

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra elektrotechniky a automatizace



Bakalářská práce

Realizace solenoidového elektromotoru

Štěpán Soudek

© 2023 ČZU v Praze

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Štěpán Soudek

Obchod a podnikání s technikou

Název práce

Realizace solenoidového motoru

Název anglicky

Solenoid motor design

Cíle práce

Cílem práce je vytvoření solenoidového motoru. Zařízení bude řízeno stavovými spínači. Principem bude využití soustavy cívek a jader napojených na klikovou hřídel pro realizaci pohybu mechanismu. Řízení bude umožňovat nastavovat otáčky pohonu a jejich měření. U navrženého řešení proveďte ekonomickou a technickou analýzu ve srovnání s alternativními řešeními.

Metodika

Prostudování hardwarových a softwarových možností řešení. Navržení několika variant provedení úlohy. Výběr nejvhodnější varianty s kritickým hodnocením návrhu. Specifikace funkcí modelu podle cílů práce. U navrženého řešení proveďte ekonomickou a technickou analýzu ve srovnání s alternativními řešeními.

Doporučený rozsah práce

50stran, bez příloh

Klíčová slova

Pohon, solenoidový motor, automatizace

Doporučené zdroje informací

BELL, C A. *Beginning sensor networks with Arduino and Raspberry Pi*. [New York, New York]: Apress, 2013. ISBN 1430258241.

MORRISS, S B. *Automated manufacturing systems : actuators, controls, sensors, and robotics*. New York: Glencoe, 1995. ISBN 0028023315.

Předběžný termín obhajoby

2022/2023 LS – TF

Vedoucí práce

doc. Ing. Miloslav Linda, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra elektrotechniky a automatizace

Elektronicky schváleno dne 25. 1. 2022

doc. Ing. Miloslav Linda, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 23. 2. 2022

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 30. 03. 2023

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci " Realizace solenoidového elektromotoru" jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor(ka) uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne datum odevzdání

Poděkování

Rád(a) bych touto cestou poděkoval panu doc. Ing. Miloslavu Lindovi Ph.D. za odborné vedení v průběhu psaní práce a zaměstnancům DŮM um DDM Prahy 10 za konzultace a prostředí k vypracování praktické části práce.

Realizace solenoidového elektromotoru

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem, konstrukcí a měřením otáček solenoidového elektromotoru o čtyřech elektromagnetech. Součástí práce je i možné využití motoru v praxi a jeho porovnání s ostatními variantami včetně ekonomického zhodnocení.

V teoretické části se práce zabývá detailním popisem možné výroby a použitých součástí. Vlastní práce obsahuje návrh provedený formou modelací v Auto CAD Inventoru, kde každá navrhovaná součást pro vlastní výrobu disponuje výkresem. Součástí návrhu jsou i teoretické maximální otáčky motoru. Konstrukce je provedena kombinací 3D tisknutých a kupovaných součástí tak, aby bylo možné měření otáček elektromotoru pomocí indukčního přibližovacího čidla s připojeným osciloskopem. V kapitole výsledků a diskuze se práce věnuje naměřeným otáčkám a jejich porovnání s teoretickými. Dále je zmíněna implementace motoru do praxe a porovnání s ostatními variantami včetně ekonomického zhodnocení.

Klíčová slova: Pohon, solenoidový motor, elektromagnet, kliková hřídel, 3D tisk

Realization of a Solenoid Engine

Abstract

This bachelor's thesis deals with the design, construction, and revolutions measurement of a flat solenoid engine with four electromagnets. Part of the thesis is also a possible implementation and its comparison with other engine types, including economic evaluation.

In the theoretical background chapter is detailed description of components and their manufacturing. The research and design chapter is focused on design planning of components made in Auto CAD Inventor and their blueprints. There is also a calculation of maximum RPM. Construction is made of combination of 3D printed a purchased steel components in a way that it is possible to measure the RPM with an inductive proximity sensor attached to an oscilloscope. In the evaluation chapter there is a comparison between the calculated and measured RPM and suggestions of a possible implementations with a comparison with other engine types, including economic evaluation.

Keywords: Drive, solenoid engine, electromagnet, crankshaft, 3D printing

Obsah

1 Úvod.....	1
2 Cíl práce a metodika	2
3 Seznámení se s problematikou – teoretická část	3
3.1 Mechanická část	3
3.1.1 Řešení motoru	3
3.1.2 Kliková hřídel	4
3.1.3 Ojnice.....	6
3.1.4 Vačka	7
3.2 3D Tisk.....	7
3.2.1 Postup při tisku	7
3.2.2 Dostupné materiály	7
3.3 Elektrotechnická část	8
3.3.1 Elektromagnet.....	8
3.3.2 Solenoid	9
3.3.3 Koncový spínač.....	9
3.3.4 Usměrnovací dioda	9
3.4 Postup výpočtu otáček.....	10
3.4.1 Síla magnetického pole.....	10
3.4.2 Veličiny na klikové hřídeli	11
4 Vlastní práce.....	14
4.1 Konstrukce mechanických součástí	14
4.1.1 Nákup součástí	14
4.1.2 Kliková hřídel	16
4.1.3 Ojnice.....	22
4.1.4 Klec motoru	23
4.2 Řešení elektrického obvodu	26
4.3 Teoretické maximální otáčky	27
5 Výsledky a diskuse	29
5.1 Vlastní měření otáček.....	29
5.1.1 Vyhodnocení měření	32
5.2 Alternativní řešení a ekonomické zhodnocení	33
5.2.1 Ekonomické zhodnocení vyrobené varianty	33
5.2.2 Použité materiály a způsob výroby	33
5.2.3 Řešení obvodu.....	34

5.3 Praktické využití motoru	34
6 Závěr.....	35
7 Seznam použitých zdrojů	36
8 Přílohy:.....	39

Seznam obrázků

Obrázek 1- Rozdíl mezi boxerem a plochým motorem (2)	4
Obrázek 2 - Popis klikové hřídele (5)	5
Obrázek 3 - Průběh usměrnění (16)	10
Obrázek 4 - Veličiny na klikovém mechanismu.....	11
Obrázek 5 - Rychlost jádra	12
Obrázek 6- Zrychlení pístu	13
Obrázek 7 - Rozměry kolíku (19).....	14
Obrázek 8 - Návrh klikové hřídele	16
Obrázek 9 - Návrh ramena klikové hřídele.....	17
Obrázek 10 - Rozložení jednotlivých částí ramena	17
Obrázek 11 - Rozměry ramena klikové hřídele	20
Obrázek 12 -obr Konstrukce vaček	22
Obrázek 13 - Plastová vidlice nalisovaná na plunžr	23
Obrázek 14 - Modelace klece motoru.....	23
Obrázek 15 - Výška uložení.....	24
Obrázek 16 - Horní polovina uložení	24
Obrázek 17 - Rozložení závitů v elektromotoru	25
Obrázek 18 - Vzdálenost elektromagnetů od klikové hřídele.....	25
Obrázek 19 - Řešení obvodu.....	26
Obrázek 20 - Měření času otáček t [ms].....	29
Obrázek 21 - Graf pro $U = 7V$	30
Obrázek 22 - Graf pro $U = 8V$	30

Obrázek 23 - Graf pro $U = 9V$	30
Obrázek 24 - Graf pro $U = 10V$	31
Obrázek 25 - Graf pro $U = 11V$	31
Obrázek 26 - Graf pro $U = 12V$	32

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Výběr kolíků pro konstrukci (20)	15
Tabulka 2 - Kinetická energie setrvačníku	21
Tabulka 3 - Závislost otáček za minutu na čase při napětí 7V	30
Tabulka 4 - Závislost otáček za minutu na čase při napětí 8V	30
Tabulka 5 - Závislost otáček za minutu na čase při napětí 9V	31
Tabulka 6 - Závislost otáček za minutu na čase při napětí 10V	31
Tabulka 7 - Závislost otáček za minutu na čase při napětí 11V	31
Tabulka 8 - Závislost otáček za minutu na čase při napětí 12V	32
Tabulka 9 - Materiály a nástroje ke kovovýrobě	33

1 Úvod

Solenoidový motor je typ elektromotoru, který využívá ke svému chodu solenoidové elektromagnety připojené na klikovou hřídel. Po zapojení elektromagnetů je vyvinuta síla na plunžrové jádro, které vykonává nerovnoměrný přímočarý vratný pohyb. Toto jádro je přes ojnici připojeno na klikovou hřídel, která mění tento posuvný pohyb na rotační.

Navrhnutý typ motoru bude plochý čtyřválec připojen čtyřmi ojnicemi ke klikové hřídeli, kterou bude roztáčet. Součástí klikové hřídele bude setrvačnick a soustava čtyř vaček s koncovými spínači, které budou časovat zapínání a vypínání elektromagnetů.

Otáčky jsou z důvodu menšího počtu elektromagnetů a plastové konstrukci očekávány do $2000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$.

2 Cíl práce a metodika

Cílem práce je vytvoření plochého solenoidového motoru o čtyřech elektromagnetech. Zařízení bude řízeno soustavou koncových spínačů a vaček. Principem bude využití soustavy cívek a jader napojených na klikovou hřídel pro realizaci pohybu mechanismu. Řízení bude umožňovat nastavovat otáčky pohonu a jejich měření. U navrženého řešení bude provedena ekonomická a technická analýza ve srovnání s alternativními řešeními a jeho možná implementace v praxi.

Metodikou bylo prostudování hardwarových a softwarových možností řešení, navržení a sestrojení vybrané varianty. Modelace varianty byla provedena v Auto CAD Inventoru, na kterou navazovala výroba 3D tiskem a nákup součástí. Konstrukce varianty obsahovala vlastní konstrukci, zapojení obvodu a předběžný výpočet otáček za minutu, který pak byl doplněn o měření a porovnání hodnot. Nakonec byla vybraná varianta porovnána s ostatními variantami, bylo provedeno ekonomické zhodnocení a návrh využití této varianty v praxi.

3 Seznámení se s problematikou – teoretická část

Tato kapitola se věnuje popisu a funkci jednotlivých součástí motoru. Nalézají se zde charakteristika výrobních metod s dalším rozpracováním.

3.1 Mechanická část

Mechanickou částí je myšlena ta část součástí, které jsou namáhány mechanickými silami vytvořenými chodem motoru. Konkrétními součástmi je kliková hřídel, ojnice a vačky.

3.1.1 Řešení motoru

Řešením motoru se rozumí tvar uspořádání válců. Základní typy jsou boxer, řadový motor, vidlicový motor a hvězdicový motor.

3.1.1.1 Řadový motor

Řadový motor je v automobilovém průmyslu nejpoužívanější typ motoru s válci umístěnými v jedné přímce. Princip fungování je založený na tom, že spolupracují vnější písty proti vnitřním pístům.

Mezi jejich výhody patří jednodušší obsluha a servis. Z toho důvodu se také lépe montují, což je znát i na pořizovacích nákladech. Mezi nevýhody je třeba zmínit problém s přehříváním u spalovacích motorů, menší tuhost a vyšší těžiště. (1)

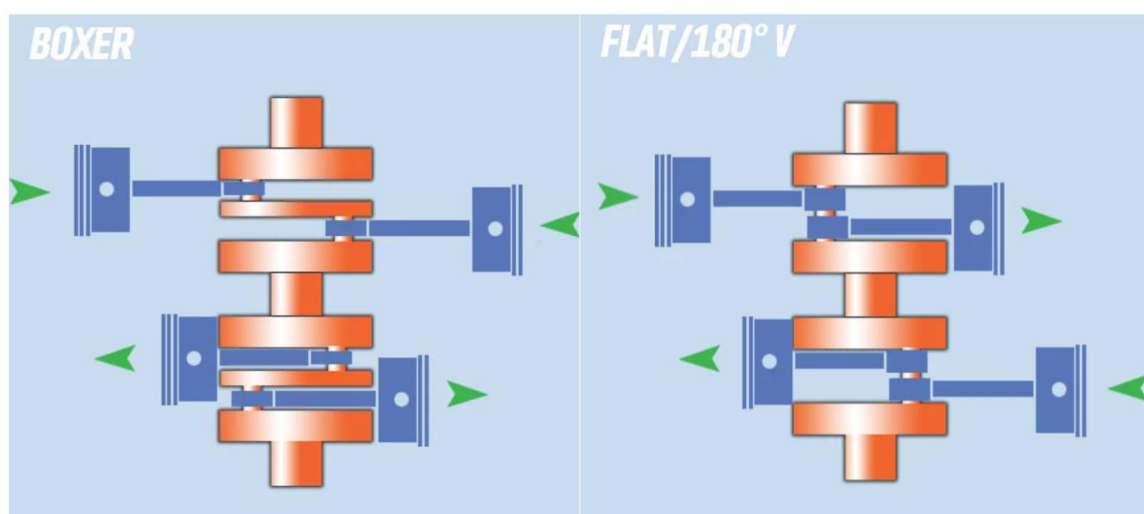
3.1.1.2 Plochý motor

Plochý motor je speciální případ vidlicového motoru, kdy je úhel mezi protilehlými písty 180° . Na každém ojničním čepu má připojeny dvě ojnice, které vždy tahají stejným směrem viz obrázek 1.

Boxerový typ má na každý jeden ojniční čep připojenu pouze jednu ojnici a podle toho je navržena kliková hřídel. Ojnice, které jsou proti sobě, tahají vždy v opačném směru. Výhodou oproti běžnému plochému motoru je, že lze klikovou hřídel navrhnout do kříže, a tím zajistit rovnoměrnější chod.

Největší výhodou plochého řešení je malá výška, což znamená i nízko posazené těžiště. Je proto často součástí sportovních aut značek Porsche a Subaru. Nevýhodou je horší servis. Pokud se jedná o součástku většího zařízení, montuje se úplně naspod právě z důvodu nízko posazeného těžiště. (2)

Obrázek 1- Rozdíl mezi boxerem a plochým motorem (2)



3.1.1.3 Vidlicový motor

Vidlicový typ motoru je řešen připojením dvou sad válců do vidlice, které mezi sebou mají 60 až 90°. Počet válců je vždy sudý a vyrábí se v řešeních V2, V4, V6, V8 a V12.

Výhodami tohoto řešení je menší velikost a potažmo i nižší hmotnost a z důvodu velkého množství pístů efektivnější přenos výkonu pístů na klikovou hřídel, což zajišťuje vyšší celkový výkon.

Nevýhodou je jejich složitost, která způsobuje vyšší náklady na výrobu a servis. Pokud je motor nesprávně navržený, jeho opotřebení vzrůstá mnohem rychleji než u jiných řešení. (3)

3.1.1.4 Hvězdicový motor

Hvězdicový motor funguje jako jakýkoliv jiný čtyřdobý spalovací motor. Od ostatních motorů se liší pořadím zapalování a způsobem připojení ke klikové hřídeli. Válce hvězdicového motoru jsou číslovány shora ve směru hodinových ručiček, přičemž první válec je očíslován číslem 1. Ojnice prvního válce (hlavní ojnice) se připojuje přímo ke klikové hřídeli. Ojnice ostatních válců se připojují k otočným bodům kolem hlavní ojnice. (4)

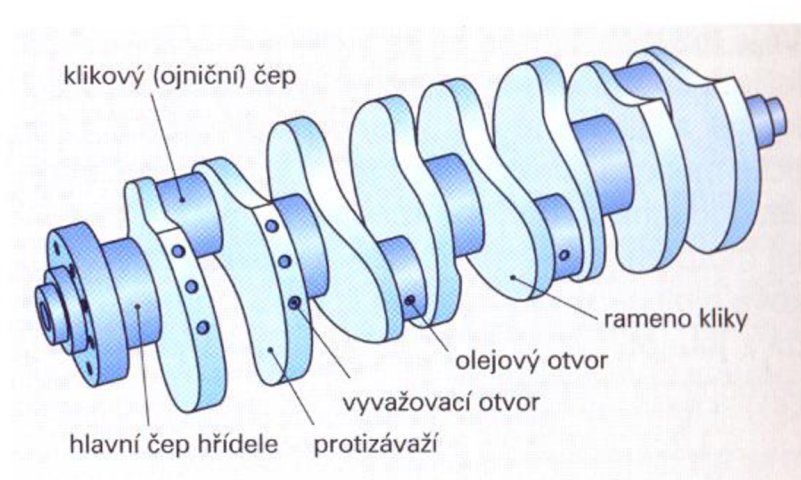
Každý hvězdicový motor má lichý počet válců, které se zapalují ve střídavém pořadí. Pětiválcový motor tedy funguje v pořadí 1, 3, 5, 2, 4. Sedmiválcový motor pracuje na podobném principu, tedy v pořadí 1, 3, 5, 7, 2, 4, 6.

3.1.2 Kliková hřídel

Kliková hřídel je mechanická součást, jejíž hlavní funkce je převod posuvného vratného pohybu ojnice a jádra solenoidu na rotační pohyb. Je vhodné, aby byla odolná vůči ohybu a krutu

a zároveň proti opotřebení. Skládá se z hlavních a ojničních čepů, ramen klikové hřídele, protizávaží a setrvačníku viz obrázek 2.

Obrázek 2 - Popis klikové hřídele (5)



3.1.2.1 Ramena klikové hřídele

Ramena klikové hřídele mají dvě hlavní funkce. Jednak jsou k nim připojené hlavní a ojniční čepy a zároveň obsahuje vývažek, který musí fungovat jako vyvážení odstředivých sil, které jsou na klikovou hřídel vyvíjeny.

Hmotnost vývažku lze vypočítat pomocí rovnic 1 a 2 pro odstředivé síly:

$$F_o = m_R \cdot \omega^2 \cdot r = m_{ZC} \cdot \omega^2 \cdot r_{ZC} \quad (1)$$

$$m_R = \sum \frac{m_i \cdot r_i}{r} \quad (2)$$

$$m_{ZC} = \frac{m_r \cdot r}{r_{ZC}}$$

F_C ... odstředivá síla [N]

m_R ... suma hmotností rotujících částí [kg]

m_i ... hmotnosti jednotlivých rotujících částí [kg]

m_{ZC} ... hmotnost vývažku [kg]

r_i ... vzdálenost těžiště jednotlivých rotujících částí od středu rotace [m]

r ... vzdálenost těžiště rotujících částí od středu rotace [m]

r_{ZC} ... vzdálenost těžiště vývažku od středu rotace [m]

ω ... úhlová rychlost [rads^{-1}]

Je nutné, aby obě horní i dolní poloviny působily stejnou odstředivou silou. Pokud by byly síly odlišně velké, docházelo by ke zvýšení kmitání, které by způsobovalo zvýšení namáhání a tím i opotřebením součástí.

Dále je nutné počítat i se setrvačnými silami posuvných částí prvního a druhého řádu. Síly vyšších řádů se dostávají do velmi nízkých hodnot, a proto se s nimi v praxi nepočítá.

Setrvačné síly I. a II. řádu (6) určené rovnicemi 3 a 4:

$$P_{S1} = m_p \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \cos\alpha \quad (3)$$

$$P_{S2} = \lambda \cdot m_p \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \cos 2\alpha \quad (4)$$

3.1.2.2 Uložení klikové hřídele

Hlavní čepy jsou uloženy v kluzných nebo valivých ložiskách. Kluzná jsou sice méně nákladná na výrobu, snadno opravitelná a velmi odolná vůči nečistotám, ale na druhou stranu mají velký součinitel tření, což znamená vyšší spotřebu maziva. Valivá ložiska (hlavně kuličková) mají nízké třecí ztráty a nízké nároky na mazání, ale menší únosnost a jsou nákladnější na výrobu.

3.1.2.3 Čepy

V klikové hřídeli figurují hlavní čepy a ojniční čepy. Hlavní čepy mají společnou osu s osou klikové hřídele a jsou uloženy pomocí ložisek v kleci motoru. Ojniční čepy slouží k připojení ojnice ke klikové hřídeli.

3.1.2.4 Setrvačnick

Setrvačnick obecně je rotační zařízení, které slouží k nahromadění kinetické energie, kdy se využívá jeho momentu setrvačnosti. Při nedostatku energie v soustavě může setrvačnick soustavě energii dodat a při přebytku ji odebrat a absorbovat. Při konstrukcích motorů v autech má kolem sebe setrvačnick ještě ozubený věnec, na který je připojen startér. (7)

Energie setrvačnicku (7) vychází ze vztahu 5:

$$E = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 \quad (5)$$

Vzhledem k tomu, že jako setrvačnick u většiny klikových hřídelí figuruje plný válec o poloměru r [m] a hmotnosti m [kg], lze moment setrvačnosti J [$kg \cdot m^2$] (8) vyjádřit ze vztahu 6:

$$J = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2 \quad (6)$$

3.1.3 Ojnice

Ojnice je strojní součást, která je spojená s jádrem elektromagnetu malou hlavou a s ojničním čepem klikové hřídele velkou hlavou. Robustní část mezi malou a velkou hlavou se nazývá

dřík. Dřík by měl odolat vysokým teplotám, tlaku a dalším nepříznivým podmínkám, které s provozem motoru souvisí. Tyto části jsou buď pevně spojeny, nebo se dodávají jako komponenty ke složení. (9)

3.1.4 Vačka

Vačka je strojní součást, která má za úkol převádět rotační pohyb na posuvný vratný pohyb. Nejjednodušší vačky mají vejčitý tvar, dají se však používat i složitější. Na její povrch je přitlačeno tzv. zdvihátko, kterému musí být umožněn pohyb zpět. Tento přítlak je většinou řešen pružinou. Tvar vačky je výsledkem předem určené zdvihové křivky zdvihátka. Její průběh bývá uzpůsoben tak, aby měla alespoň první dvě až tři derivace spojitě v celém svém průběhu. Důležitou úlohu hraje ve tvaru křivky i zrychlení. Příliš vysoké hodnoty kladného zrychlení opotřebovávají součásti mechanismu a vysoké hodnoty záporného zrychlení mohou docílit ztráty kontaktu mezi vačkou a zdvihátkem. (10)

3.2 3D Tisk

3D tisk je výrobní metoda 21. století, která funguje na principu aditivní výroby. To znamená, že je materiál postupně podáván na výrobek. Tím se vlastně liší od obráběcích metod, kde tento postup funguje obdobně, ale naopak. 3D tisk je navíc oproti obráběcím zařízením jako soustruh nebo fréza daleko levnější a má daleko větší rozsah využití. (11)

3.2.1 Postup při tisku

Výrobek je potřeba prvně vymodelovat. Většina 3D tiskáren je kompatibilní se Slicerem, což je program, ve kterém se požadované výrobky navrhují. Po návrhu se jednotlivé výrobky ve formátu gcode uloží na SD kartu, která se vloží do tiskárny. Po potvrzení tisku se začne nahřívát plastový filament používaného materiálu a při dosažení vhodné teploty k tisku se začne na podložku formovat půdorys výrobku. Jakmile tiskárna dokončí tisk, výrobek začne chladnout a po vychladnutí je připravený k odloupení ze základové desky. Následně je třeba odstranit podpěry a výrobek očistit od vlasů plastu a ostatních nečistot.

3.2.2 Dostupné materiály

K výrobě součástí 3D tiskem je potřeba i vhodný filament, což je drátový polotovár z různých materiálů vhodných pro tisk. Zde je popis materiálů, ke kterým jsem měl přístup.

3.2.2.1 PLA

Polylactic acid – kyselina polymléčná je velmi snadno tisknutelný materiál, který je vhodný k tisku detailních modelů, figurek nebo prototypů pro jiný materiál bez mechanického zatížení. (12)

Výhody: Levný, rychle tisknutelný, dobrý detail, odolnost v tahu 40 MPa

Nevýhody: Malá rázová houževnatost (Charpy 12-16 kJ.m⁻²), špatná odolnost proti UV záření a vyšším teplotám (měkne při 60 °C)

3.2.2.2 ASA

Akrylester styren akrylonitril je díky své odolnosti vůči vyšším teplotám a UV záření materiál vhodný na venkovní použití. Je rozpustný v acetonu, a proto lze jeho povrch touto látkou vyleštit a změnit jeho mechanické i chemické vlastnosti. (13)

Výhody: Odolnost vůči teplotám (85-100 °C) a UV záření, rozpustný v acetonu, dobrá odolnost proti obroušení a nárazu (Charpy 45 kJ.m⁻²)

Nevýhody: Silné kroucení, obsahuje styreny, které se uvolňují při tisku, částečně pohlcuje vlhkost z okolního prostředí

3.2.2.3 PETG

Polyethylentereftalát modifikovaný glykolem je jednoduše tisknutelný a relativně odolný materiál. Díky své pružnosti a houževnatosti se využívá při tisku technických součástí. Většina tiskáren od Prusa Research je vyrobena právě z PETG. (14)

Výhody: Dobrá přilnavost vrstev → minimální kroucení, tuhý a odolný (Charpy 70 kJ.m⁻²), dobrá pevnost v tahu (50 MPa), odolný vůči teplotám (80 °C), nepohlcuje vlhkost

Nevýhody: Častá tvorba vlásků (stringování) → po vytisknutí je nutné od nich výrobek důkladně očistit, nevhodné k tisku detailů, snadné přemostění

3.3 Elektrotechnická část

V této části je vysvětlen popis elektrotechnických součástí použitých při výrobě motoru. Součástí obvodu jsou solenoidy, koncové spínače reagující na vačky a usměrňovací diody.

3.3.1 Elektromagnet

Elektromagnet je zařízení, ve kterém je po přívodu elektrického proudu vytvořeno magnetické pole. Vyrábí se nasazením cívky kolem jádra z kovu. Jakmile cívkou protéká elektrický proud,

vytváří kolem sebe magnetické pole, které magnetizuje jádro a uvádí ho do pohybu. Sílu magnetického pole lze zvýšit nebo snížit změnou množství přiváděného napětí. Elektromagnety mají širokou škálu využití jako jsou elektromotory, generátory, a MRI stroje. Používají se také v každodenních zařízeních, jako jsou zvonky a reproduktory.

3.3.2 Solenoid

Solenoid je typ elektromagnetu tvořeného spirálovou cívkou drátu, jejíž délka je podstatně větší než její průměr. Tím je vytvořené magnetické pole stabilnější. Ve strojírenství se termín "solenoid" nevztahuje pouze na elektromagnet, ale na kompletní zařízení poskytující akční člen, který přeměňuje elektrickou energii na mechanickou.

3.3.3 Koncový spínač

Koncový spínač je elektrotechnické zařízení, které slouží k spínání a rozpínání obvodu skrze mechanický impuls vytvořený silou působící na spínací kontakty. Síla nebo pohyb detekovaný spínacím kontaktem je přenášen do vestavěného spínače prostřednictvím vnitřního pístu. Vestavěný spínač se může okamžitě zapnout nebo vypnout pomocí spínacího mechanismu. Obal koncového spínače je tvořen z plastu nebo z kovu, je pevný a odolný vůči nečistotám. Ze spodu obalu jsou vyvedeny tři kontakty – přívod, sepnuto, rozepnuto. (15)

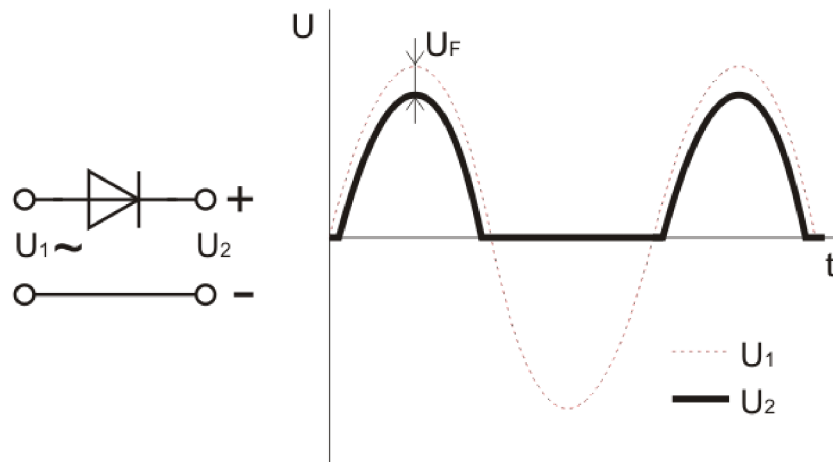
3.3.4 Usměrňovací dioda

Usměrňovací dioda je elektrotechnická součástka, která usměrňuje střídavé napětí na stejnosměrné viz obrázek 3. V ideálním případě by měla v propustném směru vést proud bez jakéhokoliv úbytku napětí a v závěrném směru nepropustit žádný proud. V praxi dioda začne v propustném směru vést proud až od hodnoty difuzního napětí U_D , které se pohybuje mezi 0,6 až 0,7 V, a vytváří se na ní úbytek napětí U_F o velikosti 0,8 až 1,2 V.

Jelikož má dioda v propustném směru nenulovou velikost odporu, při průchodu proudem se zahřívá. Teplota je přímo úměrná velikosti proudu, a proto nesmí dojít k překročení maximálního proudu I_F , kdy by došlo k přehřátí a zničení diody.

Při příliš vysokém napětí nad hodnotu U_{BR} v závěrném směru dojde k proražení diody. Pokud tato situace nastane krátkodobě například formou napěťové špičky, po snížení napětí se dioda vrátí její původní funkci. Při dlouhodobém překročení, které je dáno výrobcem, je dioda zničena. (16)

Obrázek 3 - Průběh usměrnění (16)



3.4 Postup výpočtu otáček

3.4.1 Síla magnetického pole

Vzorec pro výpočet síly magnetického pole podle proudu I lze odvodit ze součtu magnetických sil na jednotlivé náboje. Síly je možné sčítat, jelikož působí ve stejném směru. Sílu, která působí na samotný náboj, lze vyjádřit vztahem 7 (17):

$$F = Q \cdot v_d \cdot B \cdot \sin\theta \text{ [N]}(7)$$

Kde Q [J] je náboj částice, v [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] je rychlost náboje, B [T] je magnetická indukce a θ [°] je úhel mezi vektory proudu I a magnetické indukce B .

Pro výpočet síly působící na n nábojů v magnetickém poli platí rovnice 8:

$$F = Q \cdot v_d \cdot B \cdot \sin\theta \cdot N \text{ [N]}(8)$$

Kde N je celkový počet nábojů ve vodiči a lze dále rozvést na $N = n \cdot V$, kde n je počet nábojů v jednotce objemu a V je objem vodiče v poli. Tento objem se dále dělí na průřezovou plochu vodiče A [mm^2] a délku vodiče l [mm]. Pro předchozí vztah tedy platí že:

$$F = (Q \cdot v_d \cdot B \cdot \sin\theta) \cdot (n \cdot Al) = (n \cdot q \cdot A \cdot v_d) \cdot l \cdot B \cdot \sin\theta \text{ [N]}$$

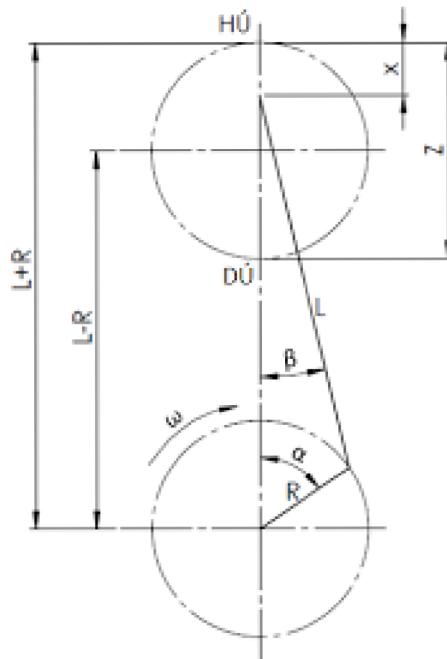
A jelikož se proud $I = (nqAv_d)$ [A], lze sílu magnetického pole vyjádřit vztahem 10 (17):

$$F = I \cdot l \cdot B \cdot \sin\theta \text{ [N]}(10)$$

Kde I [A] je proud procházející vodičem, l [m] je délka tohoto vodiče, B [T] je magnetická indukce a θ [°] je úhel mezi vektory B a I .

3.4.2 Veličiny na klikové hřídeli

Pro pochopení výpočtu hodnot klikové hřídele je nejprve nutné definovat veličiny, které budou ve výpočtu figurovat.



Obrázek 4 - Veličiny na klikovém mechanismu

r ... Poloměr ramena kliky [mm] (polovina zdvihu)

L ... Délka ojnice [mm]

Z ... Zdvih [mm]

HÚ, DÚ ... Horní a dolní úvrat'

x ... Poloha jádra mezi horní a dolní úvratí [mm]

α ... Natočení klikové hřídele [°]

β ... Pomocný úhel [°]

λ ... Ojniční poměr = r/l

3.4.2.1 Dráha jádra

Při chodu motoru koná jádro nerovnoměrný přímočarý pohyb z horní do dolní úvratě a zpět. Vzdálenost mezi horní a dolní úvratí se nazývá zdvih Z [mm]. Tato veličina je určena dvojnásobkem poloměru ramena R [mm].

Pro definování polohy jádra x lze využít vztah 11 (18):

$$x = r \cdot \left(1 + \frac{1}{4} \cdot \lambda - \cos\alpha - \frac{1}{4} \cdot \lambda \cdot \cos(2\alpha) \right) \quad (11)$$

Z tohoto vztahu lze poznat, že vzdálenost x je závislá na natočení kliky α , a že platí $x \leq Z$

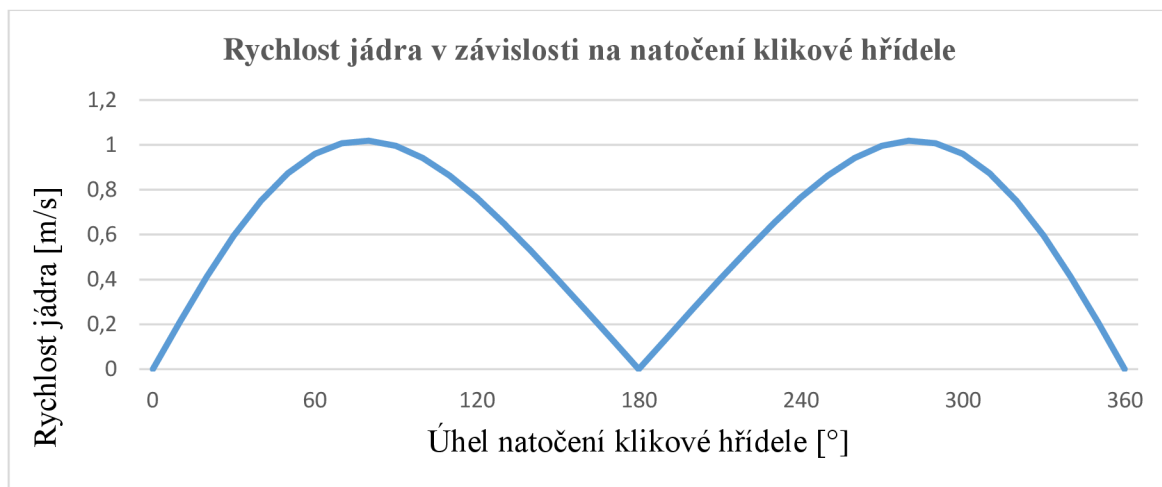
3.4.2.2 Rychlost jádra

Derivací dráhy jádra podle času t [s] je rychlost jádra, což je u klikové hřídele proměnná se sinusovým průběhem. Obecně platí, že je v úvratích nulová viz obrázek 5. Její velikost určuje vztah 12 (18):

$$v = r \cdot \omega \cdot \left(\sin\alpha + \frac{1}{2} \cdot \lambda \cdot \sin(2\alpha) \right) \quad (12)$$

$$\omega = \text{úhlová rychlost (rad} \cdot \text{s}^{-1}) = 2\pi \cdot 60n, \text{ kde } n = \text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$$

Obrázek 5 - Rychlost jádra



Pro zjednodušení výpočtu byla zavedena střední pístová rychlost v_s , která vychází z předpokladu, že jádro koná rovnoměrný přímočarý pohyb z horní do dolní úvratě a zpět za čas jedné otáčky. Výsledný vztah 13 (18) je proto:

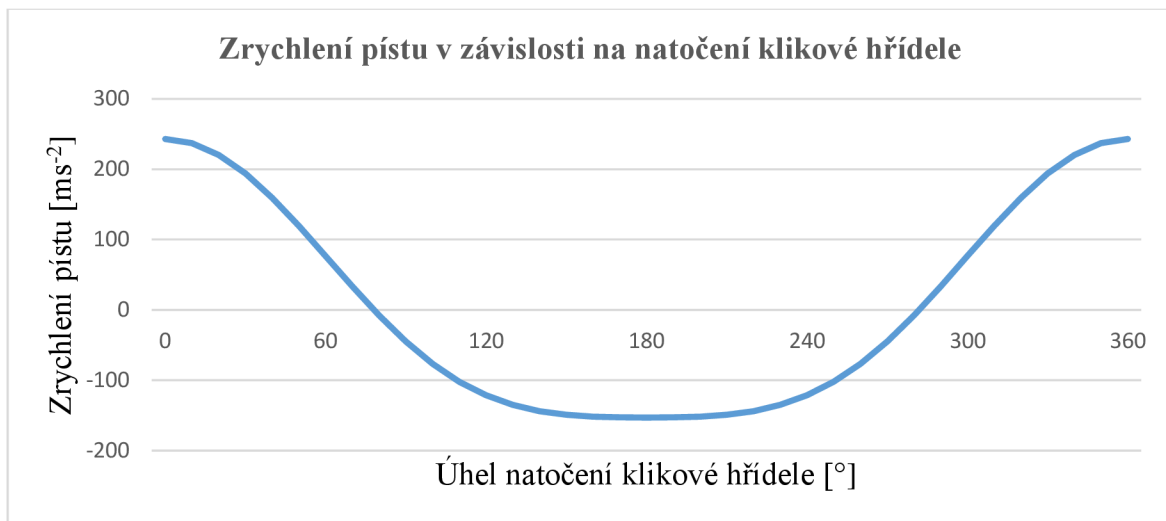
$$v_s = \frac{2 \cdot z \cdot n}{60} \quad (13)$$

3.4.2.3 Zrychlení jádra

Druhou derivací dráhy jádra elektromagnetu podle času t je možné zjistit zrychlení pístu. Zrychlení pístu je proměnná veličina s kosinovým průběhem, která svých maximálních hodnot dosahuje v úvratích viz obrázek 6. Naopak nulové hodnoty dosahuje v momentě, kdy je rychlost pístu maximální. Pro zrychlení pístu v klikovém mechanismu platí vztah 14 (18):

$$a = r \cdot \omega^2 \cdot (\cos\alpha + \lambda \cdot \cos(2\alpha)) \quad (14)$$

Obrázek 6- Zrychlení pístu



3.4.2.4 Účinek proudu I na zrychlení a

Z Newtonova druhého zákona síly je zřejmé že $F = m \cdot a$ [N] (19). Proto zde lze dosadit:

$$m \cdot a = F = I \cdot l \cdot B \cdot \sin\theta$$

$$m \cdot a = I \cdot l \cdot B \cdot \sin\theta$$

$$m \cdot r \cdot \omega^2 \cdot (\cos\alpha + \lambda \cdot \cos 2\alpha) = I \cdot l \cdot B \cdot \sin\theta$$

Z tohoto vyjádření je možno uvažovat, že množství proudu I [A] dodaného do vodiče je přímo úměrné magnetické síle působící na píst a tím i množství vykonaných otáček.

4 Vlastní práce

Kapitola vlastní práce obsahuje postup konstrukce plochého solenoidového elektromotoru. Věnuje se nákupu, vývoji a následné konstrukci mechanických a elektrotechnických součástí a zapojení obvodu.

4.1 Konstrukce mechanických součástí

Pro konstrukci jednotlivých součástí motoru jsem se až na výjimky rozhodl pro 3D tisk. K obráběcím strojům jsem neměl přístup, na druhou stranu k 3D tiskárnám ano. Součástky, které nebylo vhodné tisknout, jsem kupoval.

4.1.1 Nákup součástí

Pro uložení klikové hřídele jsem se rozhodl pro valivá jednořadá kuličková ložiska. Jednak byla za přijatelnou cenu a zároveň představovala ideální řešení. Konkrétní položkou byly 2 ks jednořadých kuličkových ložisek MR 104 ZZ ZEN.

Parametry MR 104 ZZ ZEN:

Vnitřní průměr $d = 4$ mm

Vnější průměr $D = 10$ mm

Šířka $B = 4$ mm

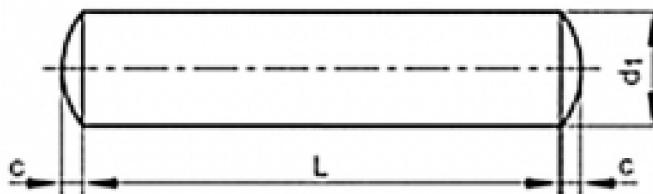
Hmotnost $m = 0,001$ kg

Cena = 26,60 Kč/ks

Dále bylo nutné nakoupit součásti, které by figurovaly jako spojení vidlice plunžrů a hlavní a ojnicí čepy. Řešením mi byly za studena tažené válcové kolíky.

Parametry válcových kolíků:

Obrázek 7 - Rozměry kolíku (20)



Tabulka 1 - Výběr kolíků pro konstrukci (20)

Název	ČSN 022150 m6 3x10	ČSN 022150 m6 3x20	ČSN 022150 m6 4x30	ČSN 022150 m6 4x40
Počet ks	4	2	1	1
Funkce v hřídeli	Kolík mezi plunžrovým pístem a ojnicí	Ojnicí čep	Hlavní čep 1	Hlavní čep 2
Délka L [mm]	10	20	30	40
Délka c [mm]	0,45	0,45	0,6	0,6
Šířka d ₁ [mm]	3	3	4	4
Cena [Kč/ks]	1,13	1,68	2,60	2,67

Původní plán tisku zahrnoval i vytisknuté kolíky jako hlavní čepy klikové hřídele. Po sestavení hřídele docházelo ke zkrutu kolíků a byly vyhodnoceny jako nepoužitelné.

Dále byly třeba nakoupit součástky do elektrického obvodu. Ten měl být složen ze čtyř elektromagnetů a čtyř koncových spínačů.

Jako elektromagnety jsem si vybral **tažné elektromagnety JF 0630B**:

Napájecí napětí: 12 V DC

Konstantní proud: do 2900 mA

Síla: 6 N

Délka čepu: 10 + 10 mm

Zdvih: 10 mm

Průměr čepu: 7 mm

Rozměry: 30 x 20 x 17 mm

Počet: 4 ks

Cena: 149 Kč/ks

Jako koncové spínače jsem si vybral **koncový mikrospínač a pákový doraz s kladkou – 5A 125V**:

Provozní teplota: -40°C až 70°C

Jmenovité napětí: AC 125 - 250V

Hmotnost: 2 g

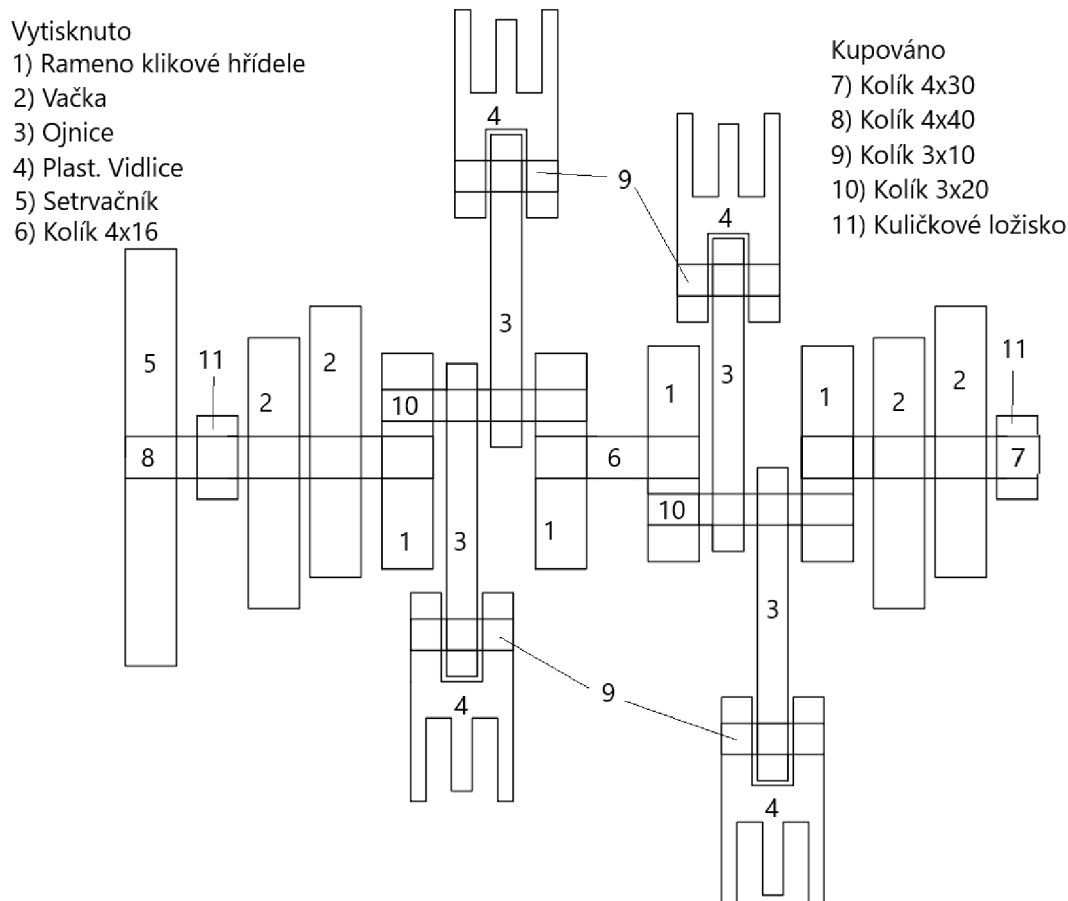
Jmenovitý proud: 5A

Rozměry: 20 · 10 · 6 mm

4.1.2 Kliková hřídel

Klikovou hřídel jsem se pro co největší zjednodušení a úsporu materiálu rozhodl navrhnout pro plochý motor o 4 elektromagnetech, kdy se protilehlé ojnice upínají na jeden ojniční čep. Hřídel jsem se rozhodl opatřit čtyřmi vačkami, pro každý motor zvláště jednu viz obrázek 8. Všechny součásti klikové hřídele včetně ložisek jsou na hlavní čepy nalisovány.

Obrázek 8 - Návrh klikové hřídele

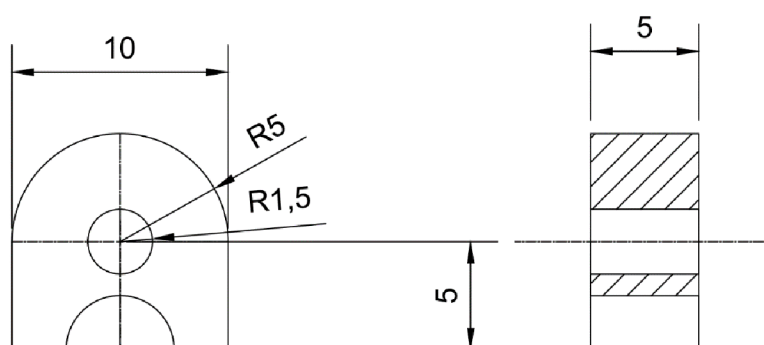


4.1.2.1 Ramena klikové hřídele

Na ramena klikové hřídele jsou podle obrázku 5 připojeny hlavní i ojnicí čepy. Díry jsou vzhledem ke způsobu spojení zalisováním vytvořené bez vůle a bez přesahu. Díra pro ojnicí čep klikové hřídele navíc musí korespondovat s velikostí zdvihu elektromagnetu JF 0630B, kdy je tento zdvih $Z = 10$ mm. Proto je střed díry pro ojnicí čep vzdálen o 5 mm od osy otáčení klikové hřídele.

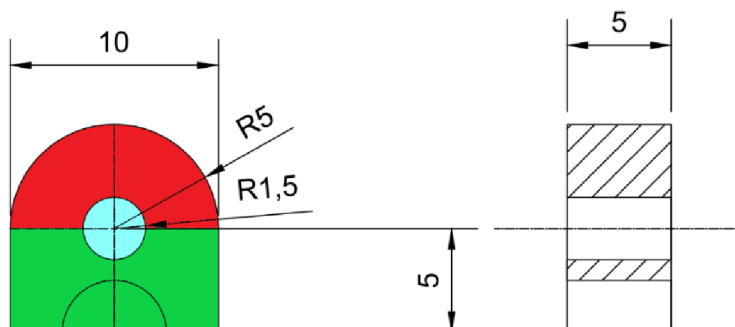
Konstrukce vývažku byla uvažována pouze pro odstředivé síly. Pro výpočet protizávaží je nejprve nutné definovat, co přesně se bude vyvažovat viz obrázek 9.

Obrázek 9 - Návrh ramena klikové hřídele



Pro výpočet odstředivé síly této půlky ramena klikové hřídele bylo nutné rameno rozdělit na tři části, což je patrné na obrázku 10.

Obrázek 10 - Rozložení jednotlivých částí ramena



Nejprve je nutné spočítat vzdálenost těžišť jednotlivých částí od středu otáčení. U všech částí stačí po vhodně zvoleném souřadnicovém systému určit souřadnici Y. K tomu lze využít vzorec 15 (21):

$$Y_T = \frac{\sum m_i \cdot y_i}{m} \quad (15)$$

Vzhledem k tomu, že je hustota ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] a hloubka h [m] konstantní, místo hmotnosti m [kg] stačí počítat s obsahem S [mm^2]. Proto lze vzorec zjednodušit na vztah 16:

$$Y_T = \frac{\sum S_i \cdot y_i}{S} \quad (116)$$

Y_T ... Y souřadnice těžiště

S_i ... Obsah jednotlivých částí [mm^2]

y_i ... Y souřadnice jednotlivých částí

S ... Celkový obsah [mm^2]

Počtení řešení jednotlivých částí:

Červená část:

$$S = \frac{\pi d^2}{8} = \frac{100\pi}{8} = 12,5\pi \text{ mm}^2$$

$$T = \left[0; \frac{4r}{3\pi}\right] = \left[0; \frac{20}{3\pi}\right]$$

$$S_1 = \frac{\pi d^2}{8} = \frac{9\pi}{8} \text{ mm}^2$$

$$T_1 = \left[0; \frac{4r}{3\pi}\right] = \left[0; \frac{6}{3\pi}\right]$$

Pokud bude počátek pomocné soustavy v bodě $[0; 20/3\pi]$ tak:

$$S_2 = S - S_1 = 12,5\pi - \frac{9\pi}{8} \text{ mm}^2$$

$$0 = \frac{S_1 \cdot (Y_1 - Y) + S \cdot Y_2}{S} \rightarrow Y_2 = 5 + Y + \frac{\frac{9\pi \cdot 14}{8 \cdot 3\pi}}{12,5\pi - \frac{9\pi}{8}} = 5 + \frac{20}{3\pi} + \frac{6}{13\pi} = 7,269 \text{ mm}$$

Těžiště červené části je vzdálené od středu otáčení klikové hřídele 7,269 mm.

Zelená část:

$$S = a \cdot b = 5 \cdot 10 = 50 \text{ mm}^2$$

$$T = [0; 2,5] = \text{poč. pomoc. soustavy}$$

$$S_1 = \frac{\pi \cdot d^2}{8} = \frac{9\pi}{8} \text{ mm}^2$$

$$T_1 = \left[0; 5 - \frac{4r}{3\pi}\right] = \left[0; 5 - \frac{6}{3\pi}\right]$$

$$S_2 = S - S_1 = 50 - \frac{9\pi}{8} \text{ mm}^2$$

$$T_2 = [0; Y + Y_2]$$

$$0 = \frac{S_1 \cdot (Y_1 - Y) + S \cdot Y_2}{S} = \frac{\frac{9}{8\pi} \cdot \left(2,5 - \frac{6}{3\pi}\right) + \left(50 - \frac{9}{8\pi}\right) \cdot Y_2}{50} \quad Y_2 = -\frac{\frac{9}{8\pi} \cdot \left(2,5 - \frac{6}{3\pi}\right)}{50 - \frac{9}{8\pi}} = -0,14$$

$$T_2 = [0; Y + Y_2] = [0; 2,5 + (-0,14)] = [0; 2,34]$$

Světle modrá část:

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{9\pi}{4} \text{ mm}^2$$

$$T = [0; 5]$$

Výpočty odstředivých sil jednotlivých částí:

Jak bylo zmíněno v teoretické části v rovnici 1, odstředivá síla rotačních částí lze spočítat jako:

$$F_O = \omega^2 \cdot \sum m_i \cdot r_i$$

A tato odstředivá síla se musí rovnat odstředivé síle vyvažovacího mechanismu. Pro něj platí rovnice 1:

$$F_O = m_{ZC} \cdot \omega^2 \cdot r_{ZC}$$

Protože se úhlová rychlost objevuje na obou stranách rovnice, a je zřejmé, že se obě půlky ramena klikové hřídele budou točit stejnou rychlostí, lze vykrátit. Poté tedy ve vztahu zbývá:

$$m_{ZC} \cdot r_{ZC} = \sum m_i \cdot r_i$$

m_{ZC} ... hmotnost vývažku

r_{ZC} ... vzdálenost těžiště vývažku od středu otáčení klikové hřídele

m_i ... hmotnost jednotlivých částí klikové hřídele

r_i ... vzdálenost těžiště jednotlivých částí od středu otáčení klikové hřídele

Červená část

$$S_1 = 12,5\pi - \frac{9\pi}{8} \text{ mm}^2$$

$$h_1 = 5 \text{ mm}$$

$$\rho_1 = 1270 \text{ kgm}^{-3}$$

$$m_1 = S_1 \cdot h_1 \cdot \rho_1 = \left(12,5\pi - \frac{9\pi}{8}\right) \cdot 5 \cdot 10^{-9} \cdot 1270 = 2,269 \cdot 10^{-4} \text{ kg}$$

$$F_1 = m_1 \cdot r_1 = 2,269 \cdot 10^{-4} \cdot 7,269 \cdot 10^{-3} = 1,65 \cdot 10^{-6} \text{ N}$$

Zelená část:

$$S_2 = 50 - \frac{9\pi}{8} \text{ mm}^2$$

$$h_1 = 5 \text{ mm}$$

$$\rho_1 = 1270 \text{ kgm}^{-3}$$

$$m_2 = S_2 \cdot h_1 \cdot \rho_1 = \left(50 - \frac{9\pi}{8}\right) \cdot 5 \cdot 10^{-9} \cdot 1270 = 2,951 \cdot 10^{-4} \text{ kg}$$

$$F_2 = m_2 \cdot r_2 = 2,951 \cdot 10^{-4} \cdot 2,36 \cdot 10^{-3} = 0,696 \cdot 10^{-6} N$$

Světle modrá část:

$$S_3 = \frac{9\pi}{4} mm^2$$

$$h_3 = 10 mm$$

$$\rho_1 = 7850 kgm^{-3}$$

$$m_2 = S_3 \cdot h_3 \cdot \rho_3 = \frac{9\pi}{4} \cdot 10 \cdot 10^{-9} \cdot 7850 = 5,549 \cdot 10^{-4} kg$$

$$F_3 = m_3 \cdot r_3 = 5,549 \cdot 10^{-4} \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 2,775 \cdot 10^{-6} N$$

Z těchto výpočtů můžeme určit konečnou hodnotu odstředivé síly rotačních částí:

$$F_O = F_1 + F_2 + F_3 = (1,65 + 0,696 + 2,775) \cdot 10^{-6} = 5,121 \cdot 10^{-6} N$$

Pro výpočet vývažku budeme uvažovat tvar půlkruhu, kde známe hloubku h [m] i hustotu ρ [kg·m⁻³]. Úhlová rychlost ω [rad·s⁻¹] zůstává pořád neměnná, a proto není v následujícím vztahu vyjádřena.

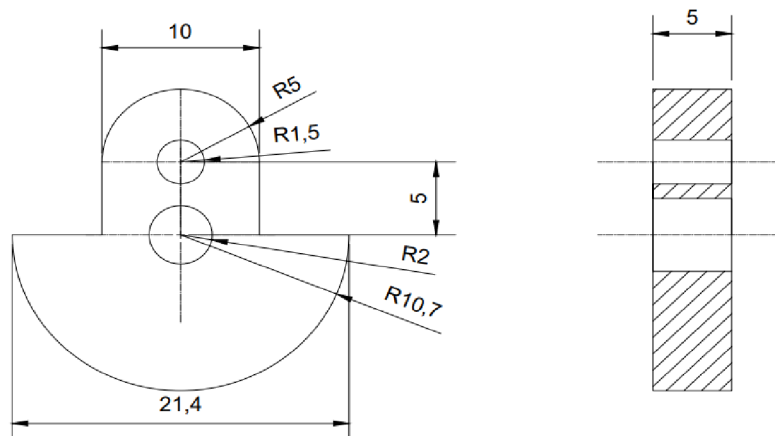
Vztah pro odstředivou sílu vyvažujícího mechanismu je.

$$F_O = m_{ZC} \cdot \omega^2 \cdot r_{ZC} = \frac{\pi \cdot r^2}{2} h \cdot \rho \cdot \frac{4r}{3\pi} = \frac{2}{3} r^3 \cdot h \cdot \rho$$

$$r = \sqrt[3]{\frac{3F}{2h \cdot \rho}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 5,121 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 0,005 \cdot 1270}} = 10,7 mm$$

Rameno tedy bude mít rozměry viz obrázek 11:

Obrázek 11 - Rozměry ramena klikové hřídele



4.1.2.2 Setrvačnick

Setrvačnick byl sestroyen ke stabilizaci otáček a zároveň, aby byla pomocí setrvačné síly setrvačnicku a klikové hřídele překonána vzdálenost sepnutí protichůdných vaček.

Pro mé účely postačil válec o poloměru $r = 25$ mm a celkové hmotnosti $m = 17,8$ g. Součástí tohoto válce jsou čtyři díry pro zátěže ve formě šestihranných matic M6, které díky své vyšší hustotě ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] zvyšují moment setrvačnosti J [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]. Ten lze vypočítat ze vztahu 6 pro moment setrvačnosti válce:

$$J = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,0178 \cdot 0,025^2 = 5,5625 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Z následující tabulky 2 je vidět množství vytvořené kinetické energie setrvačnickem podle vztahu 5:

$$E = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 \text{ [J]}$$

Tabulka 2 - Kinetická energie setrvačnicku

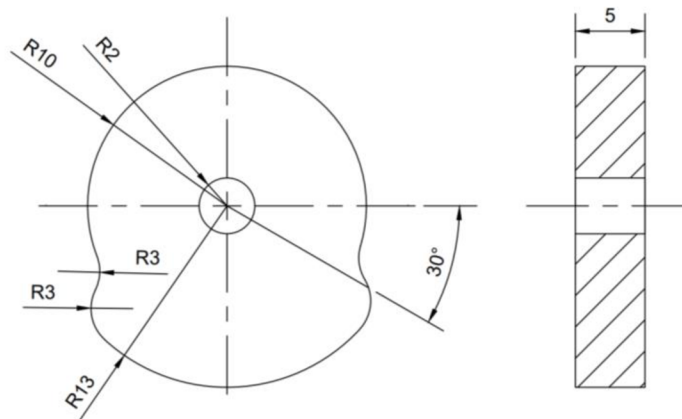
Moment setrvačnosti J [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$] = $5,5625 \cdot 10^{-6}$	
Úhlová rychlost ω [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$]	Kinetická energie E_k [J]
0	0
200	0,11125
400	0,445
600	1,00125
800	1,78
1000	2,78125
1200	4,005
1400	5,45125
1600	7,12
1800	9,01125
2000	11,125

4.1.2.3 Vačky

Dohromady 4 vačky slouží k načasování přepínání spínačů, jejichž rozdíl mezi sepnutím a rozepnutím jsou 3 mm. Tento rozdíl je zároveň rozdílem průměrů vaček. Malý průměr má poloměr o velikosti $r = 10$ mm a velký průměr má poloměr $r = 13$ mm.

Mezi protichůdnými sepnutími musí být čas bez sepnutí, aby se nestalo, že by motory pracovaly proti sobě. Znamenalo by to zastavení motoru a vytvoření namáhání na jednotlivé části klikové hřídele, které by toto zatížení nemusely vydržet. Tato problematika je vyřešena zmenšením části obvodu, kterého se dotýká zdvihátko o 30° z každé strany viz obrázek 12. Tam, kde nejsou sepnuty spínače, se kliková hřídel otáčí díky svým setrvačným silám.

Obrázek 12 -obr Konstrukce vaček



Každý elektromagnet má svoji vačku s tím, že první a třetí a poté druhá a čtvrtá pracují spolu. Vačky jsou vůči ramenům klikové hřídele natočeny tak, aby byly ojniční čepy při sepnutí spínačů z pohledu z boku nad sebou. Minimalizuje se tak vyvinuté namáhání na klikovou hřídel.

4.1.3 Ojnice

Na konstrukci ojnice bylo několik požadavků:

- 1) Oka pro připojení plunžru a oka pro připojení na ojniční čep musely mít dostatečnou vůli, aby se chod motoru nezpomaloval. V obou případech je díra o poloměru $r = 1,7 \text{ mm}$, tzn. s vůlí $0,2 \text{ mm}$.
- 2) Ojnice musela vydržet namáhání na smyk od plunžrů a klikové hřídele. Pokud by byla připojena přímo k plunžru, její průřez by byl příliš malý a namáhání by nemusela vydržet. Proto jsem plunžry opatřil nalisovanými plastovými vidlicemi viz obrázek 13, které dovolují ojnici větší průřez v nejužší části. Do vidlice byly nutné vyvrtat díry vrtačkou, jelikož 3D tisk vytváří pouze hranaté tvary. Všechny kulaté díly jsou tedy mnohoúhelníky s velkým počtem vrcholů.

Obrázek 13 - Plastová vidlice nalisovaná na plunžrové jádro

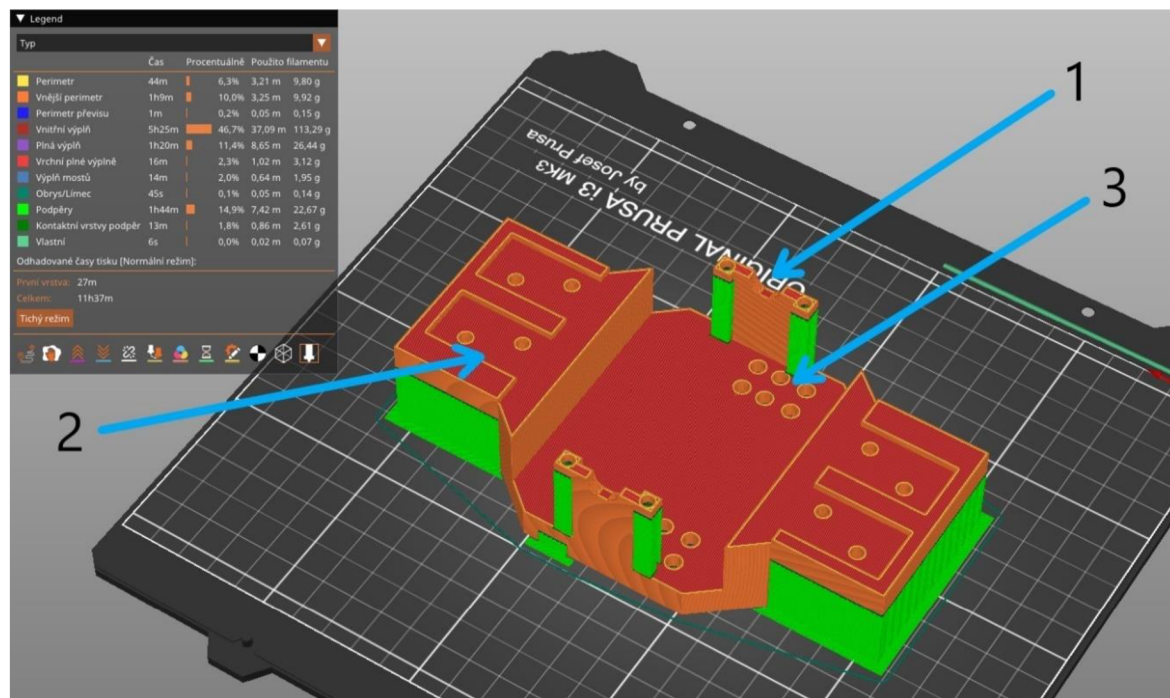


4.1.4 Klec motoru

Na kleci motoru jsou 3 důležitá místa viz obrázek 14:

- 1) Uložení
- 2) Díry pro připojení elektromagnetů
- 3) Díry pro připojení a vedení koncových spínačů

Obrázek 14 - Modelace klece motoru



4.1.4.1 Uložení

Kliková hřídel je do klece motoru uložena pomocí dvou ložisek. Výška uložení musela odpovídat výšce spínačů tak, aby bylo možné při otočení hřídele spínače sepnout viz obrázek 15.

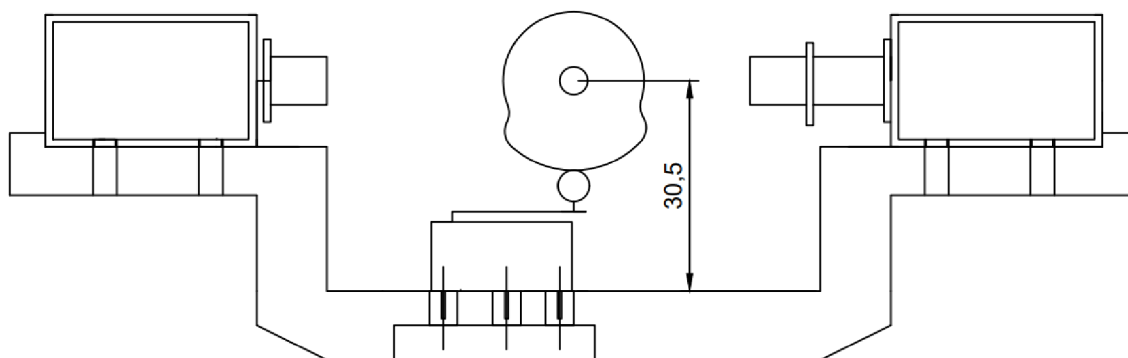
Výška sepnutého spínače ... 17,5 mm

Výška rozepnutého spínače ... 20,5 mm

Velký poloměr vačky ... 13 mm

Malý poloměr vačky ... 10 mm

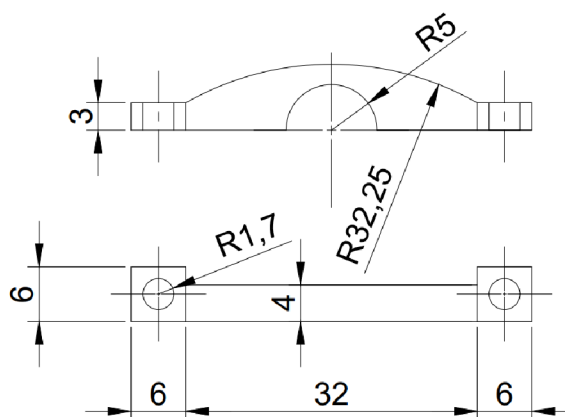
Obrázek 15 - Výška uložení



Pro fixaci uložení jsem se rozhodl pro spojení válcovými šrouby se závitem až k hlavě a šestihrannými maticemi se závitem o velikost M3, kterými se připevní horní i dolní polovina uložení. Pro tento způsob spojení jsem uložení opatřil dvěma dírami pro šroub M3 střední řady.

Dolní polovina uložení – obrázek 14, horní polovina uložení – obrázek 16

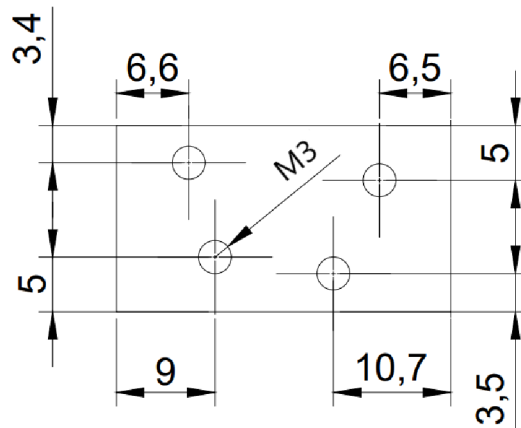
Obrázek 16 - Horní polovina uložení



4.1.4.2 Připojení elektromagnetů

Kovový obal elektromagnetů má ze spodní strany 4 díry se závitem M3 viz obrázek 17. K realizaci spojení stačila pouze jedna. Výhodou otočného spojení je značně zjednodušená manipulace s plunžry při nasazování klikové hřídele do klece. Díra pro šroub v kleci motoru je opět střední řady.

Obrázek 17 - Rozložení závitů v elektromotoru



Uložení je ve výšce 30,5 mm ode dna klece a střed plunžru je ode dna elektromagnetu vzdálen 9,6 mm. Elektromagnet tím pádem musí být zvednutý ode dna klece o 20,9 mm.

Vzdálenost mezi elektromagnetem a klikovou hřídelí lze spočítat jako součet velikosti přesahu plastové vidlice na plunžru a vzdálenosti středů ok ojnice viz obrázek 18.

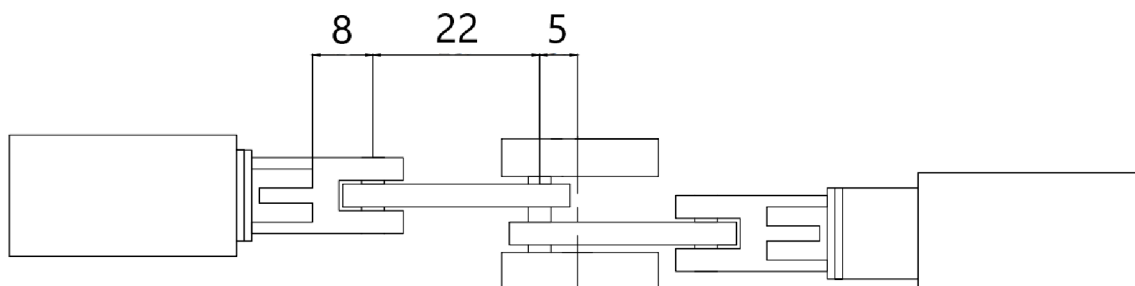
Vzdálenost mezi středy ok ojnice ... 22 mm

Velikost přesahu plastové vidlice ... 8 mm

Poloměr otáčení r ... 5 mm

Protilehlé elektromagnety musí být vůči sobě posunuty o 5 mm, aby se nepřekrývaly ojnice.

Obrázek 18 - Vzdálenost elektromagnetů od klikové hřídele



4.1.4.3 Připojení koncových spínačů

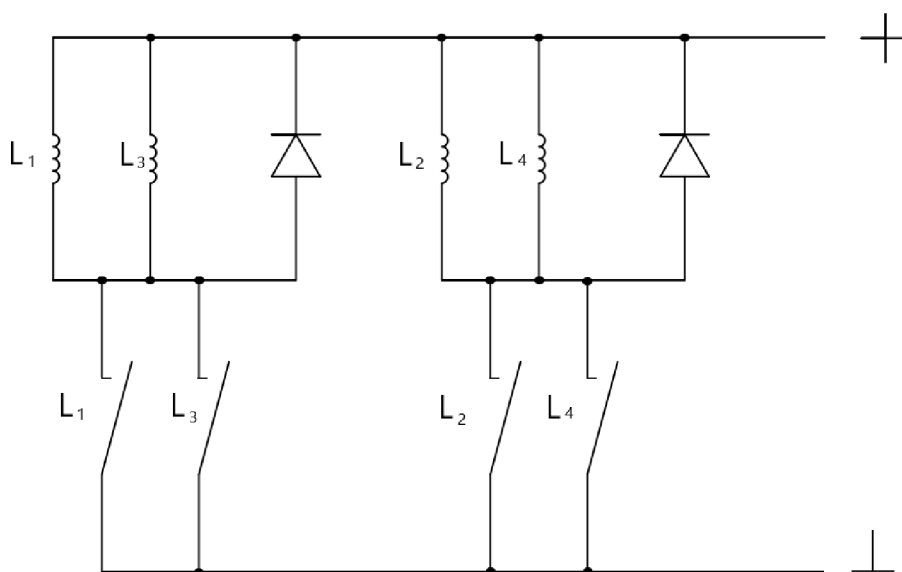
Koncové spínače jsou ke dnu klece přilepeny modelovým lepidlem Tamiya 87182. Toto lepidlo jsem vybral z důvodu rychlého zasychání (+/- 5 minut) a z důvodu velké řidkosti, díky které je schopné vzlínat do míst, kam by se normální lepidla nemusela dostat. Spínače jsou dále přilepeny a obaleny tavným lepidlem SN7379A, aby nedošlo k odlupování lepidla Tamiya narážením vaček do kladek spínačů.

Každý spínač má pod sebou 3 díry o poloměru $r = 2$ mm, které slouží k připojení drátů ke kontaktům spínače viz obrázek 15 v kapitole Uložení.

4.2 Řešení elektrického obvodu

Obvod je zapojen podle schématu na obrázku 19. Elektromagnety L_1 a L_3 a jejich spínače L_1 a L_3 jsou řazeny paralelně, a tedy pracují současně. U L_2 a L_4 to funguje stejně. Ke každé dvojici elektromagnetů je připojena křemíková dioda v závěrném směru, která omezuje elektrickou proudovou špičku opačné polaroty, která vzniká při odpojení elektrického proudu od elektromagnetů koncovými spínači.

Obrázek 19 - Řešení obvodu



4.3 Teoretické maximální otáčky

Pro výpočet teoretických otáček jsem neuvažoval třecí a setrvačné síly ani jiné činitele. Tyto teoretické otáčky jsou při plném zatížení elektromagnetů.

Síla jednotlivých solenoidů je dána výrobcem ... $F = I \cdot l \cdot B \cdot \sin\theta = 6N$

Po zvážení na váze s velikostí dílku $d = 0,05$ je hmotnost posuvných částí $m = 0,049 \text{ kg}$

Z Newtonova druhého zákona o síle je zřejmé, že $F = m \cdot a$. Pro vyjádření otáček je potřeba nejdříve vyjádřit zrychlení pístu $a [m \cdot s^{-2}]$ a pak ho dosadit do rovnice pro zrychlení pístu v klikovém mechanismu. Pokud tedy platí rovnice 17 (19):

$$F = m \cdot a [N] (17)$$

Tak zároveň platí:

$$a = \frac{F}{m} [m \cdot s^{-2}]$$

Je potřeba si také uvědomit, že vždy působí dva elektromotory souběžně. Proto je výsledná síla $F [N]$ rovna 12 N. Po dosazení do předchozího vztahu:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{12}{0,049} = 243 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Pro výpočet otáček je nutné stanovit úhlovou rychlost $\omega [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}]$ ze vztahu 14 pro zrychlení pístu v klikovém mechanismu:

$$a = r \cdot \omega^2 \cdot (\cos\alpha + \lambda \cdot \cos(2\alpha))$$

$$r = \sqrt{\frac{a}{r \cdot (\cos\alpha + \lambda \cdot \cos(2\alpha))}}$$

Dále je nutné si definovat ojnicní poměr λ a úhel natočení kliky α vztahem 18 (18).

$$\lambda = \frac{r}{l} (18)$$

Kde r je délka ramena kliky [m] a l je vzdálenost ojnicních ok [m], přičemž obě hodnoty jsou známé:

$$r = 0,005 \text{ m}$$

$$l = 0,022 \text{ m}$$

Po dosazení do vzorce pro ojnicní poměr tedy vyjde:

$$\lambda = \frac{r}{l} = \frac{0,005}{0,022} = 0,227$$

A protože je maximální zrychlení pístu v dolní a horní úvrati, úhel natočení klikové hřídele α je 0° . Po dosazení do vzorce pro úhlovou rychlost ω [$rad \cdot s^{-1}$] vychází:

$$\omega = \sqrt{\frac{a}{r \cdot (\cos\alpha + \lambda \cdot \cos(2\alpha))}} = \sqrt{\frac{243}{0,005 \cdot (1 + 0,227 \cdot 1)}} = 199,02 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

Pro výpočet otáček je nutné převést úhlovou rychlost na frekvenci f [$ot \cdot s^{-1}$] vztahem 19 (18) a následně ji vynásobit počtem sekund v minutě pro otáčky za minutu n [$ot \cdot min^{-1}$].

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (19)$$

$$f = \frac{\omega}{2 \cdot \pi} = \frac{199,02}{2 \cdot \pi} = 31,68 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$n = 60 \cdot f = 60 \cdot 31,68 = 1900,5 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$$

Tyto otáčky byly použity k vykreslení grafů rychlosti a zrychlení pístu, viz obrázky 5 a 6.

Pomocí vypočítaných otáček lze určit i střžení pístovou rychlost v_s [ms^{-1}] dosazením do vztahu 13:

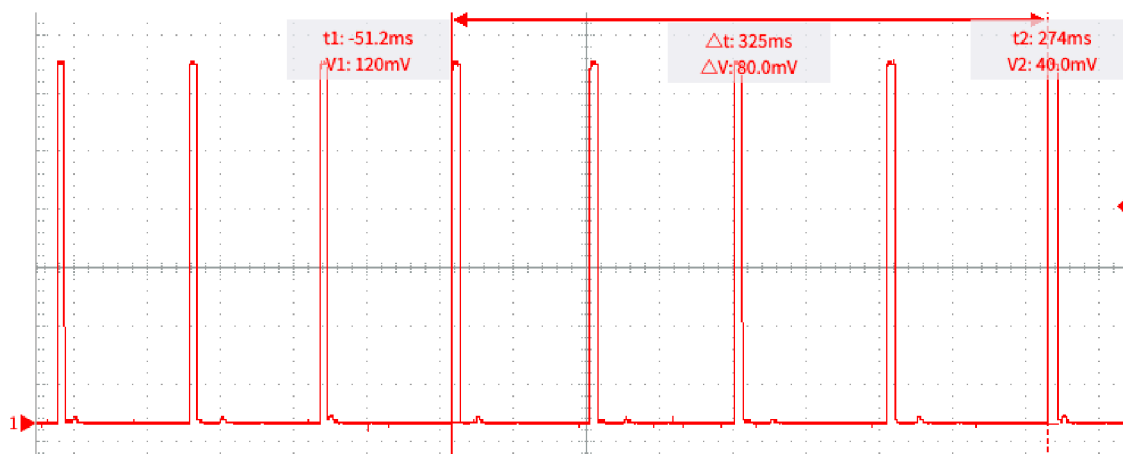
$$v_s = \frac{2 \cdot z \cdot n}{60} = \frac{2 \cdot 0,01 \cdot 1900}{60} = 0,633 \text{ ms}^{-1}$$

5 Výsledky a diskuse

5.1 Vlastní měření otáček

Vlastní měření probíhalo v prostorách TF ČZU v kanceláři automatizace. Principem bylo využití indukčního přibližovacího čidla namířeného na setrvačnick, ve kterém byly snímanými prvky zátěžové matice se šroubem. K tomuto čidlu byl připojený osciloskop, který sbíral data jednotlivých měření a ukládal je ve formátu tabulek CSV a obrázků PNG. Z těchto CSV souborů jsem vytvořil grafy odpovídající obrázkům PNG, ze kterých jsem odečítal čas otáčky t [ms]. Protože setrvačnick obsahoval 4 matice se zašroubovaným šroubem, bylo nutné odečítat čas mezi náběžnou hranou prvního a pátého obrazu viz obrázek 20.

Obrázek 20 - Měření času otáček t [ms]

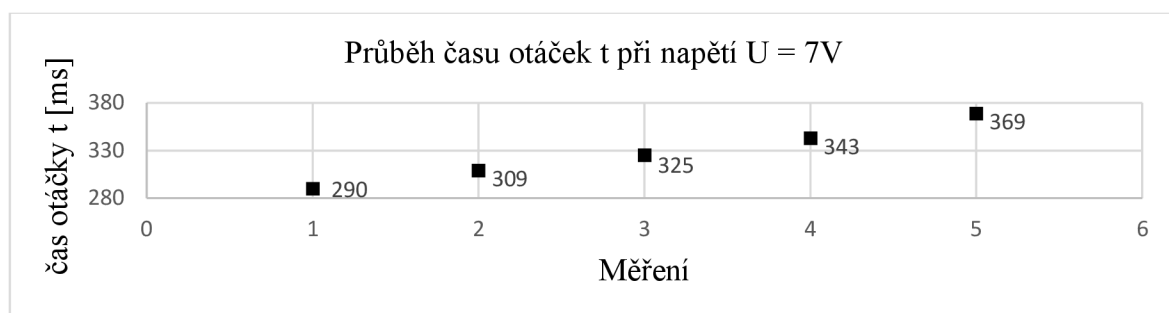


Měření proběhlo při šesti různých napětí U [V]. Pro každé U_i se měřil čas t_i [ms], za který se setrvačnick otočil o jednu celou otáčku. Pro každé napětí U_i bylo odečteno minimálně 5 časů t [ms].

Přepoččet času na otáčky v tabulkách pod grafy je podle vztahu 20:

$$n = \frac{60}{t} [\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}] (20)$$

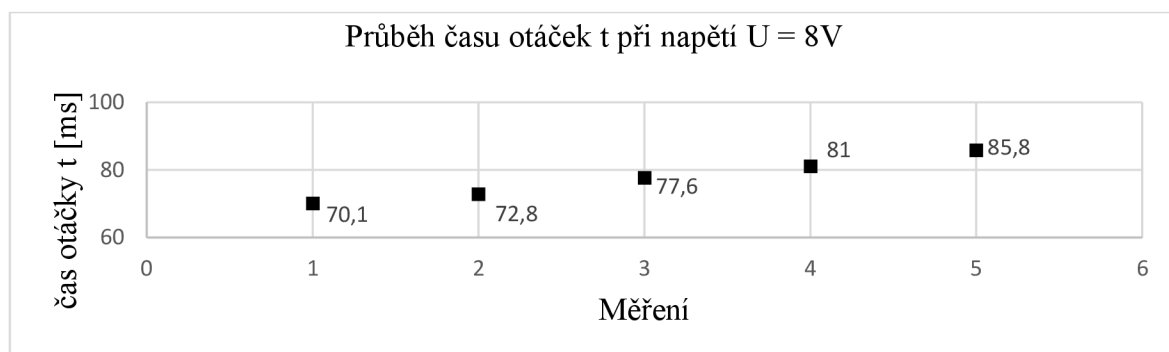
Obrázek 21 - Graf pro $U = 7V$



Tabulka 3 - Závislost otáček za minutu na čase při napětí $7V$

t [ms]	290	309	325	343	369
n [ot·min ⁻¹]	206,9	194,2	184,6	174,9	162,6

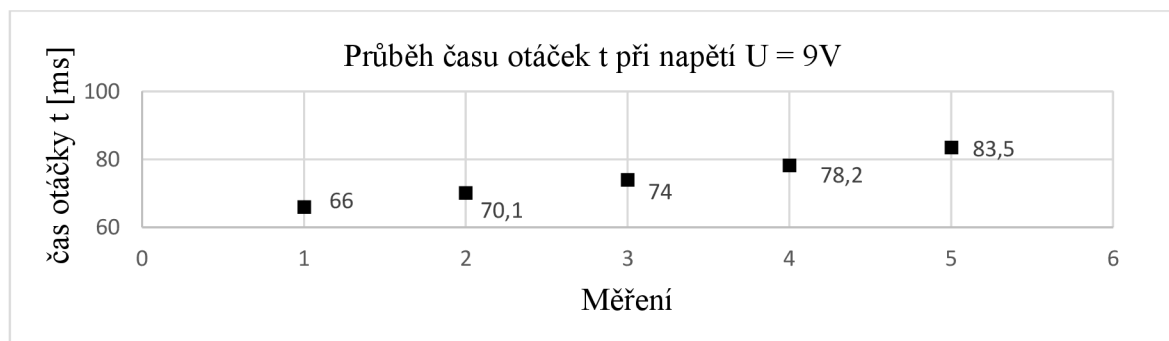
Obrázek 22 - Graf pro $U = 8V$



Tabulka 4 - Závislost otáček za minutu na čase při napětí $8V$

t [ms]	70,1	72,8	77,6	81	85,8
n [ot·min ⁻¹]	855,9	824,2	773,2	740,7	699,3

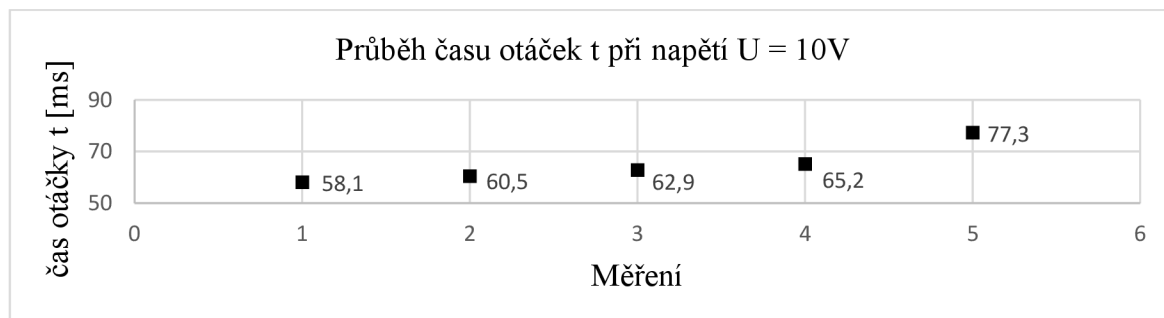
Obrázek 23 - Graf pro $U = 9V$



Tabulka 5 - Závislost otáček za minutu na čase při napětí 9V

t [ms]	66	70,1	74	78,2	83,5
n [ot·min ⁻¹]	909,1	855,9	810,8	767,3	718,6

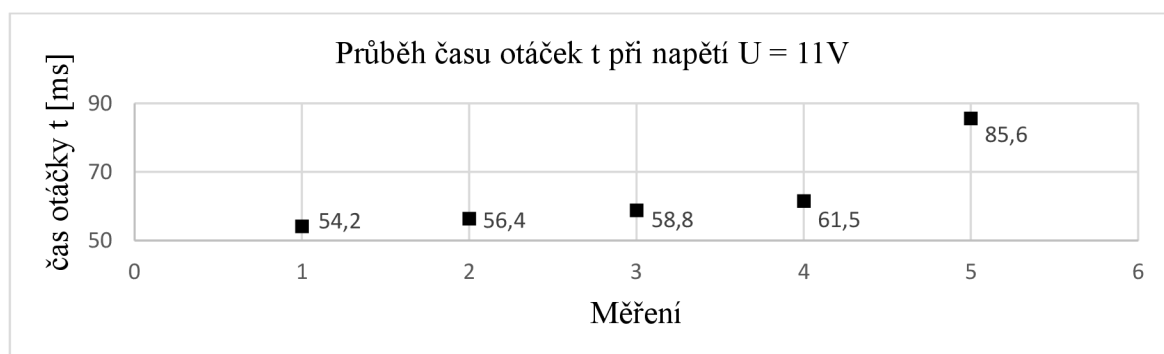
Obrázek 24 - Graf pro U = 10V



Tabulka 6 - Závislost otáček za minutu na čase při napětí 10V

t [ms]	58,1	60,5	62,9	65,2	77,3
n [ot·min ⁻¹]	1032,7	991,7	953,9	920,2	776,2

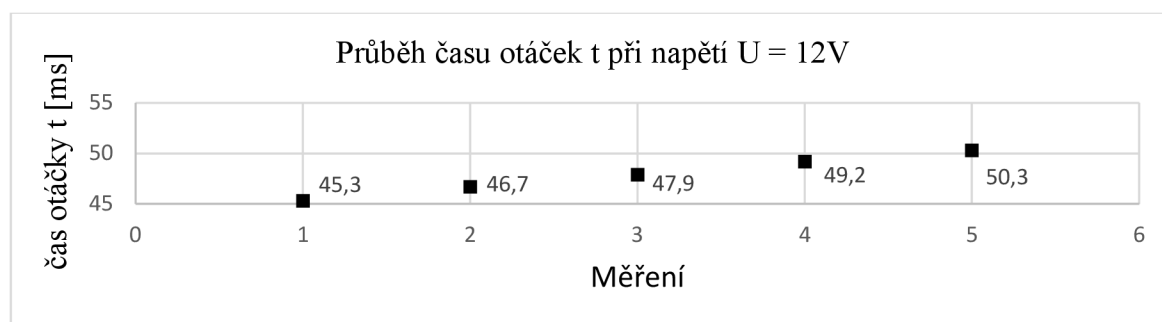
Obrázek 25 - Graf pro U = 11V



Tabulka 7 - Závislost otáček za minutu na čase při napětí 11V

t [ms]	54,2	56,4	58,8	61,5	85,6
n [ot·min ⁻¹]	1107	1063,8	1020,4	975,6	700,9

Obrázek 26 - Graf pro $U = 12V$



Tabulka 8 - Závislost otáček za minutu na čase při napětí 12V

t [ms]	45,3	46,7	47,9	49,2	50,3
n [ot·min ⁻¹]	1324,5	1284,8	1252,6	1219,5	1192,8

5.1.1 Vyhodnocení měření

Z měření je poznat, že se se zvyšujícím napětím přivedeným do elektromagnetů zvyšuje síla, kterou působí magnetické pole na plunžrové jádro. Se zvětšující se silou se zkracuje čas, který je potřeba k vykonání jedné otáčky, a tím otáčky rostou. Je tedy potvrzena úvaha z kapitoly 3.4.2.4, která tvrdí, že se vzrůstajícím množstvím proudu I [A], které je přímo úměrné velikosti napětí U [V] při neměnném odporu R [Ω], roste zrychlení a [$m \cdot s^{-2}$] v úvratích.

Dále bylo experimentálně zjištěno, že stabilita otáček roste se zvyšujícím se přivedeným napětím U [V]. Nepodařilo se však docílit stavu, který by dovolil neklesající průběh otáček. Důvodem byly zřejmě třecí síly v ložiskách, třecí síly na rozhraní ojnic a ocelových kolíků a mírné házení klikové hřídele. Dalším důvodem bylo zmenšení magnetické síly na plunžr v situacích, kdy byl mimo solenoid. Z rovnice 21 dle Maxwella (22) je vidět, že s lineárně zvyšující se vzdáleností plunžru x [m] exponenciálně klesá magnetická síla F [N] působící na tento plunžr. Z těchto důvodů se nepodařilo dosáhnout teoretické maximální hodnoty $n = 1900$ ot·min⁻¹.

$$F = \frac{F_m^2 \cdot \mu_0 \cdot S}{2x^2} \quad (21)$$

V neposlední řadě byla zjištěna skutečnost, že filament 3D tisku není vhodným materiálem pro konstrukci klikové hřídele, jelikož její používání velmi rychle materiál opotřebovává. Motor má tedy tendenci se po pár sekundách chodu zaseknout. V mém případě je to konkrétně spojení ramen klikové hřídele s ojnicními čepy tvořenými ocelovými kolíky. Při posunu ramena se buď posunula vačka, která začala narážet do vedlejšího koncového spínače, nebo se posunulo rameno a zaseklo se o ojnicu, nebo se změnilo časování vaček. Všechny tyto nedostatky lze

krátkodobě vyřešit zastavením přívodu napětí a posunutím ramen klikové hřídele zpět na své místo. Na druhou stranu čím větší počet posunutí ramen nastane, tím hůře ramena na ojnicích čepech drží. Tato problematika je viditelná na obrázcích 24 a 25, kde má poslední čas otáčky velkou odchylku a celkové otáčky prudce klesají viz tabulky 6 a 7.

5.2 Alternativní řešení a ekonomické zhodnocení

5.2.1 Ekonomické zhodnocení vyrobené varianty

Pokud by došlo k rozhodnutí založit firmu pro výrobu těchto motorů:

Tabulka 9 - SWOT analýza produktu

SWOT ANALÝZA vyrobené varianty – plochý, 4 elektromagnety			
Silné stránky	Nový produkt na trhu	Příležitosti	Velké množství potenciálních odběratelů
	Nulová konkurence		Vysoký možný zisk
Slabé stránky	Špatná stabilita otáček	Ohrožení	Růst cen materiálu
	Nízká životnost spínačů		Nejistota poptávky

3D tisk PETG filament při nemožnosti použití zdarma – 150 g – 90 Kč

Kupované součástky (spínače, elektromagnety, dráty, zdroj, kolíky, matice) – 970 Kč

Energie při 1kW·h = 5,93 Kč – tisk, pájení – 11,86 Kč

Celkové náklady na výrobu jednoho motoru = 1071,86 Kč

5.2.2 Použité materiály a způsob výroby

Nákup materiálů pro kovovýrobu by byl podstatně nákladnější než využití 3D tisku. U mé varianty plynulo rozhodnutí pro 3D tisk právě z tohoto důvodu. Navíc mi byl materiál dostupný zdarma u mě v zaměstnání. Další nevýhodou je možná nepřesnost výroby a velké toleranční pole. 3D tisk totiž dokáže tisknout výrobky s přesností na 0,1 mm.

Výhodou kovovýroby by byla dozajista větší pevnost spojů a mnohem vyšší odolnost vůči opotřebením. Potřebné materiály a nástroje k výrobě jednotlivých součástí jsou v tabulce 9:

Tabulka 10 - Materiály a nástroje ke kovovýrobě

	Polotovar	Nástroj k výrobě
Ramena klikové hřídele	Ocel plochá 25x5	CNC frézka
Setrvačnick	Ocel plochá 25x5	CNC frézka
Ojnice	Ocelový plech 200x50x1	Pilka a vrtačka
Vačky	Ocel plochá 25x5	CNC frézka
Klec	Ocel plochá 50x5	CNC frézka

5.2.3 Řešení obvodu

Pro ploché řešení motoru, kdy se při každém záběru dvojice elektromagnetů kliková hřídel otočí o půl otáčky, by stačily pouze dvě vačky a dva koncové spínače. Při modifikaci časování, která by způsobila, že na každý záběr jednoho elektromagnetu se kliková hřídel otočí o čtvrt otáčky, jsou potřeba právě čtyři vačky a čtyři koncové spínače.

Výroba vlastních elektromagnetů by byla při dostupnosti soustruhu a vrtačky násobně levnější než si elektromagnety kupovat. Aby byla docílena stejná síla magnetického pole jako u JF 0630B, byl by potřeba:

- Tyčový polotovar z mosazi o poloměru r [mm]
- Měděný drát
- Šrouby, které by solenoid připevnilly ke konstrukci

Potřebné nástroje k výrobě:

- Soustruh k vytvoření plunžrových jader a obalu solenoidu
- Vrtačka k vyvrtání díry pro jádro solenoidu a vytvoření plunžru

Nevýhodou by byla nemožnost spočítat teoretické maximální otáčky, jelikož by nebyly známé parametry k určení síly magnetického pole F [N].

5.3 Praktické využití motoru

O praktickém využití tohoto typu motoru lze hovořit v situacích, kde je potřeba malý rozměr a nebylo by výhodné použít spalovací variantu. Typickým příkladem by mohla být elektrická autíčka na ovládání. Nízké těžiště plochého motoru by konstrukci vyhovovalo.

Dalším využitím by mohlo být na akademické půdě jakožto výuková pomůcka k pochopení práce klikového mechanismu a fungování solenoidů. Domnívám se, že střední a vysoké školy by tuto variantu ocenily.

Co se implementace větších rozměrů týče, účinnost solenoidových elektromotorů v jakémkoliv provedení je v porovnání s elektromotory větších velikostí a spalovacími motory velmi nízká. Největší snížení účinnosti tohoto typu motoru plyne z výše zmíněné rovnice 21 Maxwellova zákona o exponenciálně klesající magnetické přitažlivosti s lineárně se zvyšující vzdáleností magnetu. Další snížení je vlivem třecích sil v klikovém mechanismu.

6 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo vytvoření plochého solenoidového motoru o čtyřech elektromagnetech řízeného koncovými spínači a vačkami. Na návrh a modelaci klikové hřídele, klece, vaček a ojnic s jejich součástmi byl použit program Auto CAD Inventor. Z tohoto programu byly modely posílány ve formátu .dwg do Slicer aplikace, ve které byly připraveny 3D modely k tisku a následné konstrukci.

Již při konstrukci vyšlo najevo, že materiál PETG není určen k výrobě všech součástí klikové hřídele. Příkladem jsou původně vytisknuté kolíky do uložení, které se po nalisování ložisek zakřivilo o 5-10° a byly ve výsledku nepoužitelné. Proto bylo nutné kolíky ve variantě z oceli tažené za studena. Další konstrukční překážkou byla velikost modelu. Tolerance, které musely být splněny při nalisování, byly příliš malé, a proto nastala spousta oprav, která mohla mít neblahé následky na životnost klikové hřídele. Jedním z dopadů tohoto množství oprav může být i příliš volné spojení mezi rameny klikové hřídele a ojnicními čepy, kvůli kterým má motor tendence se zasekávat.

Pro bezproblémové fungování motoru s nejlepším poměrem cena ku výkonu se přikláním k variantě, kdy klec motoru bude vyrobená 3D tiskem z důvodu nižších nákladů, ale kliková hřídel bude pouze z ocelových součástí pro delší životnost.

Vypočítané otáčky se nepodařily splnit, jelikož se v původním výpočtu nepočítalo s největšími užitečnostními propady solenoidového motoru, kterými je vzdálenost plunžru od magnetického pole a klikový mechanismus. Z původních 1900,5 ot·min⁻¹ byly tedy maximální dosažené otáčky 1324,5 ot·min⁻¹.

7 Seznam použitých zdrojů

1. What Is An Inline Engine: Types, Applications and Components. *godigit.com*. [Online] 30. Leden 2023. [Citace: 19. Březen 2023.] <https://www.godigit.com/motor-insurance/automobile/what-is-an-inline-engine>.
2. Ghayad, Ahmad. Flat engine vs Boxer: Here's the Difference – Engineerine. *engineerine.com*. [Online] 12. Leden 2023. [Citace: 19. Březen 2023.] <https://engineerine.com/flat-engine-is-not-boxer-heres/>.
3. What Is V Engine: Types Applications and Components. *godigit.com*. [Online] 30. Leden 2023. [Citace: 19. Březen 2023.] <https://www.godigit.com/motor-insurance/car-insurance/car-parts/what-is-v-engine>.
4. Udriš, Aleks. How Does The Radial Engine Works? | Boldmethod.com. *Boldmethod.com*. [Online] 21. Červenec 2015. [Citace: 19. Březen 2023.] <https://www.boldmethod.com/learn-to-fly/aircraft-systems/radial-engine/>.
5. Gscheidle, R. *Příručka pro automechanika*. Praha : Sabotáles, 2001. 80-85920-76-X.
6. Joseph E. Shigley, Charles R. Mischke a Richard G. Budynas. *Konstruování strojních součástí*. Brno : VUTIUM, 2010. 978-80-214-2629-0.
7. Sajdl, Jan. Setrvačnik - autolexicon.net. *autolexicon.net*. [Online] 2023. [Citace: 18. Březen 2023.] <https://www.autolexicon.net/cs/articles/setrvacnik/>.
8. Králová, Magda. Moment setrvačnosti | Eduportál Techmania. *edu.techmania.cz*. [Online] 2007. [Citace: 18. březem 2023.] <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/sila/moment-setrvacnosti>.
9. Den. Ojnice motoru: funkce a problémy. *club.autodoc.cz*. [Online] 9. Květen 2022. [Citace: 18. Březen 2023.] <https://club.autodoc.cz/magazin/ojnice-motoru-funkce-a-problemy>.
10. Eitel, Elisabeth. Motion design 101 : Mechanical cam types and operation | Machinedesign.com. *machinedesign.com*. [Online] 1. říjen 2000. [Citace: 18. březem 2023.] <https://www.machinedesign.com/motors-drives/article/21832356/motion-design-101-mechanical-cam-types-and-operation>.
11. 3D tisk: jak funguje, kde stáhnout předlohy a jak začít | Alza.cz. *alza.cz*. [Online] 1. Červen 2020. [Citace: 19. Březen 2023.]
12. PLA | Prusa Knowledge Base. *help.prusa3d.com*. [Online] 26. Září 2022. [Citace: 26. Březen 2023.] https://help.prusa3d.com/cs/article/pla_2062#_ga=2.169505764.479365477.1679837534-

278683862.1676733833&_gac=1.261809919.1679176282.CjwKCAiAmJGgBhAZEiwA1JZo
li6ab9na8zIdx4CZufqN8X-AHplGf9liYLoetg2P1RHDhTgt5r6GERoCwgQQA vD_BwE.

13. ASA | Prusa Knowledge Base. *help.prusa3d.com*. [Online] 5. Listopad 2022. [Citace: 26. Březen 2023.] https://help.prusa3d.com/cs/article/asa_1809.

14. PETG | Prusa Knowledge Base. *help.prusa3d.com*. [Online] 17. Duben 2022. [Citace: 26. Březen 2023.] https://help.prusa3d.com/cs/article/petg_2059.

15. What is a Limit Switch? | Omron Electronic Components Europe - A global leader in the field of automation. *components.omron.com*. [Online] 2023. [Citace: 18. Březen 2023.] https://components.omron.com/eu-en/products/switches/industrial-switches/limit-switch_features.

16. Základy elektrotechniky. *old.spsemoh.cz*. [Online] [Citace: 25. Březen 2023.] <http://old.spsemoh.cz/vyuka/zl/diody.htm#usm>.

17. 22.7 Magnetic Force on a Current-Carrying Conductor - College Physics: Openstax. *pressbooks.bccampus.ca*. [Online] [Citace: 18. Březen 2023.] https://pressbooks.bccampus.ca/collegephysics/chapter/magnetic-force-on-a-current-carrying-conductor/?fbclid=IwAR023TvpAIRzWJeYKLGiOiqDg2ZLS4rey4HAnbc7hXqea7_f_S89S05zbOA#import-auto-id1166991836288.

18. GSX-Roll. GSX-R 1100 klikový mechanismus. *gsxr.wz.cz*. [Online] [Citace: 23. únor 2023.] <http://www.gsxr.wz.cz/klika3.htm>.

19. Newton's Laws of Motion - Glenn Research Center | NASA. *www1.grc.nasa.gov*. [Online] 22. Říjen 2022. [Citace: 18. Březen 2023.] <https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/newtons-laws-of-motion/>.

20. bez povrchové úpravy - Spojovací-material.net. *spojovaci-material.net*. [Online] 2017. [Citace: 26. Březen 2023.] <http://www.spojovaci-material.net/sp/koliky-cepy-zavlacky-pera/koliky-valcove/din7a-nekaleny/ocel/bez-povrchove-upravy/>.

21. 6 - Příklad: Vykousnutý čtverec (FYZ - Pohyb tuhého tělesa). *youtube.com*. [Online] Isobalo, 10. Říjen 2018. [Citace: 18. Březen 2023.] https://www.youtube.com/watch?v=XNth_AxO08A&list=TLPQMjgwMzIwMjP0eP_-g9x7og&index=2.

22. Šimík, Vladimír. Přídržná síla magnetů díl I. - Aktuality/ zajímavosti - ABC Magnet. *abcmagnet.cz*. [Online] 2023. [Citace: 28. Březen 2023.] <https://www.abcmagnet.cz/cs/o-magnetech/aktuality-zajimavosti/pridrznna-sila-magnetu-dil-i>.

23. 1PC JF 0630B 14x19x30 14*19*30 DC 6V DC 12V DC 24V 300mA Suction 6N Stroke 10mm Push Pull Type Open Frame Solenoid Electromagnet|electromagnet 12v|electromagnet

solenoidemagnet 24v. *aliexpress.com*. [Online] 2022. [Citace: 2023. Březen 26.]
<https://www.aliexpress.com/item/32376476425.html>.

8 Přílohy:

- 1) Výkres ramena klikové hřídele
- 2) Výkres setrvačnicku
- 3) Výkres ojnice
- 4) Výkres Plastové vidlice
- 5) Výkres vačky
- 6) Výkres klece motoru
- 7) Výkres úchytu ložiska
- 8) Výkres válcového kolíku