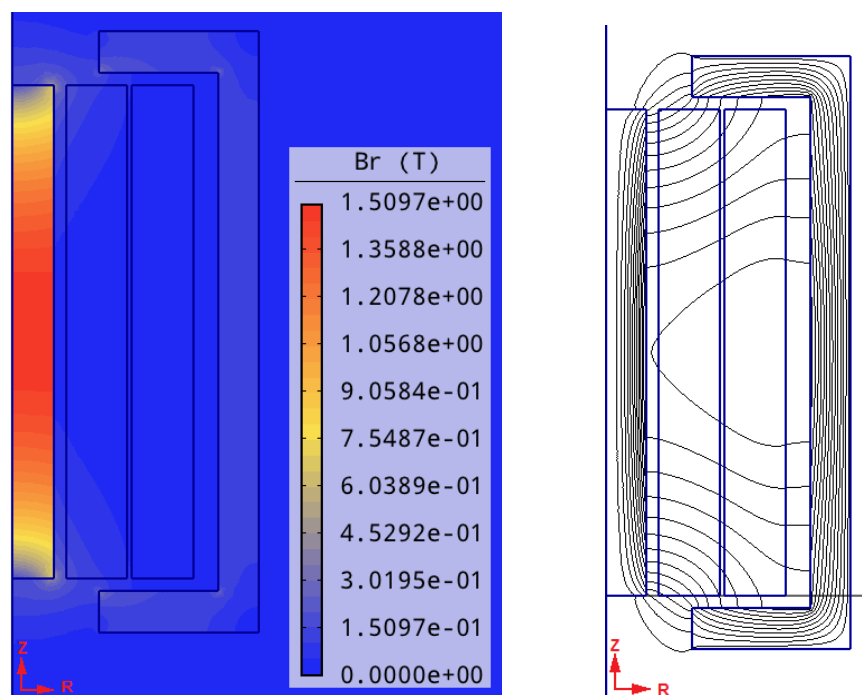
Po vytvoření definičních oblastí je nutná formulace matematického modelu pro daný problém, což znamená určit rovnice pro dané podoblasti. Pro podoblast cívek platí první Maxwellova rovnice (2), zde zapsaná v diferenciálním tvaru s dosazeným vektorovým mag. potenciálem. Pro zbylé podoblasti – mag. obvod (plášť), feromagnetické jádro – platí tatáž rovnice (2), ovšem proudová hustota \mathbf{J}_{ext} je nulová a mění se hodnota permeability. Detailně je to popsáno v Tab. 1. [6]

Pro důslednou formulaci numerického modelu je zapotřebí stanovit podmínky platící na hranicích podoblastí. Lze volit mezi Dirichletovými okrajovými podmínkami – známe potenciál na hranici, nebo Neumannovou okrajovou podmínkou – na hranici známe derivaci potenciálu podle vnější normály. Případně lze obě podmínky skombinovat. Hranice tvořící povrch aktuátoru je v případě nulového mag. pole vně aktuátoru siločárou, proto je možné použít Dirichletovu okrajovou podmínku. Vzhledem k antisymetrii na zbytku hranice platí tatáž podmínka, pro kterou platí $\mathbf{A} = \mathbf{0}$. [6]

3.3 Výsledný návrh

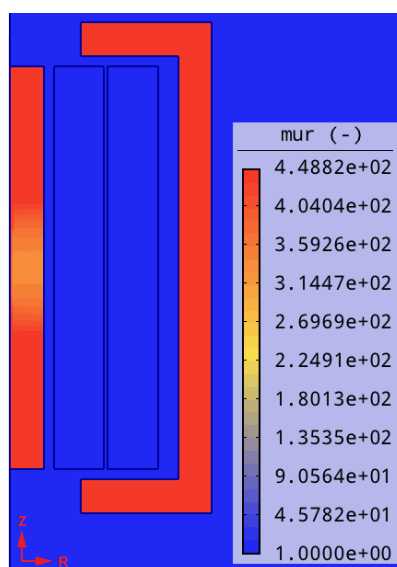
Cílem bylo navrhnout cívky (proud tekoucí cívkami a počet závitů a rozměry mag. obvodu) tak, aby síla působící na pohyblivé jádro byla co největší a dostačující pro naše účely. Postupným návrhem byly zjištěny hodnoty jmenovitého proudu $I_n = 3 \text{ A}$ do každé cívky (může být buzena jen jedna nebo obě najednou) a počet závitů pro každou cívku $N = 330$. Řešení bylo provedeno pro pohyb jádra v pracovním rozsahu aktuátoru, který je vidět na Obr. 2.16. Výpočtem modelu se získaly hodnoty vektorů \mathbf{B} a \mathbf{H} . Rozložení

magnetické indukce \mathbf{B} v aktuátoru při zapojení obou cívek a nulovém vysunutí jádra je vidět na *Obr. 3.3* vlevo a rozložení siločar vektorového potenciálu \mathbf{A} na *Obr. 3.3* vpravo.



Obr. 3.3: Vlevo: rozložení magnetické indukce v modelu aktuátoru, vpravo: siločáry vektorového potenciálu v aktuátoru

Rozložení relativní permeability μ_r v aktuátoru je vidět na *Obr. 3.4*. V mag. obvodu je rozložení rovnoměrné a relat. permeabilita má konstantní hodnotu. Na druhou stranu, v jádře aktuátoru je rozložení nerovnoměrné, relat. permeabilita nemá všude konstantní hodnotu, její hodnota směrem doprostřed jádra klesá vlivem přesycení jádra.

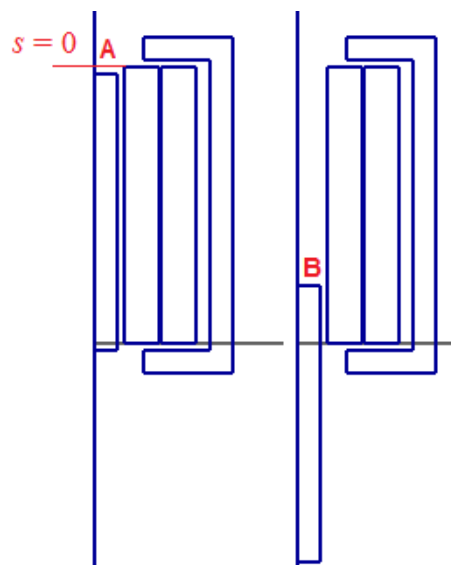


Obr. 3.4: Rozložení relativní permeability μ_r v aktuátoru

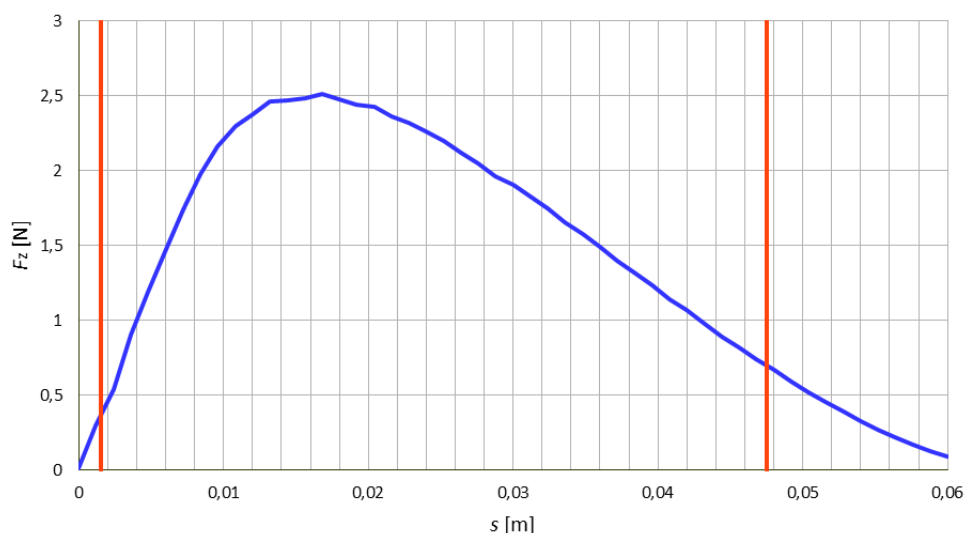
Energie mag. pole je závislá na indukčnosti cívky (9). V závislosti na poloze jádra (s) – jeho vysunutí či zasunutí – se mění hodnota indukčnosti. Sílu F_z působící na pohybující se jádro aktuátoru lze vyjádřit pomocí obecné definice síly v magnetickém poli vztahem

$$F_z = \frac{\partial W_m}{\partial s} = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{ds}. \quad (12)$$

Pomocí uživatelského formuláře v programu Agros2D, který pomocí Maxwellova tenzoru pnutí počítá sílu působící na jádro, které se vtahuje do aktuátoru, byla zjištěna závislost této síly na poloze jádra. Tato závislost se nazývá statická charakteristika a je zobrazena na Obr. 3.6, konkrétně pro pohyb jádra dolů. Svislé červené čáry v grafu naznačují, odkud kam se jádro v aktuátoru pohybuje. V našem konstrukčním návrhu se jádro nepohybuje v celém aktuátoru, ale pouze v jeho části, konkrétně ve vzdálenosti 46 mm. Krajiní polohy jádra jsou zobrazeny na Obr. 3.5, kde horní poloha je označena jako A, dolní poloha potom jako B. Za referenční polohu jádra, kdy je posunutí nulové, byla zvolena ta poloha, kdy je jádro v jedné rovině s cívkou, tedy jeho horní plocha je 1,5 mm od spodní hrany horní části mag. obvodu (na Obr. 3.5 vyznačeno jako $s = 0$). Jako referenční část jádra byla zvolena jeho horní plocha, ta se v nejvrchnější poloze (poloha A, Obr. 3.5) jádra nachází 3 mm pod spodní hranou horní části magnetického obvodu (tedy 1,5 mm pod hranou cívky), v nejspodnější poloze (poloha B, Obr. 3.5) se pak nachází ve vzdálenosti 49 mm od spodní hrany horní části mag. obvodu (tedy 47,5 mm pod horní hranou cívky). Maximální síla působící na pohybující se jádro je $F_z = 2,51$ N při proudu $I = 3$ A tekoucím každou cívku.

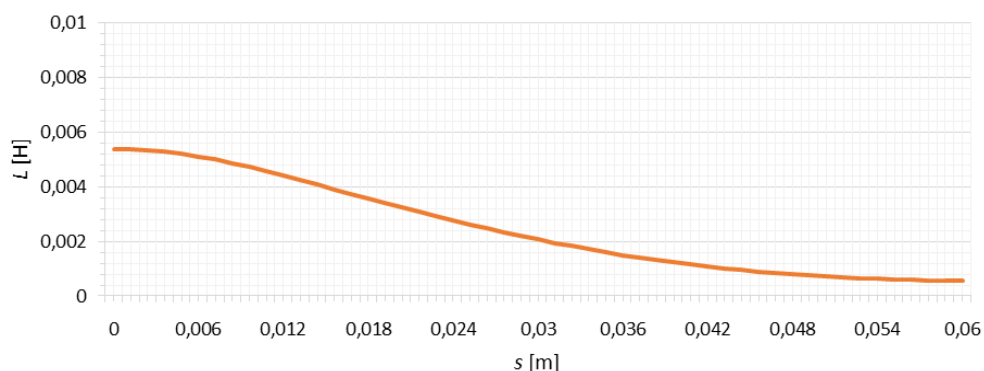


Obr. 3.5: Znárodnění krajiných poloh jádra v modelu aktuátoru



Obr. 3.6: Závislost síly působící na jádro na posunutí při pohybu dolů

Pomocí uživatelského formuláře byla také spočítána energie mag. pole v jednotlivých bodech při napájení jedné cívky v závislosti na poloze jádra aktuátoru a z ní byla pomocí vztahu (8) dopočítána indukčnost, jednotlivé hodnoty byly vyneseny do grafu a tak byla získána závislost indukčnosti cívky na poloze jádra, která je vidět na Obr. 3.7. Maximální indukčnost cívky v krajní poloze vyšla výpočtem 5,37 mH.



Obr. 3.7: Závislost indukčnosti cívky na poloze jádra

3.4 Dynamické vlastnosti

U dynamických vlastností aktuátoru jsou zkoumány závislosti polohy jádra na čase a rychlosti jádra na čase. Dynamika byla zkoumána pro zapojením obou dvou cívek v aktuátoru. Dynamika pohyblivého jádra aktuátoru je popsána soustavou dvou obyčejných diferenciálních rovnic – pohybové rovnice

$$F = m \frac{dv}{dt}, \quad (13)$$

$$v = \frac{ds}{dt}, \quad (14)$$

kde m je hmotnost jádra aktuátoru spolu se spojkou a tyčkou se stínítkem, v je jeho rychlost, t značí čas, s je dráha jádra. F je celková síla působící na jádro daná superpozicí jednotlivých sil. Jedná se například o tíhovou sílu, působící na jádro v kolmém směru k podložce, dále o třecí sílu vyvolanou kontaktem mezi jádrem a silonem a v neposlední řadě o sílu magnetického pole. Pro daný stav aktuátoru to lze zjednodušit na dvě výsledné síly – na sílu magnetického pole a na sílu zatěžující danou část. [4]

Pro výrazné zjednodušení lze pro náš případ uvažovat za sílu mag. pole průměrnou hodnotu síly získané ze statické charakteristiky – ta je $F = 1,526$ N při zapojení obou cívek. Za sílu zatěžující danou část lze brát pouze velikost tíhové síly $F_G = 0,466$ N, protože hmotnost jádra spolu s dalšími částmi na něm přidělanými je $m = 0,0475$ kg. Tíhové zrychlení je uvažováno $g = 9,81$ N/kg, které je typické pro naši zeměpisnou šířku. Pro vyřešení soustavy obyčejných diferenciálních rovnic byl využit skript v programu MATLAB, který je vidět pod tímto odstavcem. [4]

```
function [] = aktuator()
clear
clc

F_avg = 1.726; % prumerna sila
m = 0.0475; % hmotnost zavazi
g = 9.81;

function dsvdt = rce(t, sv)
dsvdt = [sv(2); F_avg/m - g];
end

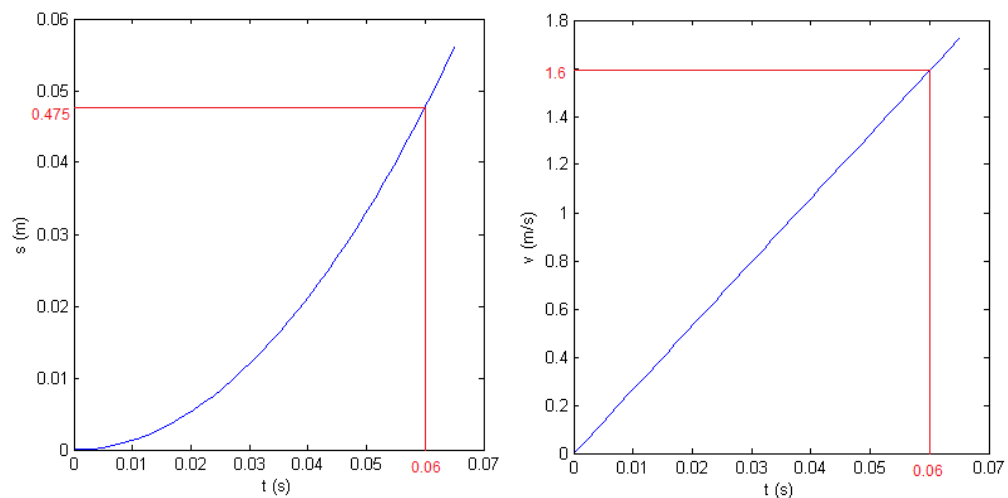
% pocatecni podminky reseni
s0 = 0;
v0 = 0;

% reseni soustavy
[t, sv] = ode45(@rce, [0, 0.03], [s0, v0]);
s = sv(:,1); v = sv(:,2);

% vykresleni vysledku reseni
subplot(1, 2, 1);
plot(t, s);
xlabel('t (s)'); ylabel('s (m)');

subplot(1, 2, 2);
plot(t, v);
xlabel('t (s)'); ylabel('v (m/s)');
end
```

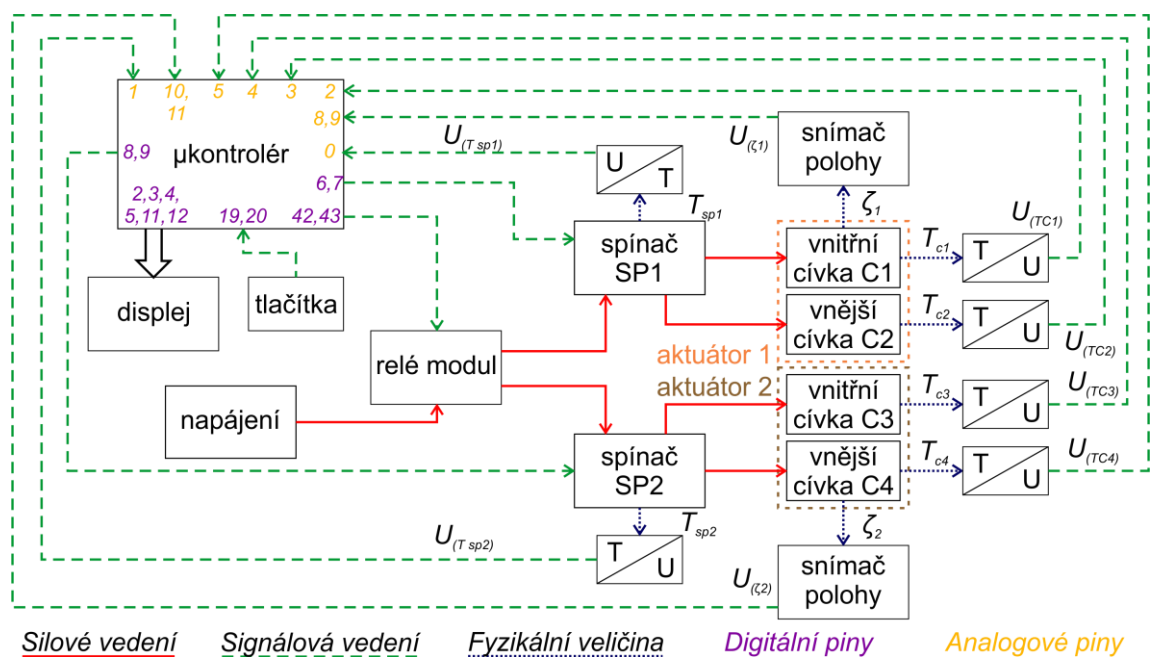
Pomocí tohoto skriptu byla tak získána přibližná závislost polohy jádra, respektive jeho vtáhnutí do aktuátoru, na čase (Obr. 3.8 vlevo), ve které je vidět, že se jádro z krajní polohy vtáhne o 46 mm do aktuátoru do polohy maximálního zasunutí za 60 ms. Závislost je kvadratická, grafem je tedy část paraboly. Dále byla získána závislost rychlosti jádra aktuátoru na čase (Obr. 3.8 vpravo). V poloze maximálního vtáhnutí jádra do aktuátoru dosahuje jeho rychlost přibližně 1,6 m/s. tato závislost je lineární, grafem je rostoucí přímka. Vypočítané teoretické dynamické vlastnosti – doba vtáhnutí jádra do aktuátoru a jeho maximální rychlost – odpovídají pozdějším hodnotám zjištěným měřením.



Obr. 3.8: Vlevo závislost polohy jádra na čase, vpravo závislost rychlosti jádra na čase

4 Stručný popis řízení motoru

Základem řízení je mikrokontrolér na řídicí desce Arduino. Pomocí něj jsou řízeny elektronické spínače, které spínají proudy jednotlivými cívkami tak, aby se hřídel správně otáčela. Informace o poloze hřídele dostává mikrokontrolér pomocí zpětné vazby od optických snímačů umístěných na každém aktuátoru, tyto informace jsou pro řízení klíčové. Dále jsou na každé cívce informační termistory, kde je měřeno napětí a to je pomocí referenčních odporů, které jsou na deskách plošných spojů, převedeno na teplotu. Termistory se nacházejí také na chladičích spínačů, slouží jako tepelná ochrana, protože pokud zde teplota vzroste nad 90 °C, mikrokontrolér pomocí relé modulu odpojí napájecí napětí, respektive ho zase připojí při poklesu teploty pod 75 °C. Součástí řízení je i možnost pomocí dvou tlačítek měnit směr otáčení a určit, zde budou připojené pouze dvě nebo všechny čtyři cívky. Kompletní blokové schéma řízení je vidět na *Obr. 4.1*.

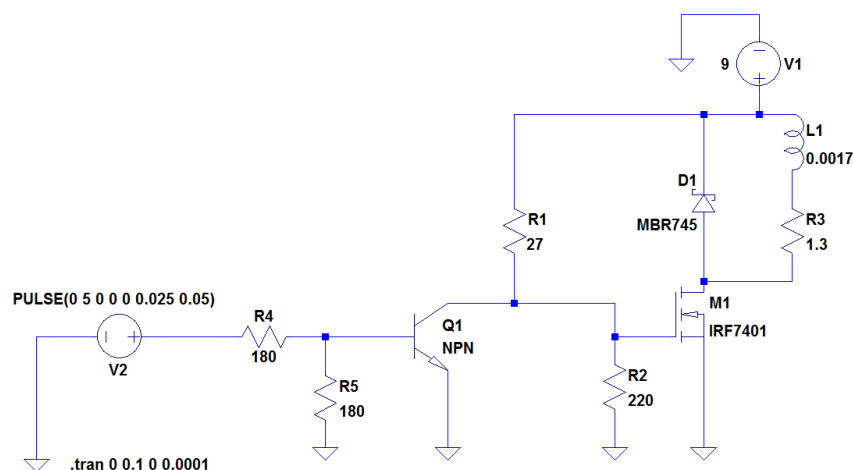


Obr. 4.1: Kompletní blokové schéma řízení motoru [5]

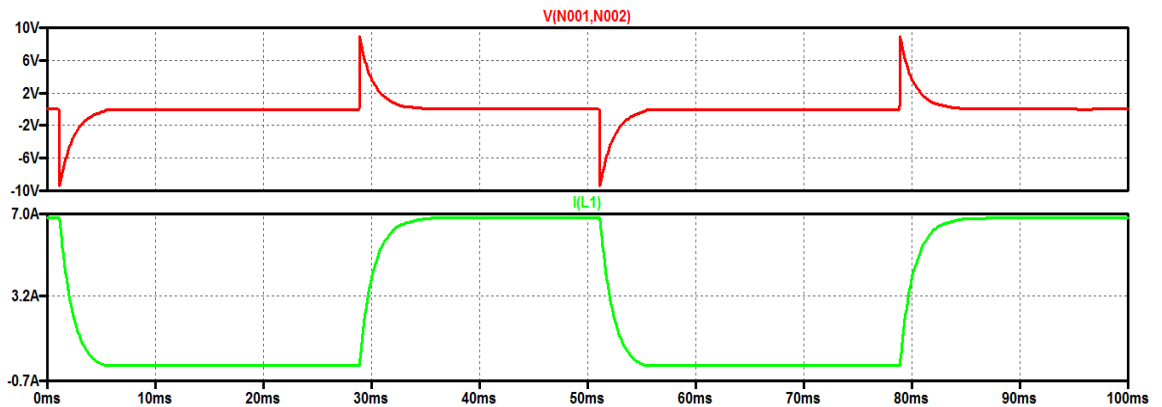
4.1 Napájení a elektronický spínač

Napájení motoru je realizováno pomocí laboratorního zdroje, to je přivedeno na relé modul, který slouží jako ochrana motoru, protože v případě vysoké teploty na chladičích spínačů dostane signál od mikrokontroléru a vypne, tedy odpojí motor od zdroje. Jmenovité napětí U_n potřebné k roztočení při zapojení pouze dvou cívek a za studena je $U_n = 9 \text{ V}$. [5]

Elektronické spínače byly zvoleny z důvodu, že nemají žádné mechanické části a nejsou tak náchylné k poruše a opotřebování. Základem je výkonový MOSFET tranzistor IRF740, kterému předchází bipolární tranzistor NPN v Darlingtonově zapojení TIP142, který je řízen proudem z Arduina a slouží k jeho zesílení a tím přispívá k rychlejšímu spínání MOSFETu. Dále je zde ochranná dioda MBR745 až na 40 V a odpory sloužící k vytvoření napětí potřebného pro řízení MOSFETu. Hodnoty odporů byly zjištěny experimentálně tak, aby vyhovovaly správné funkci spínače. Na výstupu z Arduina je odporový dělič, oba rezistory mají hodnotu odporu 180 Ω . Mezi kolektorem bipolárního NPN tranzistoru v Darlingtonově zapojení a katodou ochranné diody je výkonový rezistor s oporem 27 Ω . Rezistor mezi gate MOSFETu a zemí má velikost odporu 220 Ω . Spínače byly nejprve nasimulovány v simulačním programu LTspiceIV, kde byl použit náhradní obvod. Schéma náhradního obvodu je vidět na *Obr. 4.2*. Jako napájecí napětí pro cívku bylo v simulaci zvoleno stejnosměrné napětí 9 V. Signál z Arduina byl nahrazen pulsním zdrojem s periodou 50 ms a s amplitudou napětí 5 V po dobu $\frac{1}{2}$ periody. Simulace byla provedena pouze pro jednu cívku na jednom spínači. Průběhy napětí a proudu na cívce, která je v náhradním obvodu reprezentována svým odporem $R = 1,3 \Omega$ a indukčností $L = 17 \text{ mH}$, jsou vidět na *Obr. 4.3*. Simulace byla provedena pomocí tranzientní analýzy. [5]

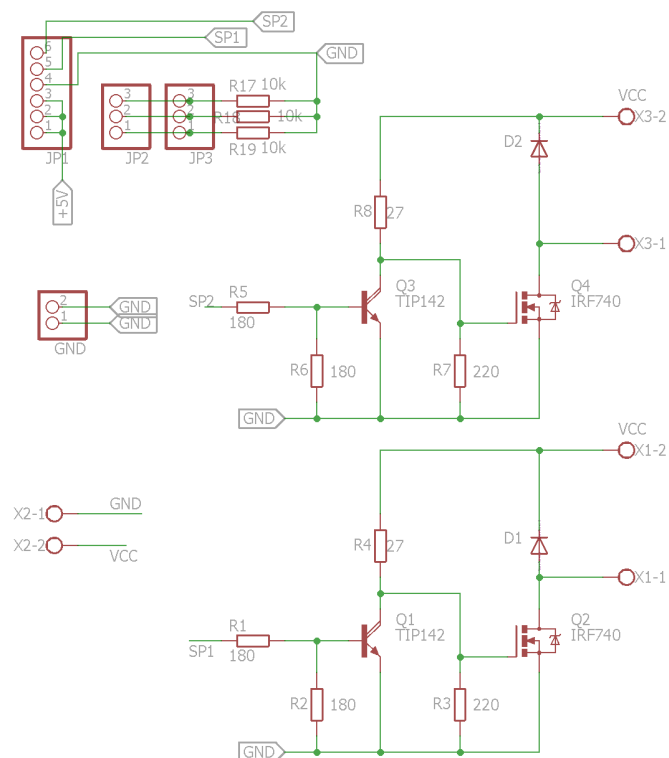


Obr. 4.2: Schéma náhradního obvodu v programu LTspiceIV



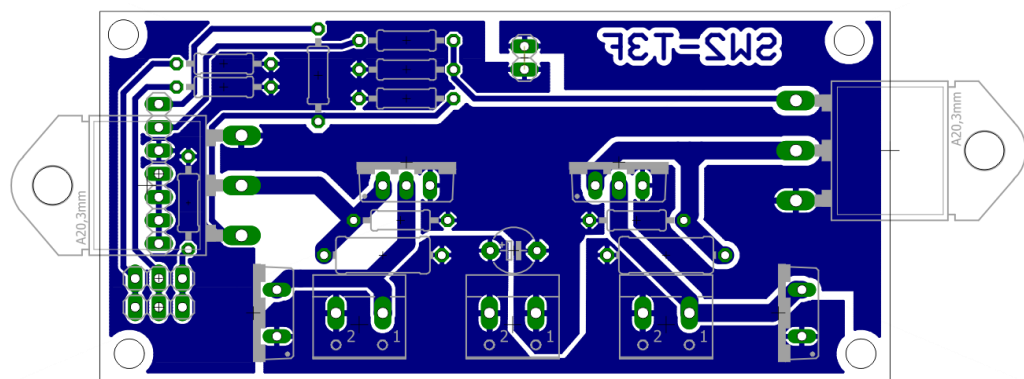
Obr. 4.3: Nasimulované průběhy proudu (I) a napětí (V) na cívce v závislosti na čase v LTspiceIV

Poté, co byl snímač nasimulován, a průběhy byly správné, byl spínač navrhnut v programu Eagle. Každá cívka má svůj vlastní spínač, přičemž na jedné desce plošného spoje jsou umístěny dva spínače (pro obě cívky jednoho aktuátoru) a také referenční rezistory pro měření teploty s velikostí odporu 10 k Ω . Dále se ve schématu nalézají ještě jedna svorkovnice pro přivedení napájecího napětí z relé modulu, dvě svorkovnice pro propojení desek s cívkami, konektory sloužící k propojení referenčních odporů s termistory a konektory pro propojení DPS s platformou Arduino – slouží k přivedení řídicích signálů na desku. Každý aktuátor má svojí desku, tudíž na motoru jsou celkově dvě DPS. Výsledné schéma pro jednu desku plošného spoje je vidět na Obr. 4.4. [5]



Obr. 4.4: Výsledné schéma zapojení pro jednu DPS v programu Eagle

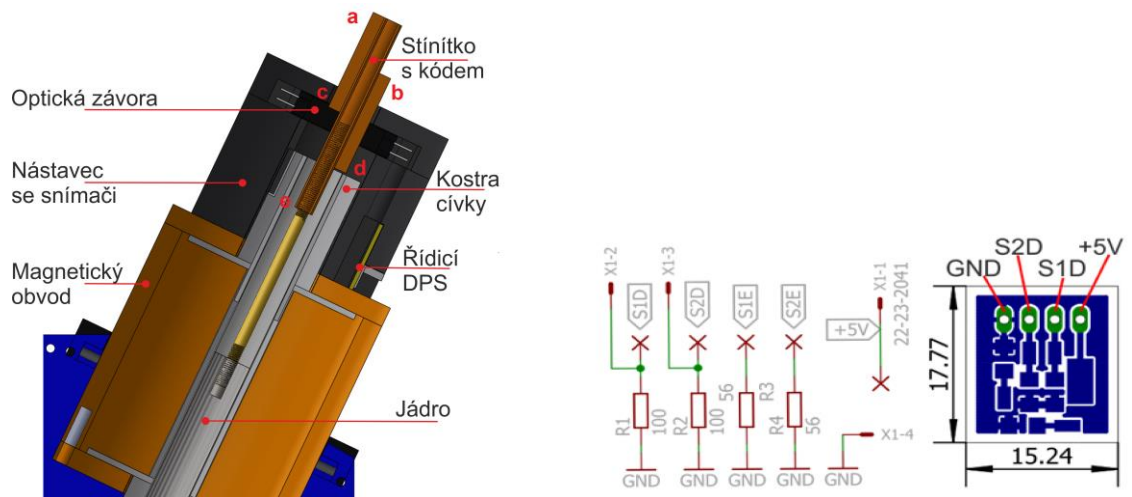
Když bylo schéma kompletně hotové, zbývalo již pouze v Eagle vytvořit návrh desky plošného spoje ze schématu, který se řídil příslušnými pravidly pro tvorbu DPS. Výsledný návrh DPS se nachází na *Obr. 4.5*. Deska je rozdělena na signálovou a výkonovou část, každá část má svoji rozlitou zem, obě země jsou spojeny propojkou. Na desce se také nachází blokovací kondenzátor. Na obou MOSFET tranzistorech jsou namontovány chladiče, aby při chodu motoru zamezovaly rychlému nárůstu teploty. Desku pro jeden aktuátor jsme si vyrobili sami. Substrát pro DPS jsme osvětili pomocí UV záření přes potisknutou fólii a poté jsme desku vyleptali. Druhou deska byla pro nás vyrobena na Katedře aplikované elektroniky a telekomunikací.



Obr. 4.5: Schéma desky plošného spoje elektronického spínače [5]

4.2 Princip řízení

Základním stavebním kamenem pro řízení motoru jsou zpětnovazební prvky. Nejdůležitějšími zpětnovazebními prvky jsou optické snímače. Ty se nachází v nastavcích umístěných na aktuátorech, které byly popsány v kapitole 2.1.4. Průřez aktuátorem společně s nastavcem je zobrazen na *Obr. 4.6* vlevo. V každém nastavci jsou dva optické snímače. Tím, jak se pohybuje jádro aktuátoru, tak skrze nastavce prochází stínítko s binárním kódem (viz. *Obr. 2.10*), které je umístěno právě na tyčce vedoucí z aktuátoru. Tím, jak prochází stínítko, se mění napětí na optických snímačích. Napětí je měřeno pomocí referenčních odporů, které jsou umístěny na malé DPS (*Obr. 4.6* vpravo), která je zasunuta z boku do nastavce.



Obr. 4.6: Vlevo - řez aktuátorem a nástavcem, vpravo - schéma referenčních odporů a DPS [5]

Napětí na snímačích se převádí pomocí referenční úrovně napětí 1,15 V na binární číslo. Stav a-b odpovídá kódu 10, stav b-c kódu 00, stav c-d kódu 01 a stav d-e kódu 11. Jednotlivé stavy jsou ukládány do pole proměnných. Pomocí pohybové studie, provedené v SolidWorks Motion pro jednotlivé body stínítka (a, b, c, d, e) vůči snímací rovině (nulová poloha), byla získána akční tabulka, která je v kódu reprezentována čtyřrozměrným polem, které je vidět na Obr. 4.7. Kódy ze snímačů představují index tohoto pole. [5]

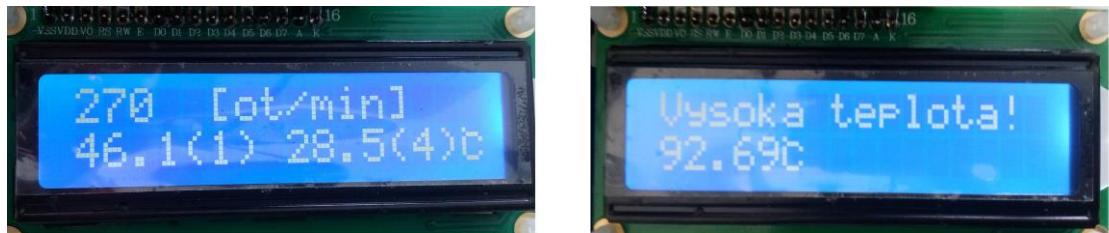
```
int act1P[2][2][2][2] = {{{{1, 0}, {1, 0}},
                          {{0, 0}, {1, 0}}},
                        {{{1, 1}, {1, 0}},
                          {{0, 1}, {1, 1}}}};
int act2P[2][2][2][2] = {{{{1, 1}, {0, 1}},
                          {{1, 1}, {0, 1}}},
                        {{{0, 0}, {0, 1}},
                          {{1, 1}, {1, 1}}}};
```

Obr. 4.7: 4D pole reprezentující akční tabulku [5]

Pomocí programu napsaného v prostředí Arduino, které je založeno na programovacím jazyku C, jímž se detailně zabývá ve své práci kolega Tomáš Bauer, lze pak dosáhnout výborného řízení motoru. Díky pohybové studii a výsledné akční tabulce a díky zpětné vazbě, má mikrokontrolér vždy přesnou informaci o tom, ve které poloze se obě jádra aktuátorů, respektive hřídel, nachází, a může podle toho sepnout příslušné cívky tak, aby se motor rozběhl z každé pozice. Motor se rozběhne z každé pozice, i když ho zatížíme. Pomocí programu nebo pomocí ovládacích tlačítek lze měnit směr otáčení a určit, zda budou spínány pouze dvě cívky anebo všechny čtyři. Program dále realizuje převody napětí na termistorech pomocí referenčních odporů a převodního vztahu na teplotu. Pomocí programu je též řízen

relé modul, když teplota na chladičích vzroste nad 90 °C, mikrokontrolér pošle signál a relé modul se vypne a tím dojde k ochraně motoru. [5]

Díky přídavnému LCD displeji jsou pomocí programu zobrazovány na displeji nejdůležitější informace, jak je vidět na *Obr. 4.8* vlevo. Jedná se o počet otáček, ty jsou snímány každou pátou otáčku, doba mezi nimi je měřena pomocí interního časovače mikrokontroléru. Jsou zobrazeny v otáčkách za minutu. Dále je na displeji zobrazena teplota na nejteplejší cívce (v závorce je číslo cívky) a teplota na nejteplejším chladiči (v závorce je opět uvedeno číslo příslušného chladiče). V případě překročení kritické teploty se na displeji zobrazí výstraha a aktuální teplota, což ilustruje *Obr. 4.8* vpravo.



Obr. 4.8: Vlevo – zobrazované informace na displeji, vpravo – výstraha na displeji [5]

5 Sestavení prototypu a jeho testování

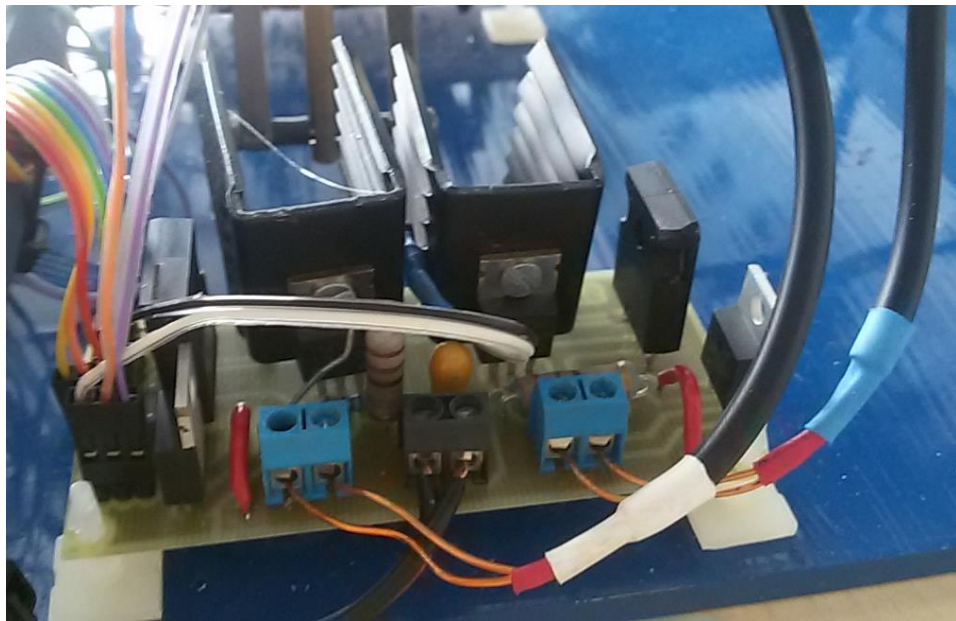
Po dlouhé době, která uplynula od prvotní myšlenky k praktické realizaci, je prototyp sestaven a plně funkční. To znamená, že všechny jeho konstrukční prvky jsou vyrobené a smontované dohromady. Jediným doplňkem, který je ještě ve výrobě, je mechanická podpěrka hřídele, která bude umístěna uprostřed podkladové desky a bude sloužit k lepšímu uchycení hřídele, aby se při chodu motoru tolik neprohýbala. Feromagnetická jádra aktuátorů jsou pomocí spojky a ojnice pohyblivě spojena s jednoduchou klikovou hřídelí, která je uložena v kuličkových ložiscích. V příloze L se nacházejí tři fotografie z výroby.

Aktuátory jsou přesně navrženy, v každém jsou na sobě koaxiálně navinuté dvě cívky se shodným počtem závitů $N = 330$. Navrženy jsou pro jmenovitý proud $I_N = 3$ A každou cívku, přičemž motor se roztočí za studena právě při tomto proudu procházejícím oběma cívkami při zapojení pouze jedné cívky v každém aktuátoru a při jmenovitém napětí $U_N = 9$ V dodávaným laboratorním zdrojem. Navinutí cívek bylo provedeno ručně na Katedře teoretické elektrotechniky a byl využit měděný drát o průměru 0,8 mm. Mezi jednotlivými vrstvami drátu je umístěna izolační páska. Na každé cívce se nachází termistor sloužící ke snímání teploty na cívkách. Odpor každé cívky je $R = 1,3 \Omega$ a její indukčnost $L = 0,017$ H při plně zasunutém jádře, tyto hodnoty byly změřeny RLC metrem. Hodnota změřené indukčnosti se oproti teoretické indukčnosti získané simulací v Agros2D liší, protože teoretická hodnota vyšla 0,00537 H. Tento rozdíl je způsoben rozdílem reálné relativní permeability a relat. permeability uvažované v modelu. Maximální síla, kterou je aktuátor pomocí svého stacionárního mag. pole vyvinout, je 2,51 N při zapojení obou cívek v aktuátoru. Výsledný vyrobený aktuátor je vidět na *Obr. 5.1*.



Obr. 5.1: Aktuátor společně s nástavcem a stínítkem s kódem

Spínání proudu tekoucího cívkami je realizováno pomocí elektronických spínačů (viz *Obr. 5.2*), každá cívka má svůj vlastní spínač. Dva spínače pro jeden aktuátor mají společnou jednostrannou desku plošného spoje, celkem jsou tedy na podkladové desce přichyceny dvě DPS. Součástky jsou realizovány jako THT. Každý MOSFET na DPS má svůj vlastní chladič, dva chladiče se nachází blízko sebe, mezi nimi je umístěn termistor sloužící ke snímání teploty na chladičích. Na DPS se kromě spínačů nachází také referenční odpory sloužící k měření napětí na termistorech, které se pak převádí pomocí vztahu na teplotu.

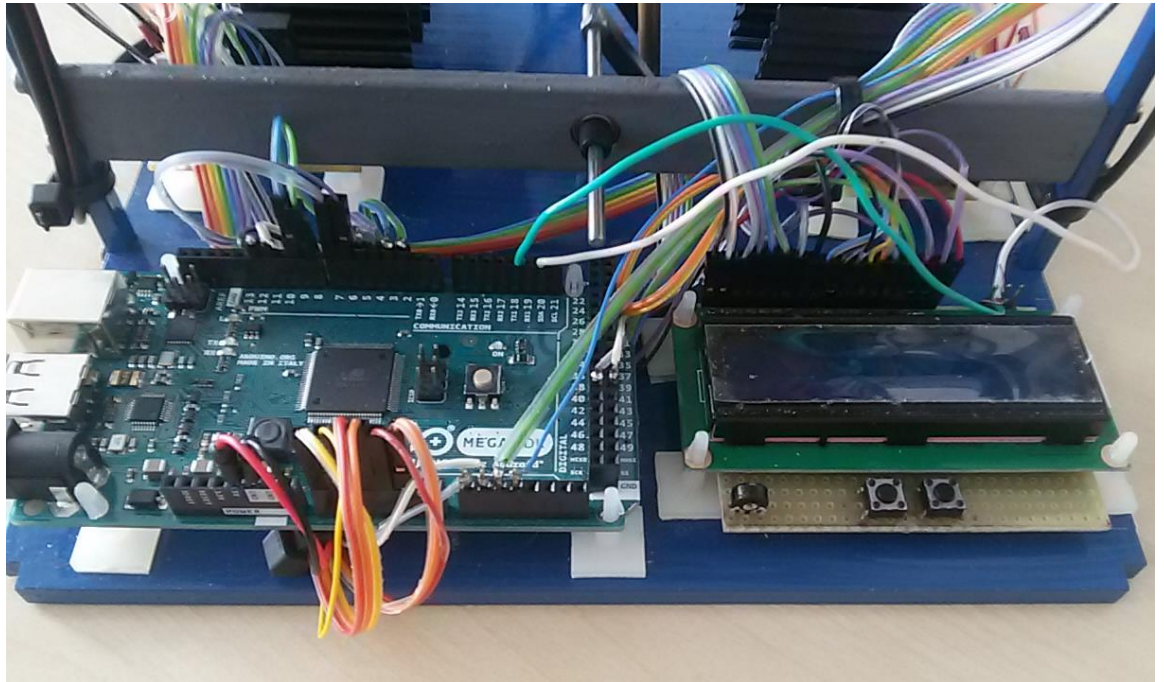


Obr. 5.2: DPS se dvěma elektronickými spínači a přívodními kabely

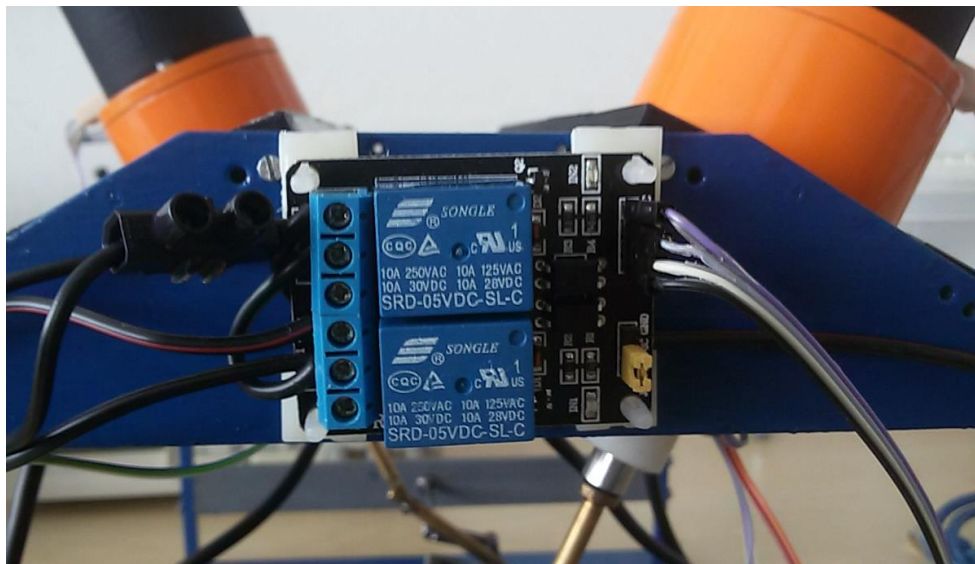
Na každém aktuátoru je nasazený nástavec (viz *Obr. 5.1*), ve kterém se ukrývají dvě optické závory – tedy optické snímače, sloužící jako zpětná vazba motoru. Vlivem průchodu speciálně navrženého stínítka, které je pevně spojeno s jádrem, se na snímačích mění napětí, které je měřeno pomocí referenčních odporů. Různé pozice stínítka jsou reprezentovány různým čtyřbitovým číslem.

Řízení motoru je realizováno pomocí mikrokontroléru na řídicí desce Arduino, která je vidět na *Obr. 5.3* vlevo a která se nachází také na podkladové desce, a je provedeno pouze na základě čtyř-bitového čísla, které reprezentuje aktuální stav. Algoritmus je tedy velmi robustní a umožňuje plynulé řízení motoru při měnící se zátěži hřídele. Na podkladové desce pod displejem se také nacházejí dvě ovládací tlačítka. Pomocí kódu je také realizován převod napětí na termistorech na teplotu a proudová ochrana. Při překročení teploty na chladičích je

pomocí relé modulu (viz Obr. 5.4), který je přidělán na čele motoru na oblouku, odpojeno napájecí napětí. Důležité informace jsou zobrazovány na LCD displeji (viz Obr. 5.3 vpravo).



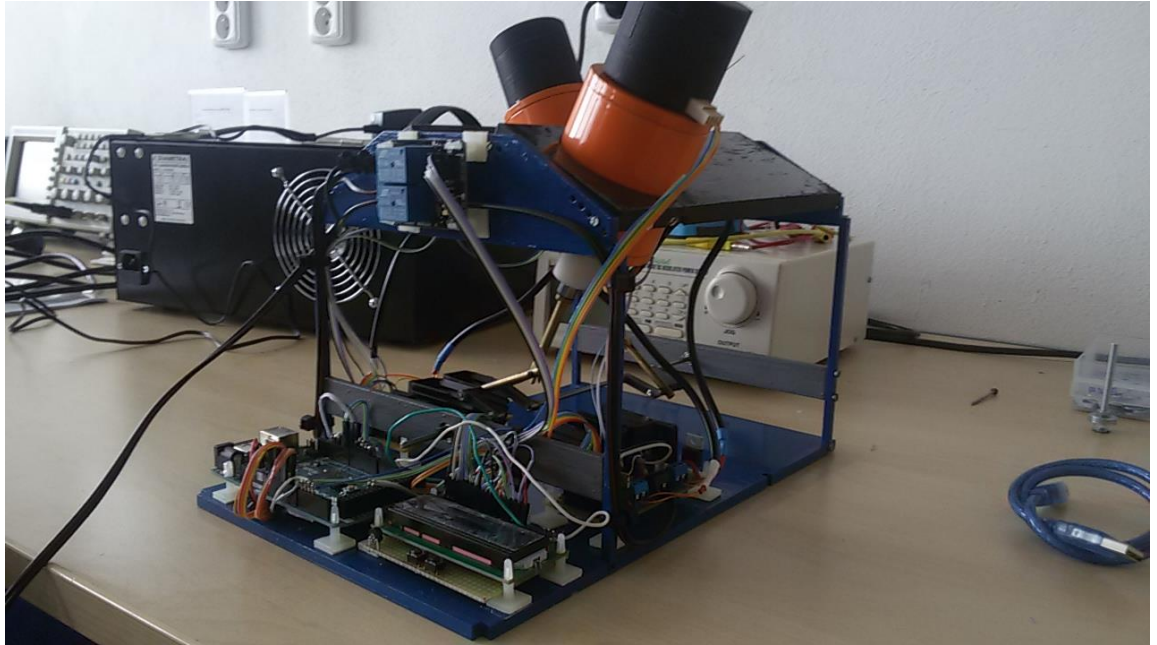
Obr. 5.3: Řídící deska Arduino, LCD displej, dvě tlačítka



Obr. 5.4: Ochranný relé modul na čele motoru

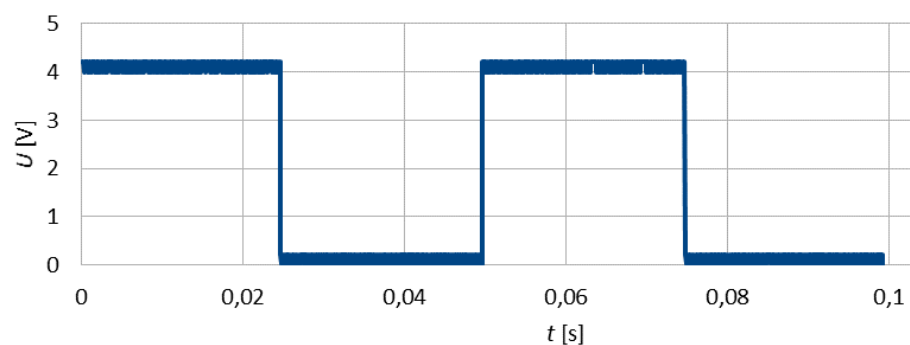
Prototyp je tedy dokončen a funguje správně, motor se točí. Jmenovité otáčky jsou 340 ot/min při jmenovitém napětí. Maximální otáčky při zapojení všech 4 cívek jsou 550 ot/min. Směr otáčení lze měnit pomocí tlačítek. Rychlost otáčení se dá měnit zvyšováním napájecího napětí. Motor se rozeběhne z každé pozice a to i při zatížení. Do budoucna se

počítá s nainstalováním elektromagnetické brzdy na hřídel, pomocí které bude možno zjistit účinnost motoru, která ovšem v porovnání s běžnými točivými elektromotory bude značně malá. Výsledný prototyp je vidět na *Obr. 5.5*.

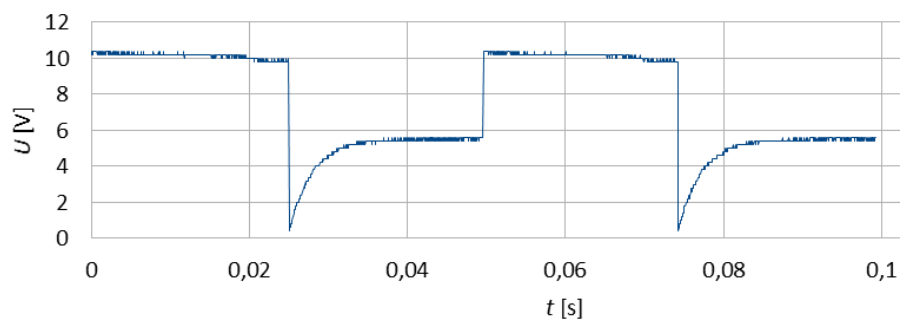


Obr. 5.5: Výsledný sestavený prototyp

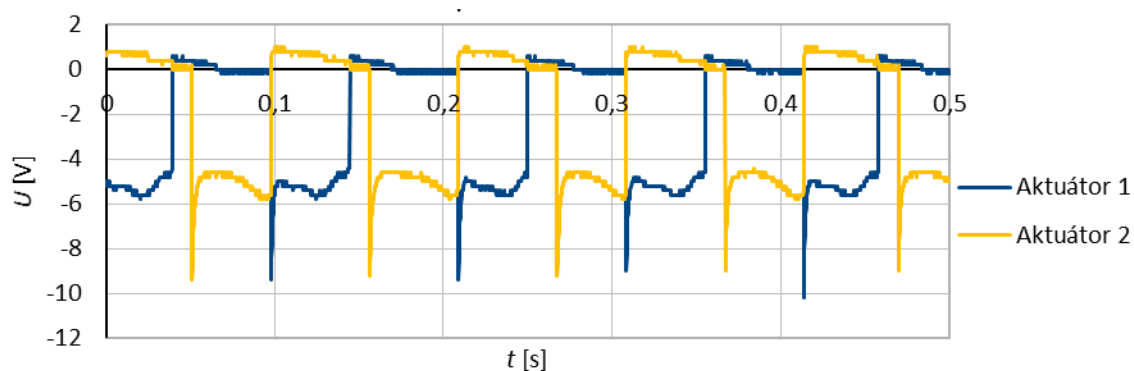
Pro ověření teoretických předpokladů průběhů napětí bylo pomocí osciloskopu provedeno měření průběhů napětí na výstupu z Arduina pro spínání s periodou 50 ms (viz *Obr. 5.6*), dále na MOSFET tranzistorech na spínači při zapojení pouze jedné cívky v každém aktuátoru (viz *Obr. 5.7*) a poté bylo provedeno měření průběhů napětí na všech cívkách při zapojení všech cívek a směru otáčení vlevo. Tyto průběhy napětí pro vnitřní cívky obou aktuátorů jsou zobrazeny na *Obr. 5.8* a průběhy napětí na vnějších cívkách obou aktuátorů se nachází na *Obr. 5.9*. Měřilo se při napájecím napětí $U = 10$ V.



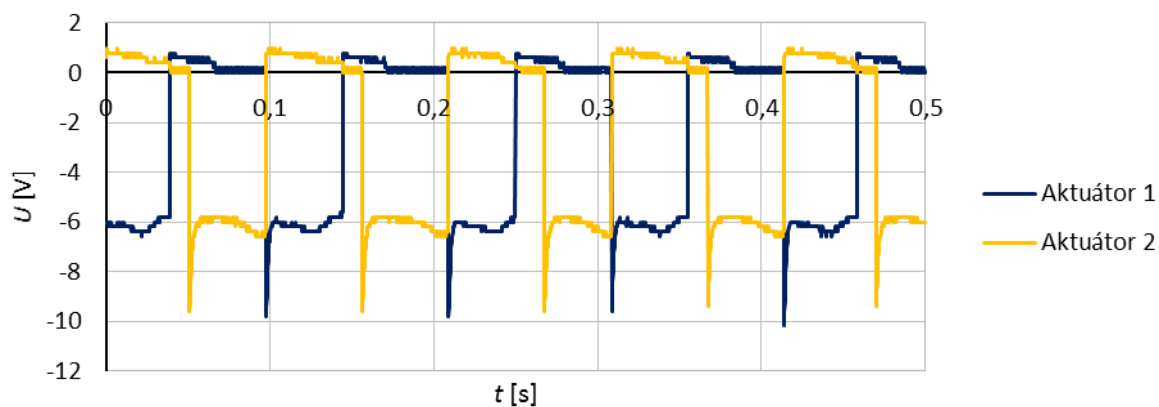
Obr. 5.6: Průběh řídicího signálu z Arduina



Obr. 5.7: Průběh napětí na spínači (MOSFET tranzistor)



Obr. 5.8: Průběhy napětí na vnitřních cívkách aktuátorů



Obr. 5.9: Průběhy napětí na vnějších cívkách aktuátorů

Všechny změřené průběhy odpovídají teoretickým předpokladům získaným ze simulace, navrhnutí a sestavení spínačů a cívek bylo tedy provedeno dobře v souladu s požadavky.

Závěr

V této bakalářské práci jsem na provedl rešerši konstrukčního provedení vidlicového motoru s lineárními elektromagnetickými aktuátory, existujících obdobných patentů a zařízení a také rozdělení a využití aktuátorů. Dále jsem na základě požadavků vytvořil 3D model konstrukce prototypu ve dvouválcové variantě a výkresy jednotlivých nosných dílů, navrhl jsem i jednoduchou klikovou hřídel a její efektivní spojení s jádrem aktuátoru. Dále jsem vytvořil pohybovou studii význačných bodů. Poté přišel na řadu návrh samotných lineárních elektromagnetických aktuátorů, kde byla podle hmotnosti jádra určena nutná síla na jeho uvedení do pohybu a pak jsem podle toho zvolil potřebný jmenovitý proud a počet závitů a navrhl magnetický obvod. Pro zajímavější možnosti řízení jsem zvolil místo jedné cívky dvě stejné, na sobě koaxiálně navinuté cívky. S využitím těchto hodnot jsem dopočetl potřebnou proudovou hustotu a pomocí numerického řešení zjistil rozložení magnetického pole uvnitř aktuátoru a vytvořil statickou charakteristiku. Posléze jsem určil dynamické vlastnosti aktuátoru a to numerickým vyřešením soustavy dvou obyčejných diferenciálních rovnic.

Dále jsem se stručněji, protože této části se věnuje podrobně kolega Tomáš Bauer, věnoval řízení motoru, nastínil jsem jeho blokové schéma. Popsal jsem simulaci a návrh elektronického spínače, jeho součástky a výsledný návrh DPS. Zmínil jsem se o zpětnovazebních prvcích a jejich roli při řízení. Jednoduše jsem popsal princip algoritmu řízení a tepelnou ochranu a také jsem ukázal zobrazování na displeji.

Ke konci jsem se věnoval praktickému sestavení finálního prototypu, jeho funkcím, ověřením funkčnosti, vypsání jeho parametry a jmenovité hodnoty. Nastínil jsem možný budoucí vývoj a využití a ukázal výsledky měření na osciloskopu.

Přestože prototyp lze zařadit do kategorie *do-nothing machine*, nalezne své uplatnění při výuce algoritmů řízení, programování platformy Arduino a vývoje nových zařízení metodikou *model-based design*. Cílem nebylo vytvořit alternativní pohon elektromobilů, ale cílem byl vývoj sám o sobě, naučil jsem se spoustu nových postupů a poznatků, pracovat s novými programy, mohl jsem spolupracovat s Katedrou teoretické elektrotechniky a nakonec se povedlo vyrobit funkční jedinečný prototyp.

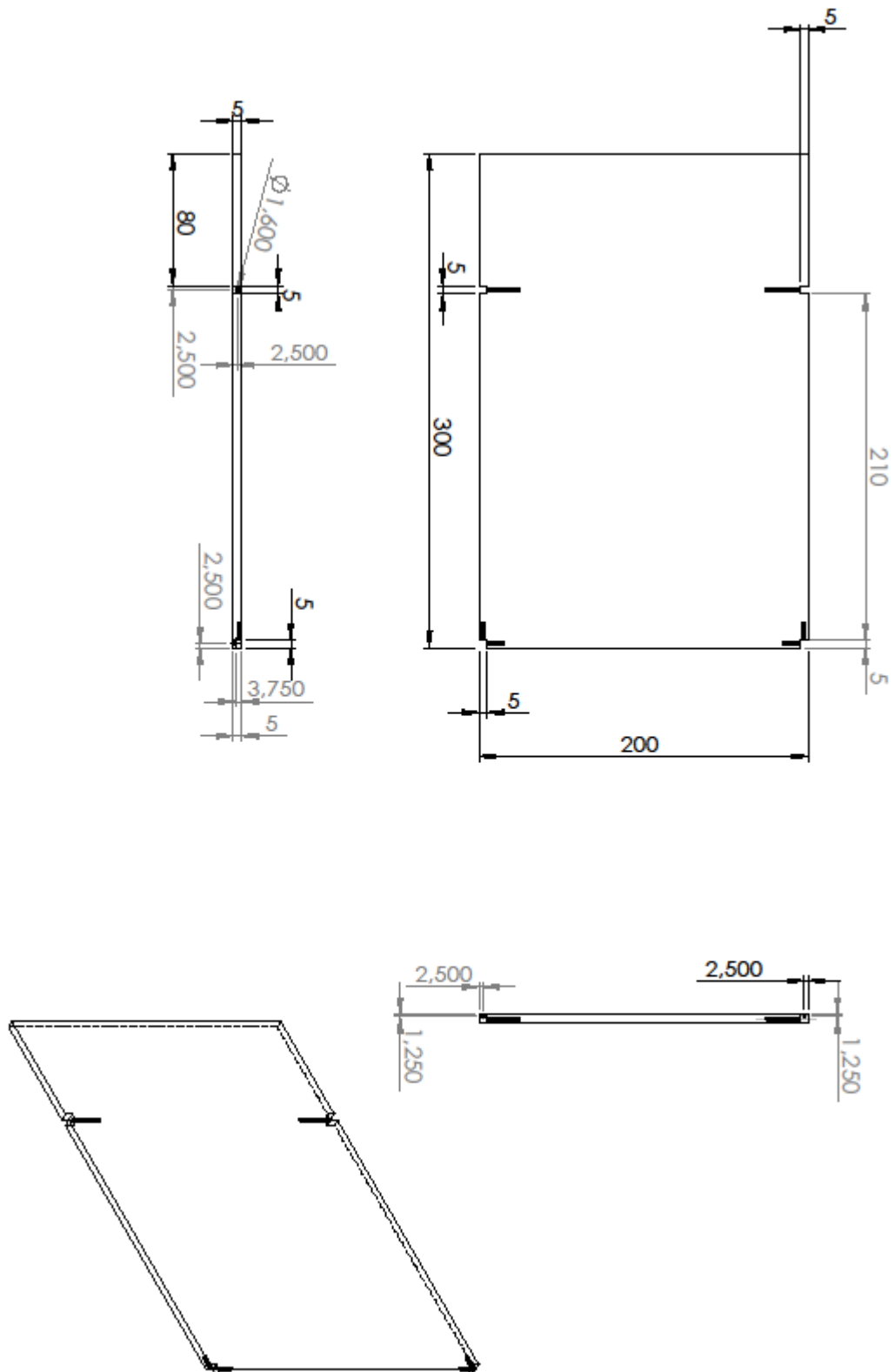
Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MAYER, Daniel a ULRYCH, Bohuš. *Elektromagnetické aktuátory*. BEN – technická literatura, Praha, 2008, 1. vyd., ISBN 978-80-7300-216-9.
- [2] MAYER, Daniel. *Teorie elektromagnetického pole 1. díl*. Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň, 2004, ISBN 80-7082-826-9.
- [3] MACH, František. *Návrh a experimentální ověření elektromagnetického aktuátoru*. Bakalářská práce, Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň, 2009.
- [4] MACH, František. *Pokročilé metody a algoritmy pro analýzu sdružených úloh v elektromagnetismu*. Disertační práce, Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň, 2014.
- [5] BAUER, Tomáš. *Automatické řízení vidlicového motoru s lineárními elektromagnetickými aktuátory*. Bakalářská práce, Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň, 2016.
- [6] JANOCHA, H. *Actuators: Basics and Applications*. Springer, 2010.
- [7] GOMIS-BELLMUNT, O. a Campanile, L. F. *Design Rules for Actuators in Active Mechanical Systems*. Springer, 2010.
- [8] The Old Models Company. *History: The invention and development of electric engines* [online]. Chichester [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: <http://www.oldmodels.co.uk/history/>
- [9] The Self Site. *The Museum of Retro Technology: The Electromagnetic Engine* [online]. 2010 [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: <http://www.oldmodels.co.uk/history/>
- [10] Sekou Industries. *Electromagnetic Reciprocating Engine* [online]. Trenton, 2008 [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: <http://sekouindustries.com>
- [11] Sekou Industries. *Products* [online]. Trenton, 2008 [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: <http://sekouindustries.com>
- [12] JACHIM, Frank M. *Electric vehicle solenoid motor*. U.S. Patent No 5,469,004, 1995.
- [13] SASSO, Bill J. *Servo rotary motor*. Patent No 4,510,420, 1985.
- [14] ANGELO, Pecci. *Electromagnetic motor with plural reciprocating members*. U.S. Patent No 3,676,719, 1972.
- [15] CHEN, Chuan Sheng. *Power engine*. EP1753115 A1. Uděleno 14.2.2007. Zapsáno 31.10.2005. Dostupné také z: <http://www.google.com/patents/EP1753115A1>
- [16] HOOGERHYDE, Calvin A. *Reciprocating dual-action piston magnetic force motor and method*. U.S. Patent No 8,058,755, 2011.
- [17] TEAL, Benjiman R. *Magnetically operable engine*. U.S. Patent No 4,093,880, 1978.
- [18] MCFARLAND, Douglas F. *Solenoid motor*. U.S. Patent No 4,473,763, 1984.
- [19] ANGUS, Neil H. *Electromagnetic engine*. U.S. Patent No 4,345,174, 1982.
- [20] GIFFORD, Leland W. *Reciprocating electromagnetic engine*. U.S. Patent No 5,457,349, 1995.
- [21] BUTLER, Kala. *Electromagnetic reciprocating engine*. U.S. Patent No 7,557,473, 2009.
- [22] ELMALEH, Shimon. *Electro-magnetic internal combustion engine*. U.S. Patent No 7,793,634, 2010.
- [23] HYDE, Roderick A., et al. *Opposed piston electromagnetic engine*. U.S. Patent No 7,950,356, 2011.
- [24] VOZÁK, Antonín. *Odborný výcvik ve 3. tisíciletí: Klikové ústrojí* [online]. Střední odborná škola Josefa Sousedíka, Vsetín, 2010 [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: <http://int.spsoa-ub.cz/projekty/ov3000/AUTO/AUTOMECHANIK/AUTOMECHANIK%20VS/AMII I-2.7%20Klikove%20ustroji.doc>

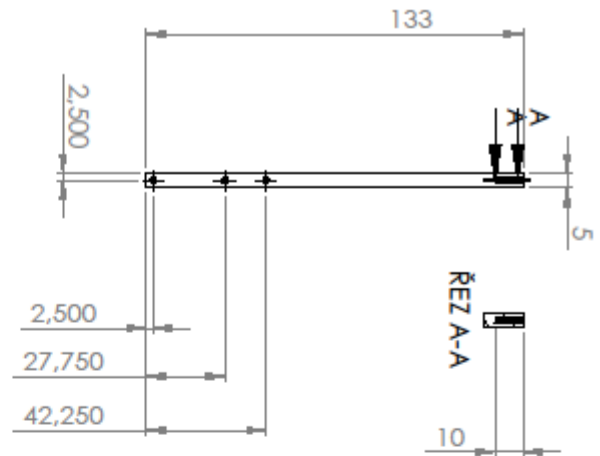
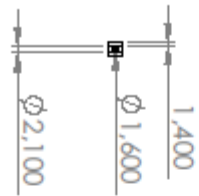
Přílohy

Příloha A – Výkres podkladové desky

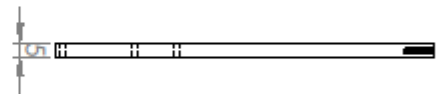
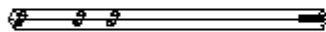
Č. POLOŽKY	Č. DÍLU	POPIS	Množství
3	Podkladová deska	Měřítko 1:2, železo, zdvíhací M2	1



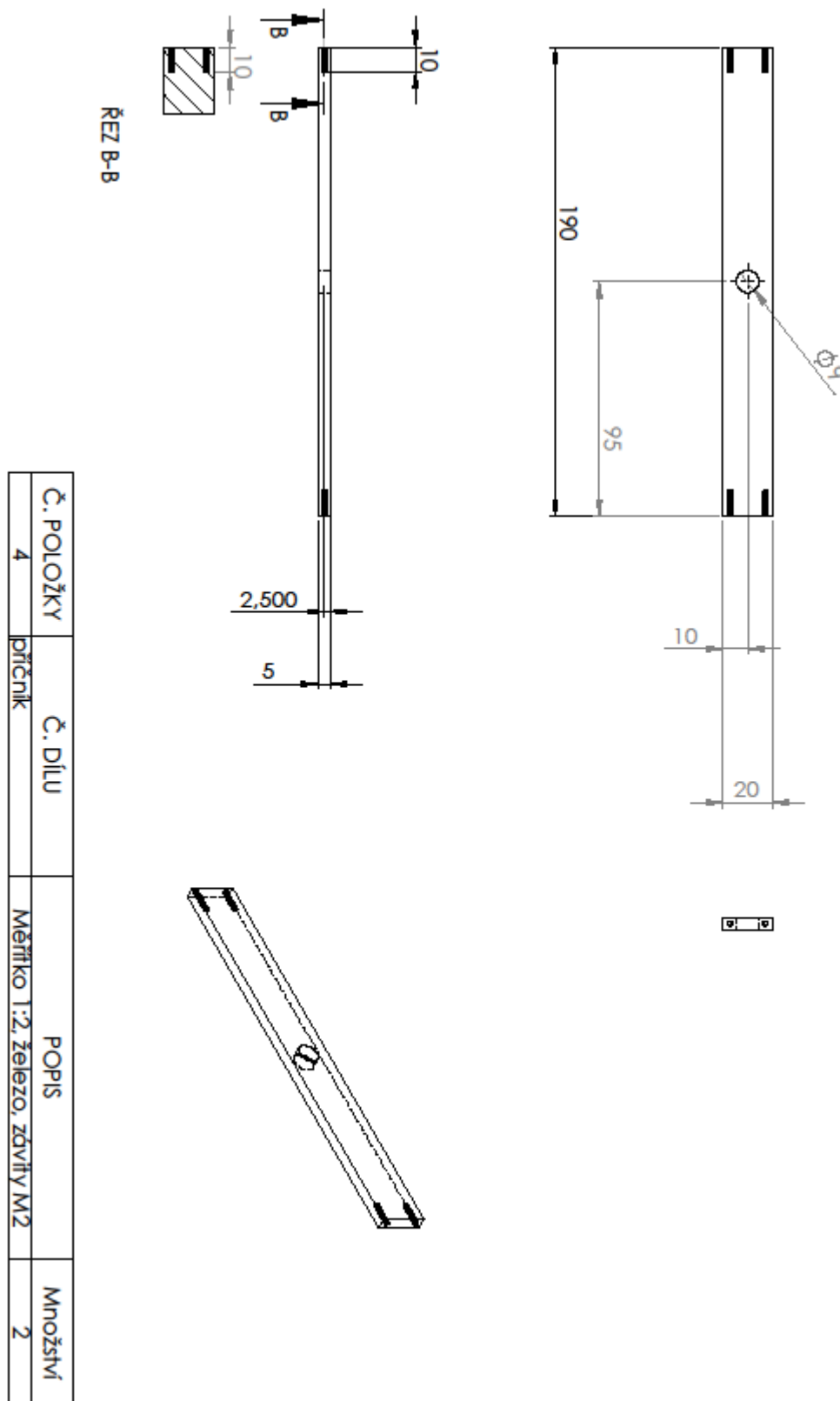
Příloha B – Výkres sloupku



Č. POLOŽKY	Č. DÍLU	POPIS	Množství
5	sloupek	Měřítka 1:2, železo, zdvít M2	4

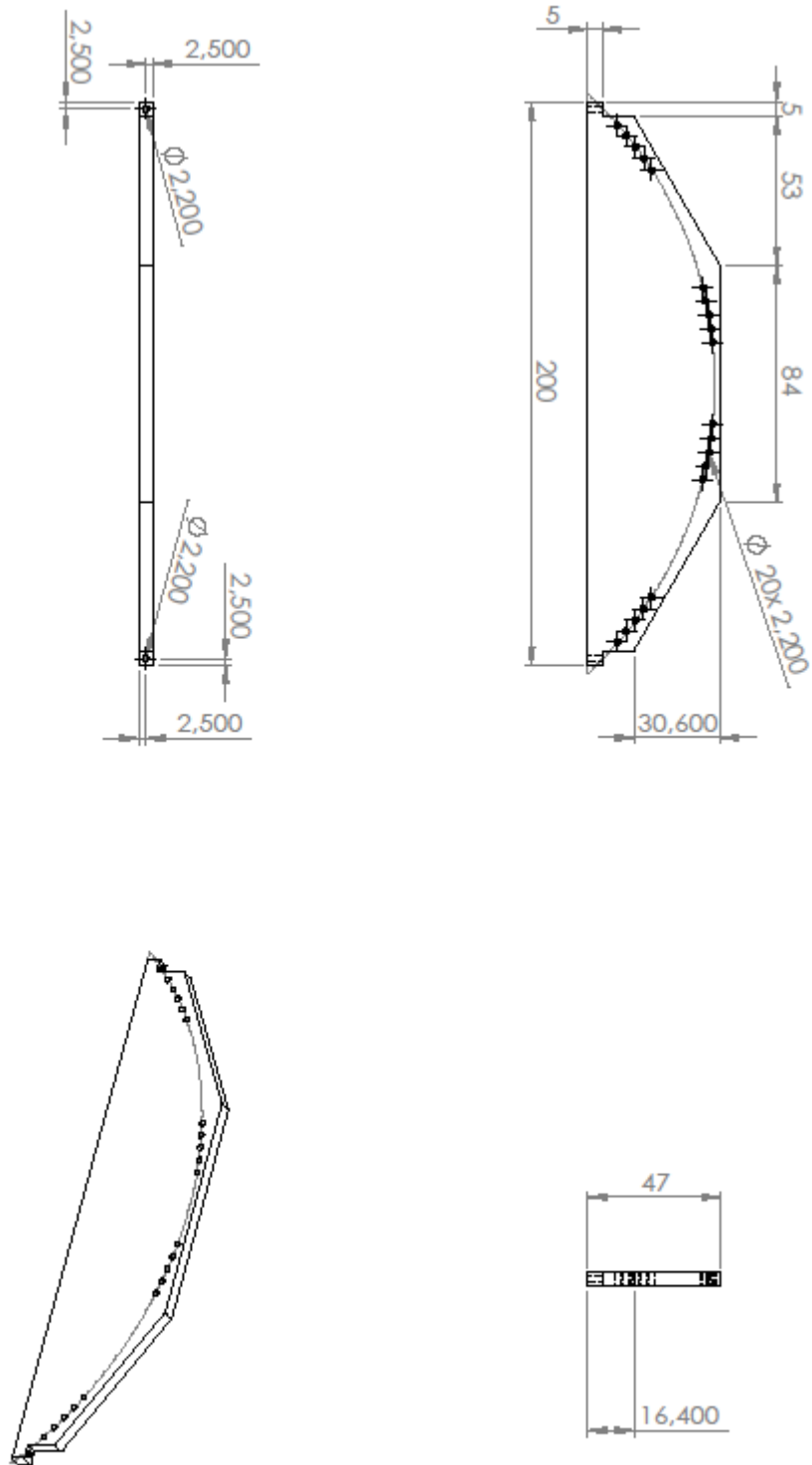


Příloha C – Výkres příčnicku



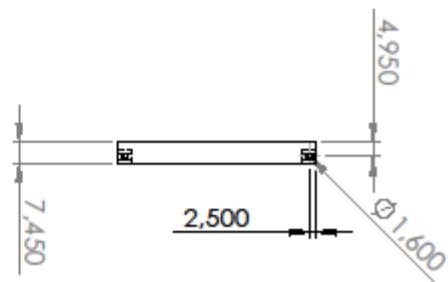
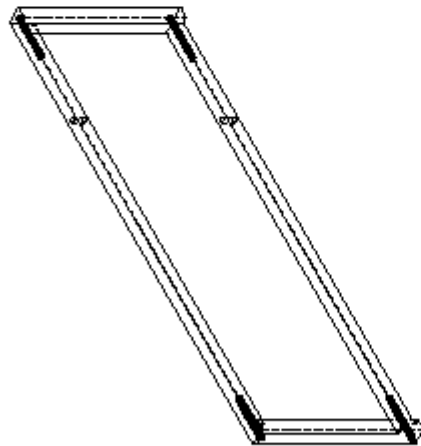
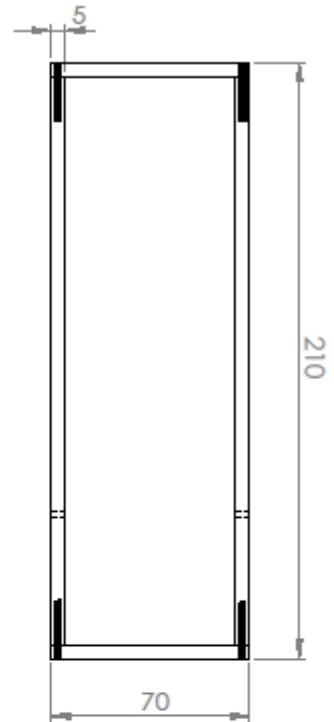
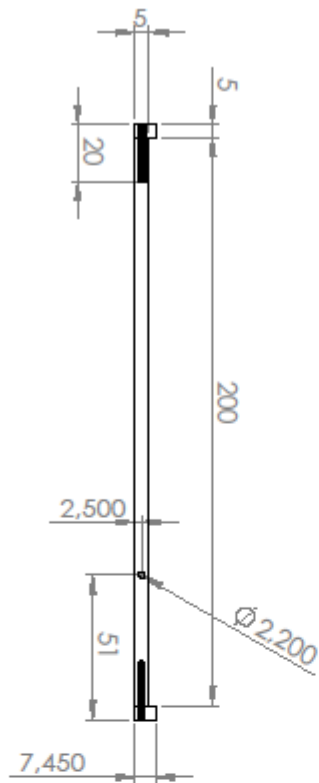
Příloha D – Výkres oblouku

Č. POLOŽKY	Č. DÍLU	POPIS	Množství
2	horníoprava	Měřítko 1:2, materiál železo	2

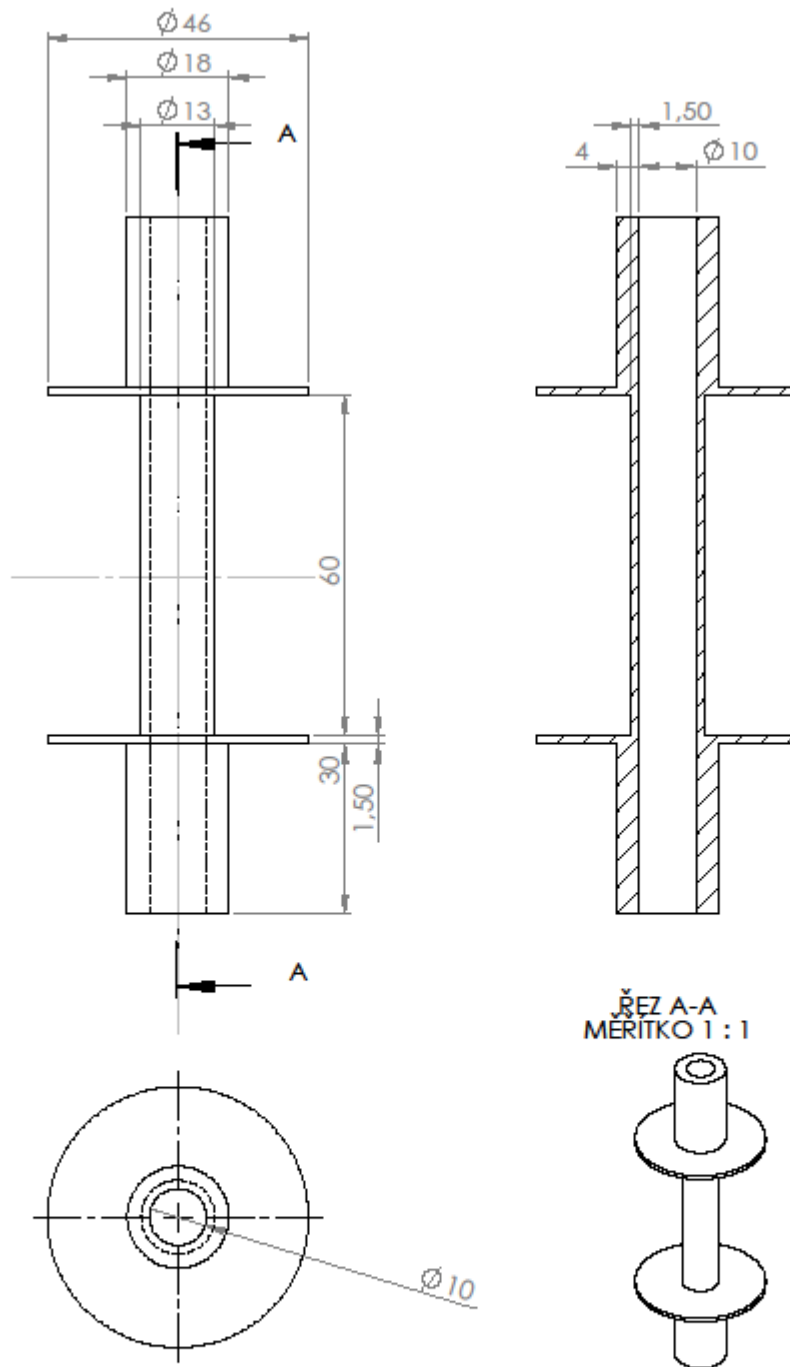


Příloha E – Výkres horního nosníku

Č. POLOŽKY	Č. DÍLU	POPIS	Množství
1	horní	Měřítka 1:2, materiál železo, zdivily M2	2

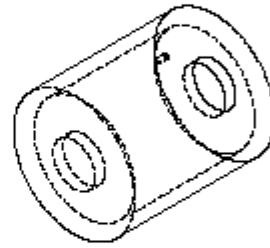
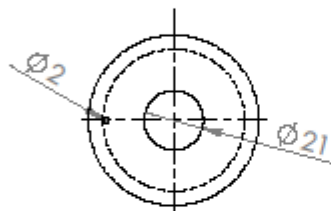
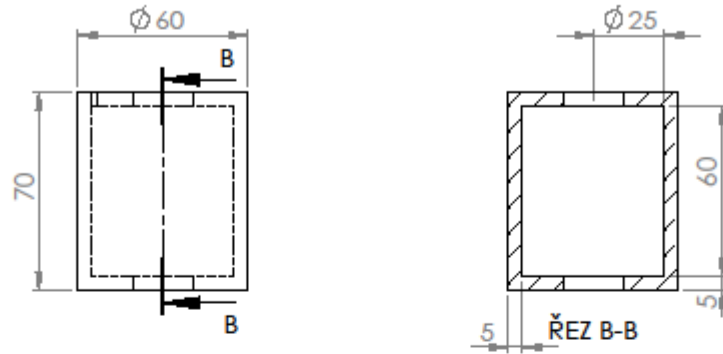


Příloha F – Výkres kostry cívky



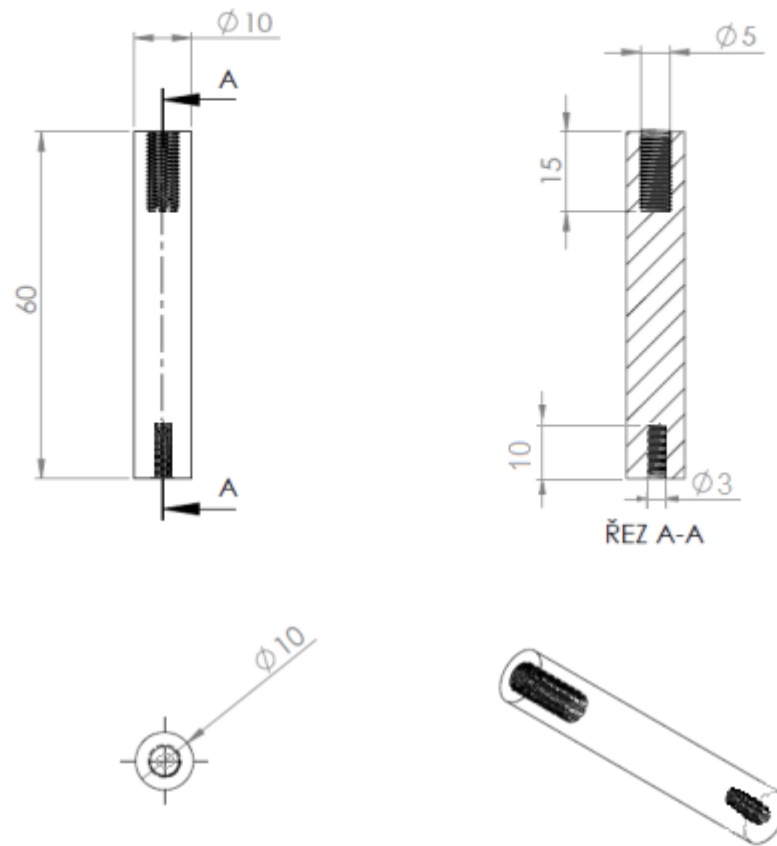
Číslo	Název	Materiál	Kusů
5	Kostra	Silon	2

Příloha G – Výkres magnetického obvodu



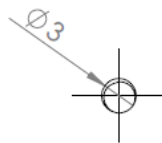
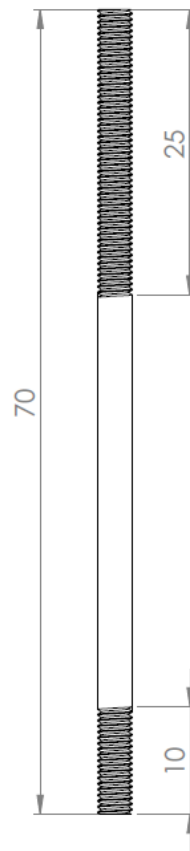
Číslo	Název	Materiál	Kusů
1	Magnetický obvod	Železo	2

Příloha H – Výkres jádra aktuátoru



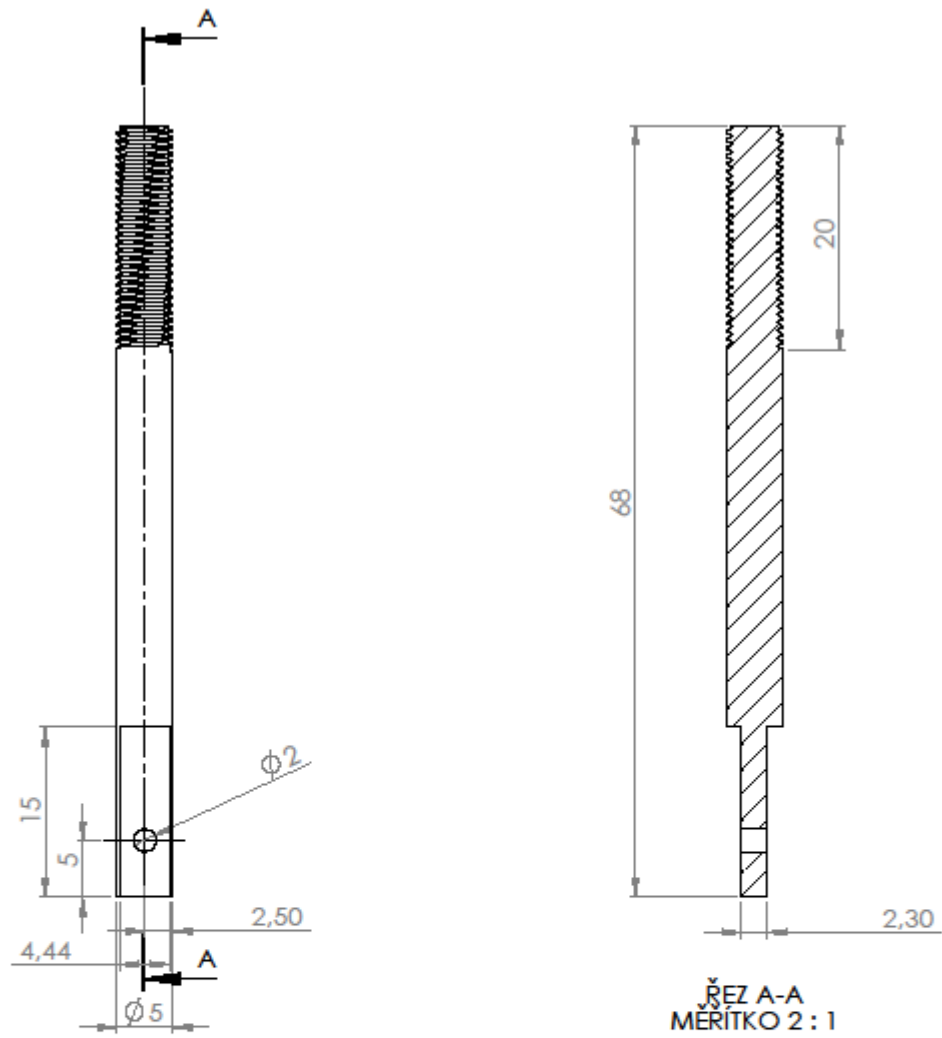
Číslo	Název	Materiál	Kusů
2	Jádro	Železo	2

Příloha CH – Výkres tyčky



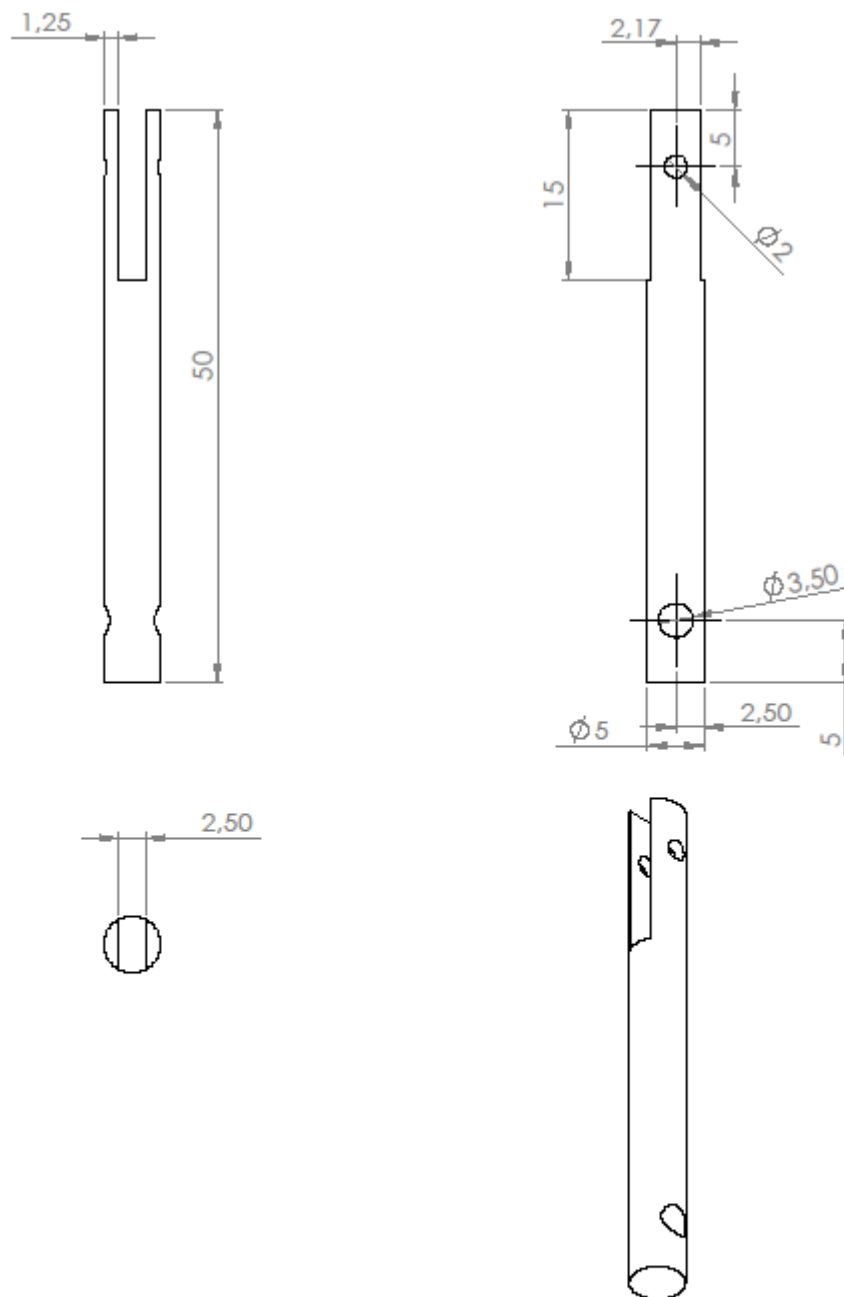
Závit	Název	Materiál	Kusů
M3	tyčka + matka	Mosaz	2

Příloha I – Výkres spojky jádra



Číslo	Název	Materiál	Kusů
4	Spojka jádra	Mosaz	2

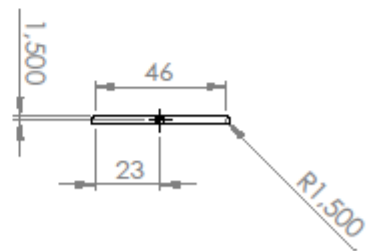
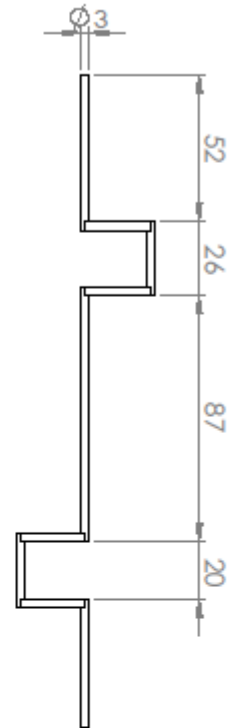
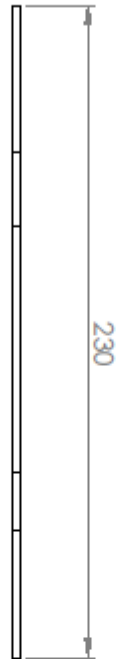
Příloha J – Výkres ojnice



Číslo	Název	Materiál	Kusů
3	Spojka	Mosaz	2

Příloha K – Výkres klikové hřídele

Č. POLOŽKY	Č. DÍLU	POPIS	Množství
7	hřídel	Měřitko 1:2, železo	1



Příloha L – Fotografie z vývoje

