



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav automobilů, spalovacích motorů
a kolejových vozidel

Návrh elektronického ovládání polohy škrtkí
klapky

Design of electronic throttle position control
system

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
2021

Vladan PIKL

Studijní program: B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
Studijní obor: 2301R000 Studijní program je bezoborový
Vedoucí práce: Ing. Vít Doleček, Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Píkl Jméno: Vladan Osobní číslo: 483982
Fakulta/ústav: Fakulta strojní
Zadávací katedra/ústav: Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel
Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství
Studijní obor: bez oboru

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh elektronického ovládání polohy škrtkové klapky

Název bakalářské práce anglicky:

Design of electronic throttle position control system

Pokyny pro vypracování:

- Navrhněte elektronické ovládání polohy škrtkové klapky pro vůz Formula Student plnící požadavky platných pravidel soutěže. Vypracujte rozvrh chybových scénářů s rozvahou jejich bezpečného řešení, které musí elektronické ovládání škrtkové klapky splnit.
- Zvolte vhodné senzory a akční členy a vytvořte schéma řídicího systému. Navrhněte mechanismus škrtkové klapky dle požadovaných dynamických vlastností nastavování polohy klapky.
- Navrhněte konstrukční řešení elektronicky ovládané škrtkové klapky s ohledem na dostupné technologie výroby v týmu CTU CarTech.

Seznam doporučené literatury:

Pravidla soutěže Formula SAE/Student

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Vít Doleček, Ph.D., ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS

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

Datum zadání bakalářské práce: 14.04.2021

Termín odevzdání bakalářské práce: 01.08.2021

Platnost zadání bakalářské práce: 19.09.2021

Ing. Vít Doleček, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Oldřich Vitek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta



Anotační záznam

Jméno autora: Vladan Píkl

Název práce: Návrh elektronického ovládání polohy škrtící klapky

Anglický název: Design of electronic throttle position control system

Rozsah práce:

- 43 stran
- 29 obrázků
- 2 tabulky
- 1 graf

Akademický rok: 2020/2021

Ústav: 12 120 Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel

Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Vít Doleček, Ph.D.

Klíčová slova: Elektronické ovládání škrtící klapky, elektronická škrtící klapka, škrtící klapka, ETC, ETB, Formula Student

Key words: Electronic throttle control, electronic throttle body, throttle body, ETC, ETB, Formula student



Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem elektronicky ovládané škrtkící klapky pro závodní vůz studentské soutěže Formula Student. V úvodní části je soutěž představena. V teoretické části jsou rozebrány základní části škrtkící klapky s přehledem v praxi používaných variant řešení s uvedením jejich výhod a nevýhod. V praktické části se zabývám návrhem konstrukce škrtkící klapky, převodového mechanismu a volbou používaných materiálů, pohonu, vhodných snímačů a výrobních technologií. Dále je celkový návrh ověřen pomocí matematického modelu.

Abstract

This work is about the design of an electronically controlled throttle for the race car of the Formula Student competition. In the introductory part, the competition is presented. In the theoretical part, the basic parts of the throttle are analyzed with an overview of the variants of the solution used in practice, with an indication of their advantages and disadvantages. The practical part is about the design of the throttle valve, transmission mechanism and the choice of used material, actuator, suitable sensors and production technologies. Furthermore, the overall design is verified using a mathematical model.



Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: “Návrh elektronického ovládání polohy škrtkící klapky” vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu zdrojů, jenž tvoří poslední kapitolu této práce.

V Praze dne: 1.8.2021

.....

(podpis autora)



Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Vítu Dolečkovi, Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky, odborné vedení, trpělivost a vstřícnost, které mi věnoval při zpracování této bakalářské práce. Děkuji své rodině a přátelům za psychickou podporu při tvoření práce, a děkuji týmu CTU CarTech za pomoc při návrhu a za možnost být jeho členem.



Obsah

1 Úvod.....	9
2 Škrťící klapka	10
2.1 Druhy škrťících klapek	10
2.1.1 Motýlková klapka.....	10
2.1.2 Šoupátková klapka.....	10
2.1.3 Válečková klapka.....	11
2.2 Způsob ovládnání škrťící klapky.....	12
2.2.1 Mechanické ovládnání.....	12
2.2.2 Elektronické ovládnání.....	12
3 Součásti elektronické škrťící klapky	14
3.1 Pohon	14
3.1.1 DC motor.....	14
3.1.2 DC Servo motor.....	14
3.2 Snímače polohy	14
3.2.1 Odporové snímače.....	15
3.2.2 Magnetostatické snímače.....	15
3.3 Převodový mechanismus.....	16
4 Pravidla soutěže.....	18
4.1 Chybové scénáře.....	18
4.1.1 Plynový pedál.....	18
4.1.2 Škrťící klapka	18
4.1.3 Kritické systémové signály (SCS).....	18
4.2 Řešení.....	18
4.2.1 Plynový pedál.....	18
4.2.2 Škrťící klapka	19
4.2.3 Kritické systémové signály (SCS).....	19
5 Návrh elektronické škrťící klapky.....	20
5.1 Schéma řídicího systému	20
5.2 Konstrukce škrťící klapky.....	21
5.3 Konstrukce plynového pedálu	22
5.4 Řídicí systém.....	24
5.5 Volba pohonu	25
5.6 Volba senzorů.....	26
5.6.1 APPS.....	26
5.6.2 TPS	27
5.7 Návrh převodového mechanismu.....	27
5.8 Návrh vratných pružin	29
6 Dynamický model škrťící klapky	31



6.1 Tvorba dynamického modelu	31
6.2 Simulace	32
7 Výroba.....	34
7.1 Těleso klapky a kryt převodovky	34
7.2 Škrťící element.....	36
7.3 Převodovka.....	36
7.4 Podložka a distanční víko	37
7.5 Spojovací příruba.....	37
7.6 Víko DC motoru	37
7.7 Plynový pedál	37
7.8 Sestavení škrťící klapky.....	38
8 Závěr	39
9 Použité zdroje	40
10 Seznam použitých obrázků	42
11 Seznam tabulek	43



1 Úvod

Formula Student je soutěž pořádaná pro studenty vysokých škol po celém světě. Umožňuje studentům si vyzkoušet vývoj, stavbu a testování soutěžního vozu vlastní konstrukce. Svůj vůz studenti každoročně prezentují na závodech v několika různých disciplínách. Cílem soutěže je nad rámecové vzdělávání budoucích absolventů.

Tým CTU CarTech působící na naší univerzitě se této soutěži účastní již třináctým rokem. Celkový vzhled a funkce vozu jsou dány pravidly, kterými se studenti při vývoji musí řídit. Od samotného počátku se na vozích týmu CTU CarTech používala mechanicky ovládaná škrťací klapka. Škrťací klapka od té doby prošla několika změnami. Na prvních vozích se používala klapka od firmy AT power, která vytváří motýlkové klapky přímo s restriktorem pro vozy Formula Student. Později byla nahrazena odlehčenou variantou motýlové klapky navržené členy týmu, která se používala až do vozu FS.08. Na voze FS.09 se poprvé objevila koncepce válečkové klapky. Kvůli nedostatkům původního návrhu došlo na voze FS.10 k úpravám tělesa a uložení válečkové klapky. Tato koncepce se osvědčila a zůstala beze změny až do vozu FS.12.

Úkolem mé práce je návrh a konstrukce elektronické škrťací klapky, zejména její mechanické části. Protože se jedná o kritickou část vozu, vztahují se na ni četná omezení pravidly, zejména z bezpečnostních důvodů.

Důvodem pro přechod na elektronicky ovládanou škrťací klapku jsou následující výhody.

- Možnost automatického vyrovnání otáček motoru a pohonného ústrojí při změně rychlostního stupně z vyššího na nižší.
- Možnost použití kontroly trakce.
- Linearizace průtoku vzduchu klapkou při použití škrťacích elementů typu válečku nebo šoupátka.



2 Škrtící klapka

Škrtící klapka je jednou ze základních součástí sacího systému u vznětových nebo zážehových motorů. Slouží k regulaci průtoku vzduchu do spalovacího prostoru motoru změnou průtočného průřezu sacího potrubí. Tím umožňuje plynulou změnu otáček, výkonu a krouticího momentu motoru v určitém rozsahu.

2.1 Druhy škrtících klapek

V soutěži Formula Student se nejčastěji setkáme se třemi druhy škrtících klapek, a to klapkou motýlkovou, šoupátkovou a válečkovou. [2]

2.1.1 Motýlková klapka

Motýlková klapka (Obr. 1) patří v praxi k nejrozšířenějšímu druhu klapek u spalovacích motorů. Konstrukčně je velmi jednoduchá. Tvoří ji kruhová deska spojena s otočnou osou, která je uložena příčně k sacímu potrubí. Další její velkou výhodou je lineární průběh průtoku vzduchu. Při plném otevření však dochází k velkým tlakovým ztrátám, protože vzduch nemůže proudit celým průřezem, ale musí obtékat škrtící element. [2, 3]



Obr. 1 - Motýlková škrtící klapka BOSCH [9]

2.1.2 Šoupátková klapka

Skládá se ze šoupátka ve tvaru desky, nejčastěji s otvorem (Obr. 2). Míra otevření se řídí vysouváním/zasouváním šoupátka do sacího potrubí. Běžně se lze setkat s jedním šoupátkem společným pro všechny válce, které jsou v jedné řadě. Tento druh klapky je rozšířen u závodních vozidel, protože jsou často provozovány při plném zatížení. U tohoto druhu klapky na rozdíl od motýlkové klapky při plném otevření není v potrubí



žádný škrtící element, který by způsoboval tlakové ztráty a umožňuje tak využití celého průřezu sacího potrubí. Nevýhodou jsou však přesnost výroby kvůli utěsnění šoupátka a poměrně větší zástavbové rozměry. Další nevýhodou je nelineární průběh průtoku vzduchu. [2, 3]



Obr. 2 - Šoupátková škrtící klapka Porsche 911 [18]

2.1.3 Válečková klapka

Tvoří ji váleček s příčným otvorem otočně uložený podobně jako osa motýlové klapky (Obr. 3). Obdobně jak u šoupátkové klapky, nedochází při plném otevření k přídavným tlakovým ztrátám. Nevýhodou je opět problém s utěsněním válečku, aby nedocházelo k přisávání vzduchu. Dále je problém s nelineárním průtokem vzduchu, oproti šoupátkové klapce má však menší zástavbové rozměry. Kvůli svým vlastnostem se využívá opět téměř výhradně u závodních vozů. [2, 3]



Obr. 3 - Válečková škrtící klapka [19]



2.2 Způsob ovládání škrtící klapky

Pro ovládání polohy škrtící klapky se v současnosti využívají zejména dva způsoby. Ovládání mechanické a elektronické.

2.2.1 Mechanické ovládání

Jeho funkce spočívá v mechanickém spojení akčního členu (plynového pedálu) s klapkou pomocí soustavy táhel nebo lanovodu (Obr. 4). Poloha klapky je tak pevně vázána na polohu plynového pedálu. Z toho důvodu má tento způsob ovládání rychlejší odezvu. Další výhodou je jednoduchost celé konstrukce. Nevýhodou může být zástavbový prostor pro lanové vedení nebo táhla. Tento typ ovládání se u moderních osobních automobilů objevuje již velmi zřídka. [4]



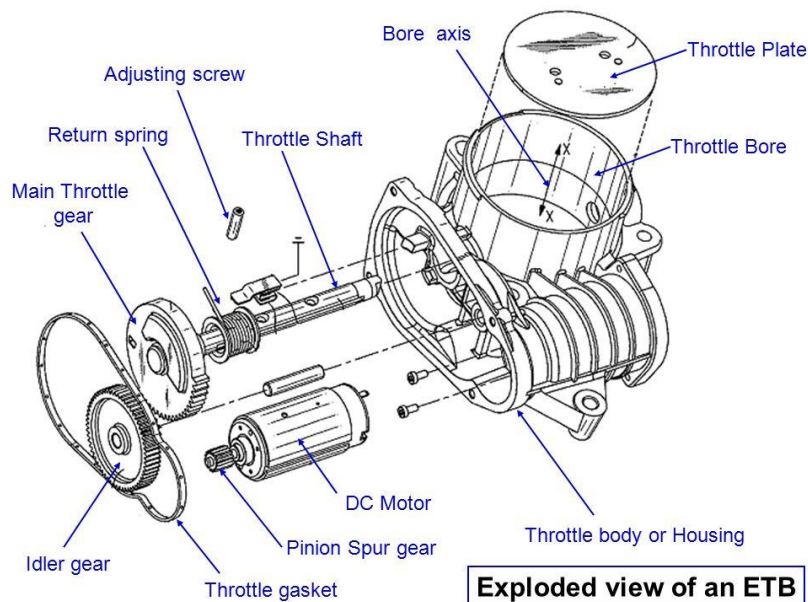
Obr. 4 - Mechanické ovládání škrtící klapky pomocí táhel (vlevo) a lanovodu (vpravo) [16]

2.2.2 Elektronické ovládání

Oproti mechanickému ovládání nevyužívá přímého spojení plynového pedálu s klapkou. Místo toho jsou oba členy propojeny elektronicky. Pomocí snímače polohy plynového pedálu se zjišťuje jeho poloha. Elektronický signál tuto informaci přivede do řídicí jednotky, která na základě řídicího softwaru vyhodnotí žádanou polohu škrtící klapky a vyšle signál k akčnímu členu klapky, nejčastěji DC motoru, který natočí klapku do požadované polohy. Protože je toto řízení nejčastěji zpětnovazební, využívá se dalšího snímače k měření polohy klapky. Informace o poloze klapky putuje ve formě elektrického signálu zpět do řídicí jednotky k dalšímu zhodnocení. Výhoda tohoto způsobu ovládání je právě v nepřímé závislosti polohy plynového pedálu na poloze škrtící klapky. Je tedy možné například během jízdy měnit jednoduše režimy fungování pro nižší spotřebu paliva nebo naopak pro rychlejší odezvu plynového pedálu. Dále



je možné naladit software tak, aby při změně rychlostního stupně z většího na nižší došlo automaticky k vyrovnání otáček motoru s otáčkami převodovky. Tím se zabrání rázovému namáhání hnací soustavy a sníží se riziko zablokování hnané nápravy. Jedno z možných řešení elektronické škrtící klapky je uvedeno níže (Obr. 5).[4]



Obr. 5 - Rozpad sestavy elektronicky ovládané škrtící klapky
[20]



3 Součásti elektronické škrtkící klapky

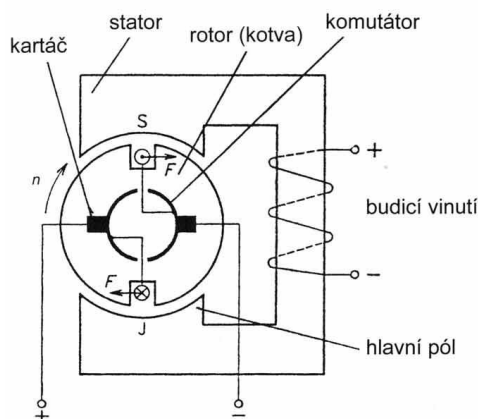
Kromě samotného škrtkícího elementu se nejčastěji celá sestava klapky skládá z následujících součástí.

3.1 Pohon

Jednou z hlavních součástí elektronicky ovládané klapky je poháněcí člen. Nejčastěji jím bývá stejnosměrný elektromotor (DC motor) a servomotor.

3.1.1 DC motor

DC motory slouží k přeměně elektrické energie v energii mechanickou. Základní konstrukce se skládá z rotoru, statoru, komutátoru a zdroje magnetického pole (Obr. 6). Na statoru (nepohyblivá část) jsou v párech naproti sobě rozmístěny opačně orientované póly, které jsou po obvodu pravidelně střídány. Rotor (rotující část) je opatřen vinutím s cívkami. Magnetické toky vinutí na statoru a rotoru na sebe navzájem silově působí a způsobují natáčení rotoru tak, že stejné póly se odpuzují a opačné přitahují, čímž vzniká točivý moment. Komutátor, který je spojen s vinutím rotoru, zajišťuje přepólování rotoru, a tím umožňuje plynulé otáčení. [5, 6]



Obr. 6 - Schéma DC motoru [6]

3.1.2 DC Servo motor

Servo motor pracuje na stejném principu jako DC motor. Na rozdíl od DC motoru umožňuje zpětnovazebně ovládat přímo natočení hřídele a nebývá využíván pro kontinuální přenos rotačního pohybu. Místo toho pracuje v určitém úhlovém rozsahu. [7]

3.2 Snímače polohy

Pro elektronické ovládání polohy škrtkící klapky je potřeba snímat přesnou polohu plynového pedálu a polohu natočení škrtkící klapky.



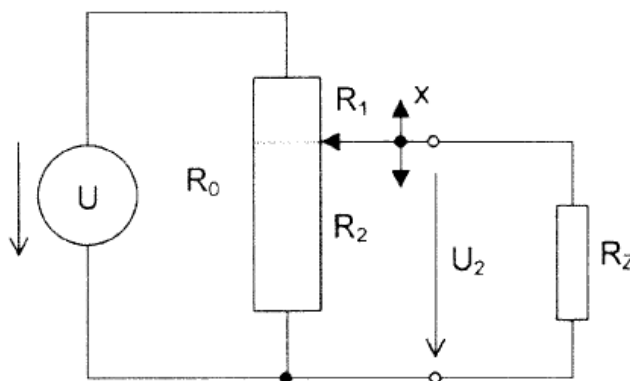
K měření polohy se využívá různých fyzikálních principů. Podle výstupního signálu je lze snímače polohy dělit následovně:

- Analogové – výstupní veličina (napětí, proud, odpor, indukčnost, kapacita apod.) je úměrná měřené poloze.
- Číslicové – výstupní veličina je vyjádřena číslem.
- Diskrétní – výstupní veličina se v závislosti na měřené hodnotě mění skokově a nabývá pouze dvou hodnot (logický výstup).

Protože pro aplikaci v elektronickém ovládní polohy škrtkící klapky se využívá zejména snímačů analogových, konkrétně odporových a magnetostatických, budou v následujících kapitolách blíže představeny. [8]

3.2.1 Odporové snímače

Tento typ snímačů patří mezi nejjednodušší analogové snímače polohy. Dle měřeného rozměru je lze dělit na snímače lineární (posuvné) a snímače úhlové (rotační). Fungují na principu změny elektrického odporu.



Obr. 7 - Elektrický obvod znázorňující funkci odporového snímače polohy [8]

Princip je vysvětlen na příkladu lineárního snímače (Obr. 7). Na obr.7 znázorňuje R_0 odpor potenciometru a R_z odpor vyhodnocovacího obvodu. Posouváním jezdc ve směru x dochází k dělení R_0 na R_1 a R_2 . Tím se mění i napětí na výstupu U_2 , které vyhodnocujeme. V případě úhlových snímačů má odporový drát kruhový nebo spirálový tvar v závislosti na měřeném úhlovém rozsahu.

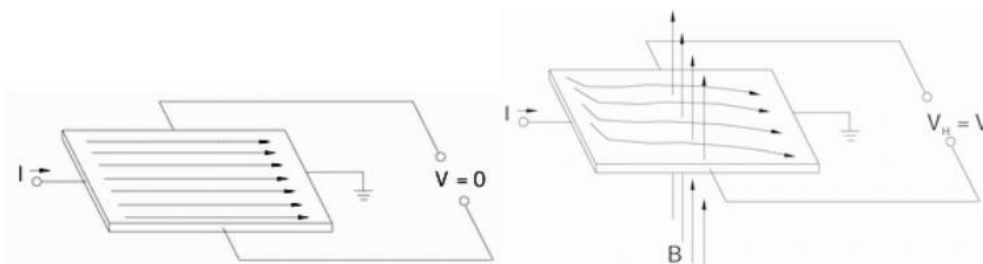
Výhoda těchto snímačů spočívá v jednoduchosti konstrukce a tím i jejich nízká cena. Nevýhodou je zvýšené mechanické opotřebení, které snižuje životnost. [8]

3.2.2 Magnetostatické snímače

Mezi tento typ senzorů patří v automobilovém průmyslu velmi rozšířené snímače využívající Hallova jevu (Obr. 8). Působí-li kolmo na polovodičovou destičku (Hallův

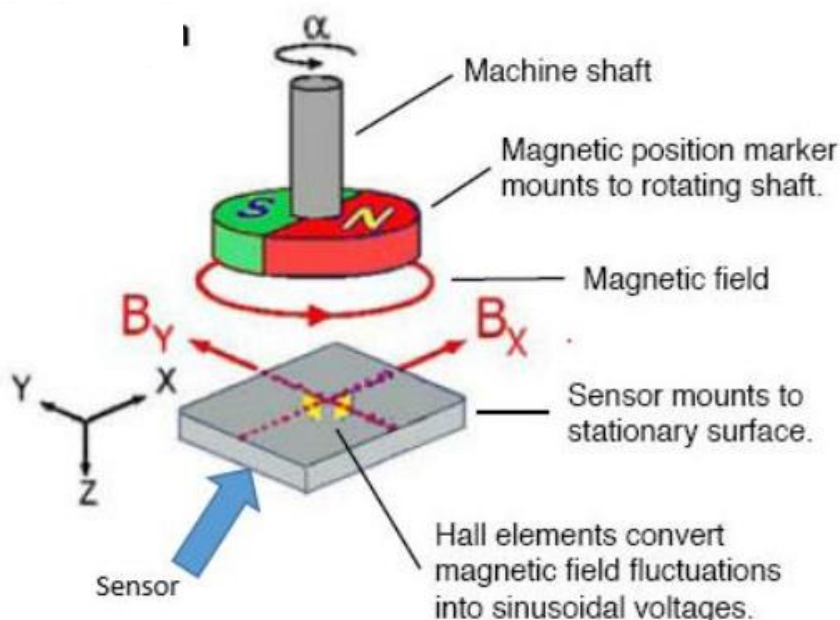


element), kterou prochází el. proud I , magnetické pole o indukci B , vychýlí směr toku proudu. Tím vzniká na bočních stranách elementu rozdíl napětí, kterému říkáme Hallovo napětí V_H . To je úměrné velikosti či kolmosti magnetického pole.



Obr. 8 Princip funkce Hallova jevu [11]

Hallova jevu lze využívat pro snímání posuvného i rotačního pohybu, polohy natočení (Obr. 9) nebo ke snímání otáček. [10, 11]

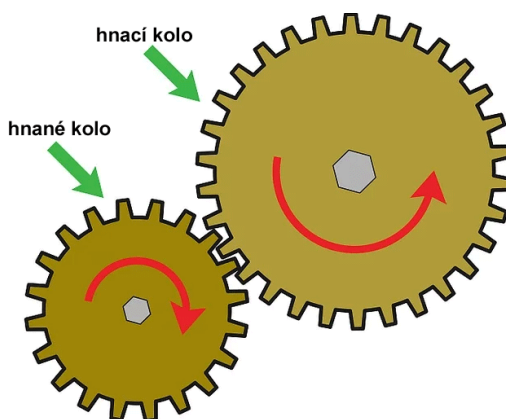


Obr. 9 - Princip funkce úhlového snímače využívajícího Hallova efektu [21]

3.3 Převodový mechanismus

Protože používané pohony většinou disponují vysokými otáčkami a nízkým krouticím momentem, je třeba mezi pohon a škrtkací klapku vložit převodový mechanismus.

Mezi nejběžnější řešení patří použití převodu s ozubenými koly (Obr. 10). Výhodou tohoto převodu je spolehlivost a přesnost chodu s minimální vůlí. Zároveň je to velmi kompaktní řešení s malým zástavbovým prostorem. Nevýhodou je nutná přesnost výroby vzhledem k zachování přesné vzájemné polohy ozubených kol.



Obr. 10 - Převodový mechanismus s ozubenými koly [17]

Dalším možným řešením převodu je kombinace pák a táhel. Toto řešení je vhodné v případě použití servomotoru umístěným na větší vzdálenost od škrtkové klapky. Další výhodou je jednoduchost a nízké náklady na výrobu. Hlavní nevýhodou je nízký převodový poměr.

Poslední uvažovanou variantou bylo použití převodu s ozubeným řemenem. Tato varianta kombinuje výhody předchozích dvou výše zmíněných metod. Je vhodná pro propojení dvou hřídelů na větší osovou vzdálenost. Zároveň nevyžaduje tak velkou přesnost výroby. Nevýhodou převodu je nižší dosažitelný převodový poměr v jednom stupni než u ozubených kol.



4 Pravidla soutěže

V této kapitole se budu věnovat pravidlům, které se bezprostředně týkají elektronické škrťací klapky.

Dle pravidel je možné užití škrťací klapky libovolné konstrukce ovládané buď mechanicky nebo elektronicky. V případě elektronicky ovládané škrťací klapky je nutné použití minimálně dvou snímačů polohy klapky a jednoho snímače polohy plynového pedálu.

Dále je v pravidlech uvedeno mnoho bodů týkajících se bezpečnosti systému. Kvůli přehlednosti jsem vypracoval chybové scénáře a jejich řešení dle pravidel. [1]

4.1 Chybové scénáře

4.1.1 Plynový pedál

- a) Porušení vratné pružiny plynového pedálu.
- b) Poškození senzorů nadměrným namáháním.
- c) Neshoda mezi signály snímačů polohy plynového pedálu.
- d) Zkrat mezi signály snímačů polohy plynového pedálu.

4.1.2 Škrťací klapka

- a) Ztráta napájení akčního členu škrťací klapky.
- b) Neshoda mezi signály snímačů polohy škrťací klapky.
- c) Neshoda očekávané polohy škrťací klapky se skutečnou polohou.

4.1.3 Kritické systémové signály (SCS)

- a) Jakákoliv závada.

4.2 Řešení

4.2.1 Plynový pedál

- a) Použití dvou nezávislých vratných pružin. Pružiny v senzorech nemohou být k tomuto účelu využity.
- b) Plynový pedál musí být opatřen dorazem, který brání zbytečnému namáhání nebo dokonce poškození senzorů.
- c) Pokud nastane mezi signály neshoda větší než 10% bodů pohybu pedálu a přetrvává po dobu delší než 100 ms, dojde k okamžitému vypnutí elektronické klapky.



d) Tento stav musí vyústit v neshodu signálů, řešení viz. c)

4.2.2 Škrtící klapka

- a) Použití vratné pružiny pro vrácení škrtící klapky do polohy při volnoběhu motoru $\pm 5\%$. Této polohy musí dosáhnout do 1 vteřiny. Pokud tomu tak není, musí dojít k okamžitému odpojení zapalování, vstřikování a palivového čerpadla. Tento stav setrvá do chvíle, než signály snímačů polohy škrtící klapky zaznamenají návrat do polohy při volnoběhu $\pm 5\%$ trvajících alespoň 1 vteřinu.
- b) Pokud nastane mezi signály neshoda větší než 10% bodů pohybu klapky a přetrvává po dobu delší než 100 ms, dojde k okamžitému odpojení elektronické klapky.
- c) Pokud se polohy liší o více než 10% a takovýto stav setrvává po dobu delší než 500 ms, dojde k okamžitému odpojení napájení klapky.

4.2.3 Kritické systémové signály (SCS)

- a) Musí nastat vypnutí elektroniky a zastavení motoru.



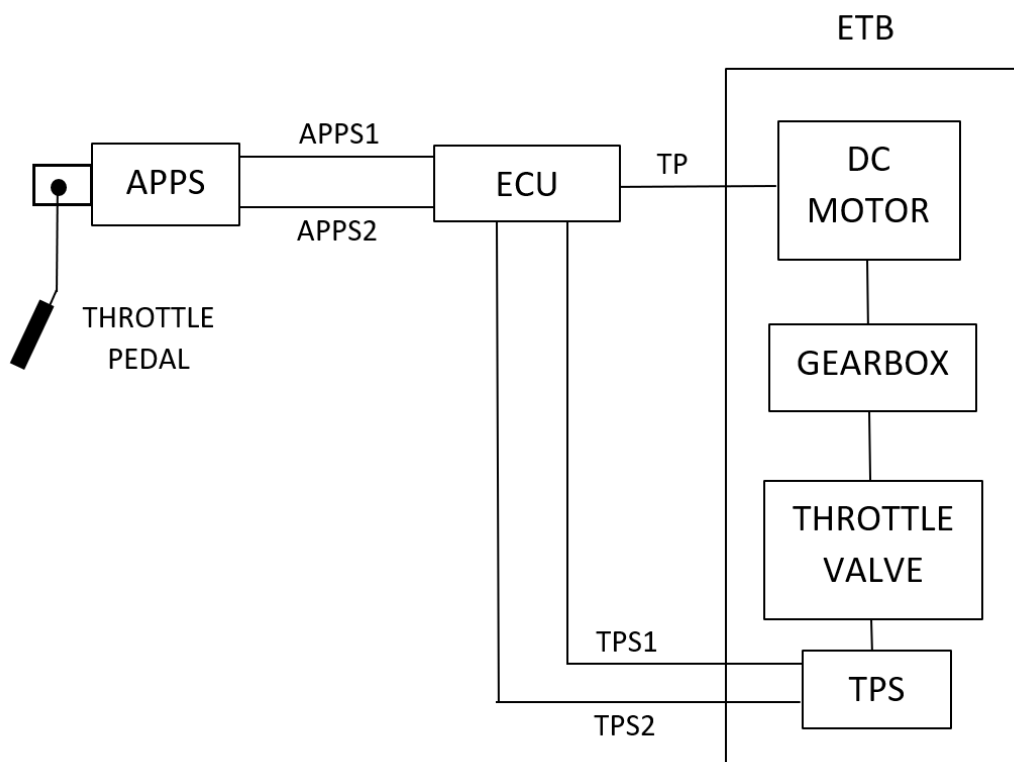
5 Návrh elektronické škrtící klapky

Při návrhu klapky jsem vycházel jednak z původní konstrukce použité na voze FS.12 a dále z škrtící klapky vyráběné firmou Bosch pro použití v motorsportu. Použití přímo škrtící klapky Bosch byla jedna z uvažovaných variant, ale z důvodu vysoké hmotnosti a nevhodných rozměrů jsem se rozhodl navrhnout škrtící klapku vlastní odpovídající následujícím návrhovým požadavkům.

- Splnění pravidel soutěže Formula Student
- Rychlá reakční doba
- Nízká hmotnost
- Zachování původní koncepce s válečkovou klapkou
- Snadná zaměnitelnost s původním mechanickým ovládním v případě poruchy

5.1 Schéma řídicího systému

Celý řídicí systém se skládá z několika hlavních částí uvedených na následujícím schématu (Obr. 11).



Obr. 11 - Schéma systému elektronického ovládní škrtící klapky

Řidič vyšle požadavek na otevření klapky do určité polohy sešlápnutím plynového pedálu. Tato informace je zpracována řídicí jednotkou, která vyšle signál elektromotoru. Ten se snaží klapku natočit do žádané polohy. Aktuální poloha je měřena a tato informace



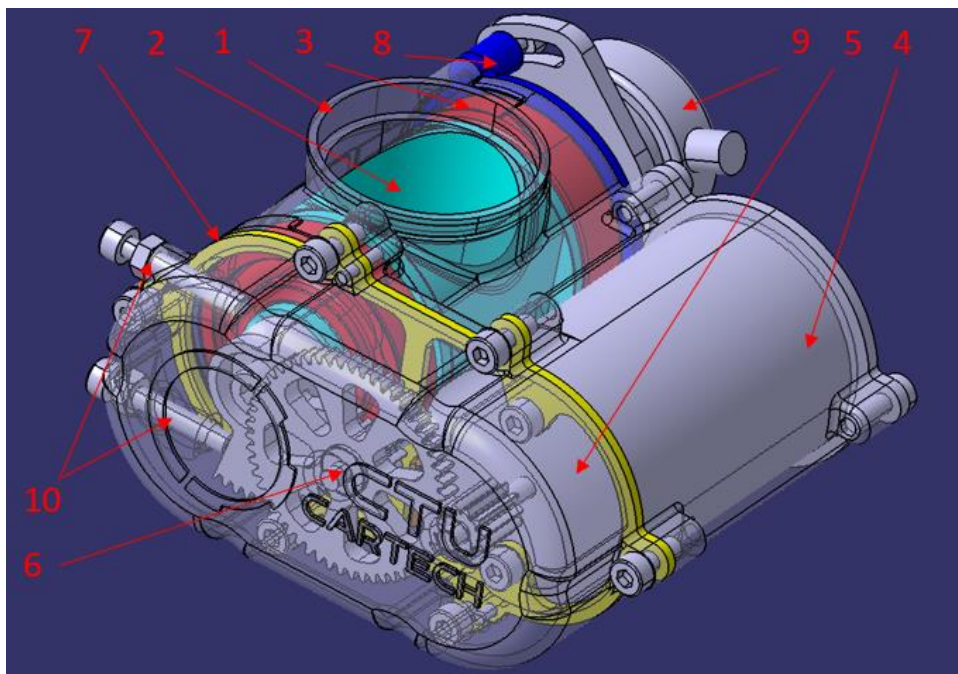
zpětnovazebně vysílána do řídicí jednotky, která rozhoduje, zda bylo žádané polohy dosaženo a případně provede úpravy ke splnění požadavku. Pro potřeby klapky pro vůz Formula Student jsou signály mezi snímači polohy plynového pedálu i škrtkící klapky zdvojeny.

5.2 Konstrukce škrtkící klapky

V této části je rozebráno konstrukční provedení škrtkící klapky (viz. Obr. 12).

Těleso klapky (1) je se zbytkem sacího traktu spojeno pomocí příruby. To umožňuje jeho snadnou výměnu a servisovatelnost.

V tělese jsou podélně uloženy válečková klapka (2) a DC motor (4). Otvoru ve válečku je kuželový a navazuje tak přímo na tvar sacího potrubí. Tím jsou zajištěny minimální tlakové ztráty při plném otevření klapky.



Obr. 12 - Model sestava elektronické škrtkící klapky

Váleček je v tělese uložen na dvou radiálních kuličkových polymerových ložiskách (3). Proti axiálnímu pohybu je ložisko na vnějším kroužku ze strany převodovky (6) opřeno o výstupky na tělese. Vnější kroužek druhého ložiska na straně TPS (9) je dotlačeno distančním víkem (8). Utěsnění a zároveň vymezení axiální vůle ložiska je zajištěno dvěma tenkými podložkami, které zakrývají prostor mezi vnějším a vnitřním kroužkem ložisek a jsou umístěny mezi ložisko a těleso na straně převodovky a mezi ložisko a distanční víko na straně TPS.

TPS je spojen s tělesem přes distanční víko pomocí dvou šroubů. Snímací část je nasunuta na váleček. Přenos otáčivého pohybu je zajištěn tvarovým zámkem (hřídel ve tvaru D).



Na druhém konci válečku je obdobně pomocí tvarového zámku ve tvaru 2-hranu nasunuto kolo druhého stupně převodovky. Jeho axiální poloha je zajištěna stažením pomocí šroubu přes podložku k válečku.

Z boku je k tělesu přiložena podložka (7), která složí k uchycení DC motoru pomocí dvou šroubů a zároveň k uložení předlohového hřídele. Přesná poloha této podložky je určena třemi vodícími kolíky.

Na tuto podložku je dále přiložen kryt převodovky (5). Jeho poloha je opět dána vodícími kolíky. Kryt je s tělesem spojen pomocí šesti šroubů a je dále opatřen dvojicí dorazových šroubů (10) pro nastavení krajních poloh klapky.

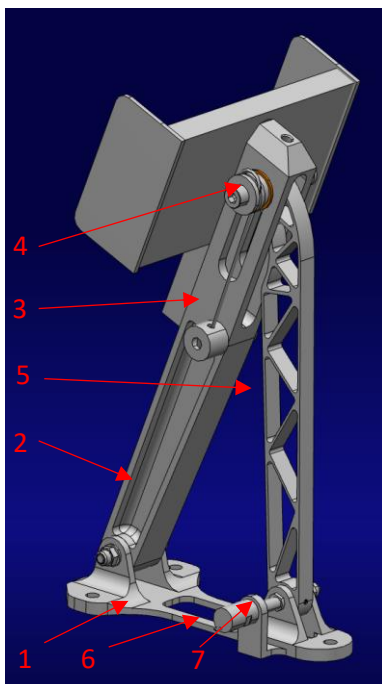
Spojení hnací hřídele DC motoru a válečku je zajištěno dvoustupňovou převodovkou s čelními koly s přímými zuby.

Kvůli splnění pravidel je klapka opatřena vratnou zkrutnou pružinou umístěnou mezi tělesem a TPS. Jeden volný konec je zasunutý do příčné díry ve válečku a druhý opřen o distanční víko.

Pro těleso i víko převodovky jsem volil materiál AISi10Mg vzhledem k tvarové složitosti součástí a z toho vyplívající technologii výroby viz. kapitola 7. Váleček je vyroben z plastického materiálu ertacetal C kvůli svým dobrým vlastnostem, mezi něž patří např. odolnost proti otěru, výborné kluzné vlastnosti a dobré mechanické vlastnosti. Podložka je volena z oceli S235JR. Materiál krytu DC motoru je volen PC blend. Ostatní vyráběné součást jsou vyrobeny z hliníku ENAW 7075.

5.3 Konstrukce plynového pedálu

Pro použití elektronické škrtecí klapky bylo třeba modifikovat i samotný plynový pedál. Hlavní změnou byla implementace snímače polohy plynového pedálu.



Obr. 13 - Model sestavy plynového pedálu

Jak je již z obrázku patrné, sestava plynového pedálu (Obr. 13) se skládá ze několika hlavních částí, pedálové platformy (1), plynového pedálu (2), plynového lanka (3), vodícího čepu (4) a kluzného vodícího členu (5). Tyto hlavní konstrukční části zůstávají totožné s původním řešením. Rozdílem je modifikovaná platforma s možností uchycení APPS (6). Další změnou je použití pohyblivého čepu (7) v přední části platformy, který je pevně spojen s kluzným vodícím členem a zajišťuje tak přenos pohybu mezi plynovým pedálem a APPS. Pevné spojení je řešeno pomocí stavěcího šroubu. Protože použití samotného stavěcího šroubu není z hlediska pravidel dostatečným zajištěním čepu proti axiálnímu posunutí, je čep z jedné strany opatřen osazením opírajícím se o platformu a z druhé strany opatřen závitem pro použití dvou matic dotažených proti sobě. Tím je spoj chráněn jednak proti uvolnění a zároveň je možné nastavit polohu matic tak, aby nedocházelo k přílišnému stlačení platformy a vzniku nadbytečných třecích odporů. Propojení tvarových konců čepu a APPS je řešeno použitím spojky s odpovídajícími tvarovou dírou. Vracení plynového pedálu do výchozí polohy zajišťují dvě vratné tažné pružiny umístěné po bocích plynového pedálu mezi vodícím čepem a spodní otočnou osou pedálu.

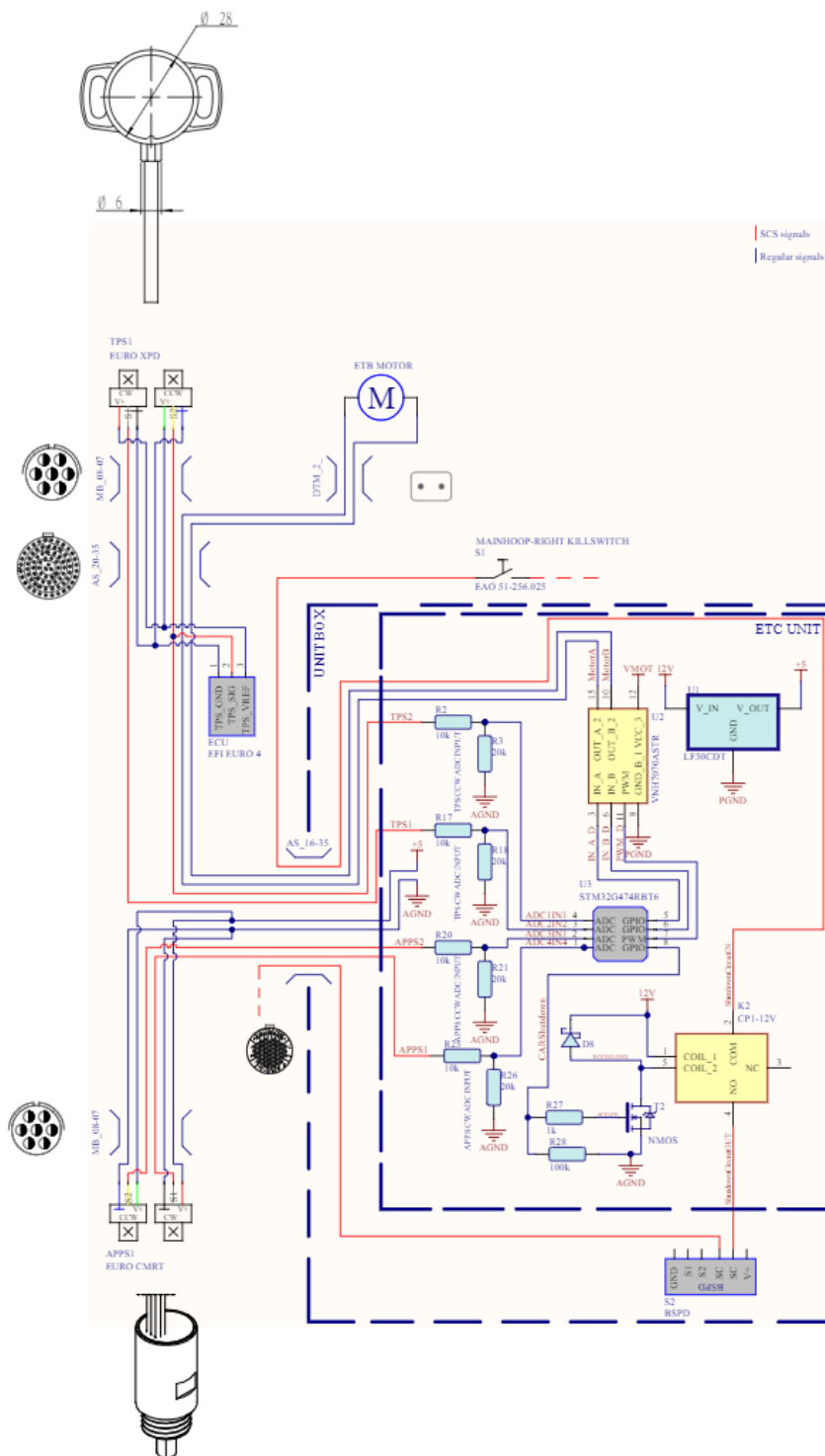
Pro pedál, pedálovou platformu i kluzný vodící člen je volen materiál hliník ENAW 7075 s následnou povrchovou úpravou tvrdým černým eloxem. Materiál pohyblivého čepu volím ocel S235JR. Spojka mezi čepem a APPS je vyrobena z hliníku ENAW 7075.



5.4 Řídicí systém

Ve své práci jsem se zabýval hlavně návrhem mechanické části. Tato část vznikla ve spolupráci s kolegy z elektronického oddělení týmu CTU CarTech.

Elektronický řídicí systém vozu FS.13 (Obr. 14) je řízen jednotkou navrženou na míru.



Obr. 14 - Schéma ETC systému



Zpracování signálu zajišťuje mikrokontroler STM32G484RET6, který přijímá informace o stavu motoru a hnacím ústrojí ze dvou připojených sběrnic, interpretuje signály ze snímačů TPS a APPS a kontroluje jejich věrohodnost. Motor ETB je pak poháněn ovladačem pro kartáčové DC motory VNH7070BAS s funkcí PWM. Tento čip je deaktivován, pokud je nalezena nepravděpodobnost. Jednotka také obsahuje relé NO pro spuštění vypínacího obvodu v případě, že se senzory nevrátí do věrohodného stavu.

5.5 Volba pohonu

Při výběru pohonu jsem vycházel z pohonu používaném v elektronické škrtecí klapce od firmy Bosch. Protože jsem neznal všechny faktory ovlivňující volbu elektromotoru, rozhodl jsem se použít motor s podobnými parametry (Tab. 1). Zvolen byl cenově velmi dostupný modelářský DC motor MIG 500 12V (Obr. 15) od firmy GPX Extreme.



Obr. 15 - DC motor MIG 500 12V



Napětí [V]	7,2 až 20
Jmenovité napětí [V]	12
Otáčky [ot/min]	11 500
Proud naprázdno [A]	0,6
Proud při max. účinnosti [A]	3,4
Jmenovitý krouticí moment [mNm]	46,9
Hmotnost [g]	168

Tab. 1 - Parametry voleného DC motoru MIG 500 12V [15]

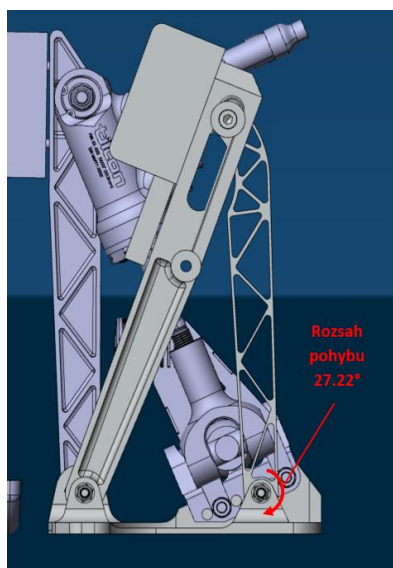
Volba DC motoru byla dále ověřena výpočetním modelem viz. kapitola 6.

5.6 Volba senzorů

Snímače polohy plynového pedálu i škrtkící klapky jsem volil od firmy Variohm Eurosensor dle doporučení kolegů z týmu CTU CarTech.

5.6.1 APPS

Pro snímání polohy plynového pedálu bylo třeba najít snímač malých rozměrů, odolný vůči vibracím a se zdvojeným výstupním signálem. Dalším důležitým parametrem pro volbu snímače bylo určení měřeného rozsahu (Obr. 17).



Obr. 17 - Rozsah pohybu snímané části



Obr. 16 - Zvolený snímač Euro – CMRT
Micro Rotary Sensor [23]

Proto jsem zvolil snímač řady Euro-CMRT - Micro Rotary Sensor (Obr. 16) splňující tyto požadavky.

5.6.2 TPS

Pro snímání polohy škrtkové klapky jsem se rozhodl zachovat doposud používaný a tím pádem ověřený snímač řady Euro XPD (Obr. 18).



Obr. 18 - Zvolený snímač Euro XPD [22]

5.7 Návrh převodového mechanismu

Pro spojení hřídele DC motoru a škrtkové klapky bylo potřeba navrhnout redukční převodovku kvůli zvýšení působícího točivého momentu a snížení otáček. Vzhledem k vysokému potřebnému převodovému poměru jsem převod rozdělil do dvou stupňů. Z důvodu zachování minimálních rozměrů jsem volil oba převodové stupně identické, tedy $i_{12}=i_{23}$. Potřebný celkový převodový poměr jsem volil $i_c=25$ a proto platí $i_{12}=i_{23}=5$. Dále jsem určil modul ozubení, který jsem volil opět tak, aby osová vzdálenost mezi DC motorem a škrtkovou klapkou byla co nejmenší. Pro obě soukolí jsem dle tabulek [12] zvolil normalizovanou hodnotu modulu $m=0,6 \text{ mm}$. S volbou modulu souvisela i volba počtu



zubů. Při návrhu počtu zubů pastorku jsem se inspiroval pastorky používanými v RC modelech využívajících pohonu obdobných parametrů jako v mém případě. Počet zubů pastorku jsem tedy volil $z_1=11$. Pro výpočet převodu jsem použil výpočetní software KISSsoft. Jako vstupní parametry jsem volil výše zmíněné převodové poměry, modul ozubení a maximální moment působící na každé ze soukolí. Na základě požadovaných osových vzdáleností mi byly programem doporučeny hodnoty korekcí ozubení a to tak, aby došlo ke zmenšení podřezání zubů na pastorku. Pro pevnostní kontrolu jsem volil výpočet statické soustavy s uvážením zvýšeného zatížení vlivem rázů, které budou vznikat při změnách směru otáčení. Dalším důležitým parametrem bylo určení materiálu ozubených kol. Zpočátku jsem zvažoval použití plastových ozubených kol, která mají nižší hmotnost a tím i nižší setrvačné účinky. To se však ukázalo jako nevyhovující řešení. Pro nastavené zatížení jsem nenalezl vhodný plastový materiál, a to i při změnách rozměrů jako je šířka ozubení apod. Další uvažovanou variantou bylo použití hliníkových ozubených kol. Protože hliník není příliš vhodným materiálem pro ozubené převody, uchýlil jsem se k použití oceli. Nevýhodou je sice zvýšená hmotnost, ale při rozměrech ozubení je rozdíl hmotností v řádu jednotek gramů. Výhodou je použití menších rozměrů ozubení a vyšší spolehlivost daná zvýšeným bezpečnostním koeficientem. Po provedení porovnávacích výpočtů pro různé oceli jsem se rozhodl použít ocel 42CrMo4 pro všechna ozubená kola. Pro snížení valivých odporů v ozubení bude použito plastické mazivo. Výsledné bezpečnostní koeficienty pro otažení a namáhání ohybem jsou uvedeny v následující tabulce (Tab. 2). Uvedeny jsou výsledky pro druhé soukolí, které je vzhledem k použití stejné šířky ozubení, avšak vyššímu zatížení, více namáhané. Proto při vyhovující bezpečnosti u druhého soukolí lze první soukolí považovat též za vyhovující. Navržený převodový mechanismus vyhovuje pevnostní kontrole a vychází s dostatečnou mírou bezpečnosti.

Modul	$m = 0,6 \text{ mm}$
Převodový poměr	$i = 5$
Úhel záběru	$\alpha = 20^\circ$
Počty zubů	$z_1 = 11, z_2 = 55$
Šířka kol	$b_1 = 3 \text{ mm}, b_2 = 4 \text{ mm}$
Korekční součinitele	$x_1 = 0,39 \text{ mm}, x_2 = -0,044 \text{ mm}$
Průměr roztečné kružnice	$d_1 = 8,254 \text{ mm}, d_2 = 34,133 \text{ mm}$
Osová vzdálenost	$A = 20 \text{ mm}$

Tab. 2 - Parametry ozubených kol



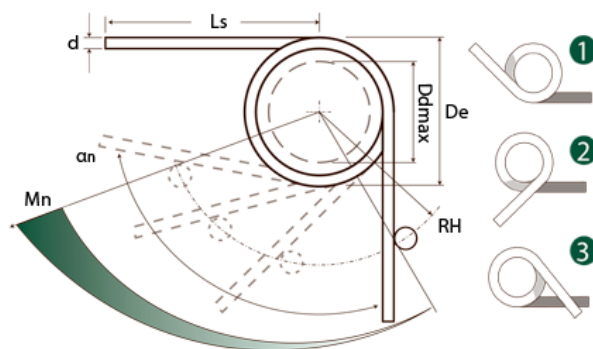
	Pastorek 2	Kolo 2
SF (ohyb)	2,018	2,100
SH (otlačení)	1,651	1,718

Tab. 3 - Výsledky kontrolního výpočtu

Pastorek prvního stupně je nasunut na volný konec hřídele DC motoru. Proti otáčení a axiálnímu posunutí je zajištěn stavěcím šroubem. Kolo prvního stupně je nasunuto na předlohový hřídel. Přenos krouticího momentu je zajištěn tvarovým zámkem a to tak, že díra na ozubeném kole má čtvercový tvar. Tomu odpovídá i tvar na předlohovém hřídeli. Kolo se z jedné strany opírá o osazení na hřídeli, z druhé o distanční trubku umístěnou mezi kolo a víko převodovky. Tím je zajištěna axiální poloha kola. Samotný předlohový hřídel je uložen kluzně v podložce a víku převodovky. Součástí předlohového hřídele je i pastorek druhého stupně. Kolo druhého stupně je nasazeno na váleček škrťací klapky. Přenos krouticího momentu je opět řešen tvarovým zámkem v podobě 2-hranu. Stažení kola k válečku pomocí šroubu přes podložku zajišťuje pevně danou polohu kola.

5.8 Návrh vratných pružin

Pro správnou funkci škrťací klapky a splnění pravidel jsem se rozhodl použít pro vracení klapky do výchozí polohy zkrutnou pružinu. Její polohu jsem zvolil mezi TPS a tělesem klapky a to tak, že jeden z volných konců je zasunut do příčné díry ve válečku klapky a druhý opřen o distanční nátrubky na distančním víku. Minimální hodnota krouticího momentu byla volena s ohledem na odpory v DC motoru znásobené poměrně vysokým převodovým poměrem. Protože však nedokážu odhadnout velikost třecích odporů v systému, je možné, že bude potřeba použít pružinu jiných parametrů. Předběžně jsem tedy volil pružinu firmy SODEMANN s následujícími parametry (obr. 19).



Materiál	Strunový drát
Materiál	Strunový drát
d - Průměr drátu (mm)	1,50
D_e - Vnější průměr (mm)	14,45
D_i - Vnitřní průměr (mm)	11,45
D_{dmax} - Max. trn (mm)	9,53
n - Elastické závity (Ks)	9,92
L_{s1} - Délka ramene (mm)	50,80
α_n - Max. Natočení (stupňů)	210,00
Poloha ramene	2
M_n - Max. krouticí moment (N mm)	444,00

Obr. 19 - Parametry volené vratné pružiny [14]

Plynový pedál je opatřen dvěma identickými tažnými pružinami. Rozhodujícím parametrem je délka pružiny, která musí vyhovovat pracovnímu rozsahu pedálu. Protože velikost vratné síly pružiny nemá na funkci tak velký význam, bude jejich tuhost volena dle řidičových požadavků až ve fázi testování.



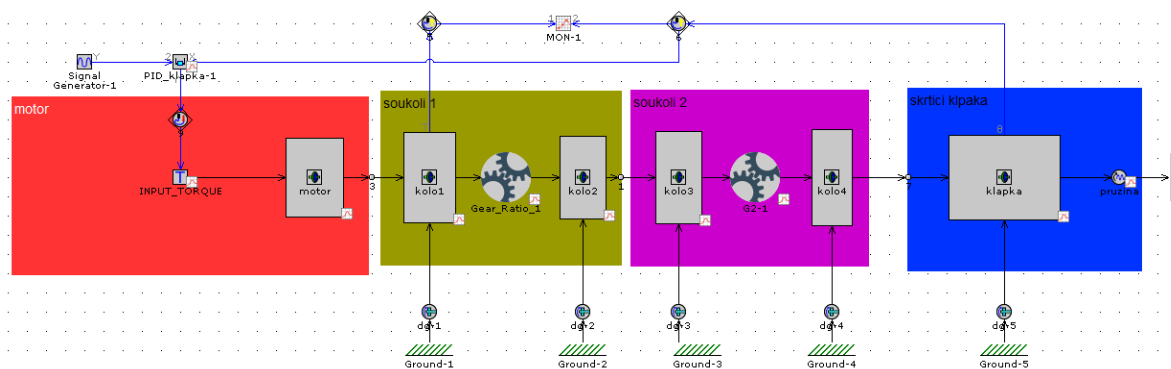
6 Dynamický model škrťící klapky

Pro ověření návrhu jsem vytvořil matematický model (obr. 20) v softwaru GT Suite v2018. Model se skládá z pěti hlavních částí a to motoru, prvního soukolí, druhého soukolí, škrťící klapky a z části reprezentující elektrický obvod.

6.1 Tvorba dynamického modelu

Žádanou hodnotu polohy škrťící klapky vytváří generátor signálu, ve kterém lze naprogramovat žádanou hodnotu v závislosti na čase. Lze tedy teoreticky simulovat určitou funkční sekvenci reprezentující reálnou situaci. Výstupní informace generovaného signálu dále postupuje do PID regulátoru, který reprezentuje zpětnovazební řízení polohy škrťící klapky. U regulátoru bylo třeba nastavit typ výstupního signálu a jeho limity. Protože výstupní signál slouží k ovládní DC motoru, je výstupním signálem požadovaná hodnota krouticího momentu. Limitní hodnoty krouticího momentu jsem nastavil jako maximální kladný i záporný krouticí moment ověřovaného DC motoru. Dále bylo třeba vyladit jednotlivé parametry regulátoru. Pro správnou funkci jsem určil vhodné hodnoty proporcionální a integrační složky. Derivační složka nebyla využita.

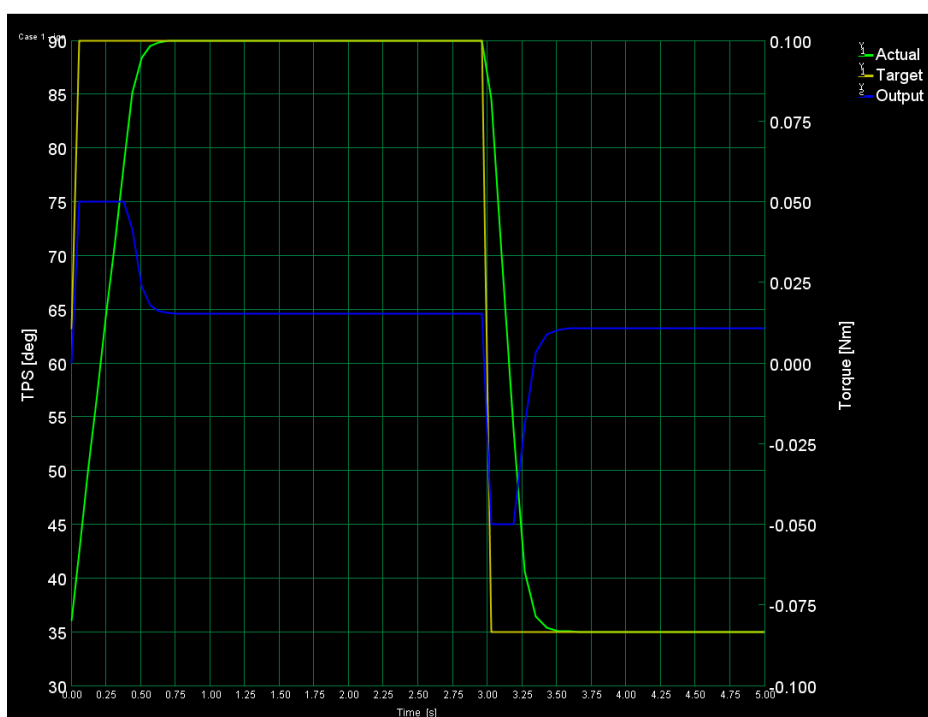
Část reprezentující DC motor se skládá z části aplikující krouticí moment a části zastupující setrvačnou hmotu. DC motor je mechanicky spojen s dalšími částmi reprezentujícími převodový mechanismus rozdělený do dvou stupňů. Každý z nich se skládá z dvou setrvačných hmot (ozubených kol) a velikosti převodového poměru. Poslední ozubené kolo převodového mechanismu je spojeno se škrťící klapkou. Ta je složena ze setrvačné hmoty (klapky) a vratné pružiny. Protože každá ze součástí klade v mechanismu určitý odpor vlivem tření, doplnil jsem jednotlivé součásti torzním tlumením. Přesnou hodnotu třecích odporů nedokážu určit zcela přesně. Proto jsou jejich hodnoty pouze odhadované a jejich volbu ověřit až porovnáním s reálným měřením. Propojením snímané hodnoty úhlového natočení škrťící klapky s PID regulátorem je uzavřen zpětnovazební okruh.



Obr. 20 - Matematický model elektronické škrťací klapky

6.2 Simulace

Pro ověření správné funkce škrťací klapky jsem vytvořil signál, na kterém je možné pozorovat přechodovou charakteristiku při otevírání i zavírání škrťací klapky mezi krajními pracovními polohami. Nejprve je tedy klapka otevřena na 30% (volnoběh motoru) a skokově je vyžádána hodnota plného otevření 100%. Po uplynutí tří sekund je skokově změněna žádaná hodnota zpět na volnoběžnou polohu 30%.



Obr. 21 - Přechodová charakteristika škrťací klapky

Výsledkem simulace je výše zobrazená přechodová charakteristika (obr. 21). Z dat je zřejmé, že k otevření klapky dojde za 0,6 s. K uzavření dojde za 0,4 s. Důvodem rychlejšího uzavření klapky je současné působení DC motoru a vratné pružiny, zatímco při otevírání působí pružina proti pohybu DC motoru.



Simulovaná reakční doba není nijak oslnivá vzhledem k tomu, že elektronické škrťací klapky od firmy Bosch specifikované pro použití v motorsportu dosahují reakční doby okolo 0,1 s. [13] Výsledek simulace může být ovlivněn chybným odhadem třecích odporů. Protože při porovnání výsledku simulace a jízdních dat z testování a závodů jsem zjistil, že k plnému otevření škrťací klapky z volnoběžné polohy došlo v nejrychlejším případě za 0,7 s, považuji výsledek za uspokojivý a volené parametry škrťací klapky za dostatečné.



7 Výroba

V této kapitole se věnuji popisu výroby jednotlivých částí škrtkící klapky. Protože klapka bude vyráběna maximálně ve dvou kusech, je tomu přizpůsobena volba technologií výroby.

7.1 Těleso klapky a kryt převodovky

Těleso klapky i kryt převodovky jsou díly tvarově složité. Pro výrobu polotovarů je výhodné použití aditivní technologie sintrování se zanecháním přídavek na obrábění funkčních ploch (obr. 22). Sintrování prováděla firma Garrett Motion, která náš tým podporuje již delší dobu.



Obr. 22 - Polotovary tělesa škrtkící klapky a krytu převodovky vyrobené sintrováním hliníku

Následné obrábění bylo provedeno z důvodů komplikovaného technologického postupu na 3-osé CNC frézce v halových laboratořích. K napsání programu jsem využil CAM software Autodesk Fusion 360.



Obr. 23 - Upnutí tělesa při obrábění na CNC frézce

Samotné obrábění tělesa se skládalo ze čtyř operací. Nejprve se obrobila boční dosedací plocha pro kryt převodovky včetně navrtání děr pro výrobu závitů a pro středící kolíčky. Upnutý díl před provedením první operace je zobrazen výše (obr. 23). Následně se díl otočil



a vyrobila se dosedací plocha pro distanční víko a kryt DC motoru. Současně s ní byly obrobena i díry pro DC motor, váleček a díry pro šrouby. V další operaci byl do tělesa nasunut váleček a následně zaaretován pomocí přípravku (obr. 24).



Obr. 24 - Přípravek zajišťující váleček proti pootočení během obrábění

Důvodem je výroba kuželové díry, která je vyráběna kvůli přesnosti současně jak v tělese, tak ve válečku. Dále byly obrobena příruby pro připojení k sacímu potrubí. Závity pro šrouby byly zhotoveny ručně použitím sady závitníků. Výsledek obrábění je zobrazen na obrázku níže (obr. 25).



Obr. 25 - Obrobené těleso škrťací klapky

Kryt převodovky byl zhotoven na jednu operaci, která zahrnovala obrobení dosedací plochy včetně děr pro spojovací šrouby a středící kolíky a dále obrobení díry pro uložení předlohového hřídele. Porovnání tištěného polotovaru a hotového obrobeného krytu převodovky je vidět zde (obr. 26).



Obr. 26 - Kryt převodovky před (vlevo) a po (vpravo) obrábění

7.2 Škrtící element

Hlavní kontura škrtícího válečku byla vyrobena soustružením na konvenčním soustruhu. Včetně závitové díry pro uchycení kola druhého stupně převodovky. Tvarové čepy pro kolo druhého stupně převodovky a pro TPS byly vyrobeny na konvenční 3-osé frézce. Sací otvor ve tvaru kuželové díry umístěný příčně k ose rotace byl zhotoven na 3-osé CNC frézce, jak již bylo zmíněno v předchozí části. Finální podoba válečkové klapky je zobrazena níže (obr. 27).



Obr. 27 - Váleček škrtící klapky po obrobení

7.3 Převodovka

Jednotlivá ozubená kola převodovky (obr. 28) byla nejprve vyrobena na konvenčním soustruhu s příдавky pro výrobu ozubení. Před zhotovením ozubení byla dále na stojanové vrtačce vyvrtána díra pro stavěcí šroub na pastorku prvního stupně. Ozubení bylo vyrobeno metodou elektroerozivního obrábění na drátové řezačce. Touto metodou byly vytvořeny i tvarové otvory v kole prvního i druhého stupně. Tvarový zámek na předlohovém hřídeli byl vyroben na konvenční 3-osé frézce. Povrch zubů není nutné nijak dále upravovat, protože elektroerozivním obráběním lze dosáhnout velmi přesných a hladkých povrchů. Zuby nejsou dále nijak tepelně zpracovány. Vzhledem k malému modulu ozubení není vhodné k zvýšení tvrdosti povrchu zubů použít povrchové kalení, protože by



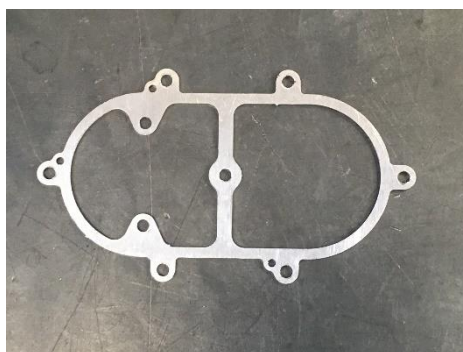
došlo k prokalení zubu v celém průřezu. To by mohlo mít za následek lom zubu při rázovém zatížení.



Obr. 28 - Kola převodového mechanismu

7.4 Podložka a distanční víko

Podložka (obr. 29) mezi tělesem a krytem převodovky i distanční víko jsou díly vyřezány laserovým paprskem na laserové řezačce u firmy Fit Eurasio. Otvory pro šrouby a kolíky jsou vrtány na stojanové vrtačce. Distanční válečky, kterými je podložena TPS jsou vyráběny soustružením.



Obr. 29 - Podložka vložená mezi těleso klapky a kryt převodovky

7.5 Spojovací příruba

Polotovar pro přírubu spojující těleso klapky se zbytkem sacího potrubí je nejprve vyřezán vodním paprskem. Následně je obrobena soustružením. Díry pro spojovací šrouby jsou vyrobeny na stojanové vrtačce.

7.6 Víko DC motoru

Víko DC motoru mělo být původně vyrobeno z plechu vyřezaného na laserové řezačce. Do něj měli být vyvrtány otvory pro vývod elektroniky. Protože by však bylo nutné značně ohýbat kontakty elektromotoru, byl původní návrh upraven pro použití víka tištěného z plastického materiálu PC blend na 3D tiskárně.

7.7 Plynový pedál

Na sestavě plynového pedálu došlo ke změnám na pedálové platformě. Ta byla vyrobena frézováním na CNC frézce. Čep přenášející rotační pohyb z plynového pedálu na APPS byl soustružen. Plochy pro nasazení stranového klíče pro dotažení, stejně jako tvarový konec



čepu, byly zhotoveny na 3-osé frézce. Spojka mezi čepem a APPS byla vyrobena soustružením. Její vnitřní otvor následně vyřezán elektroerozivním obráběním na drátové řezačce.

7.8 Sestavení škrtkící klapky

Nejprve se nasunou ložiska na váleček škrtkící klapky. Následně se váleček vloží do tělesa klapky. Nejprve se vloží tenká těsnící podložka, pak váleček s ložisky a další tenká těsnící podložka. Celá tato sestava je následně zajištěna proti vysunutí přišroubováním distančního víka. Po dotažení šroubů je třeba zkontrolovat, zda má klapka volný chod, avšak bez axiální vůle. Případně je třeba nahradit těsnící podložky za jiné s vyhovující tloušťkou. Dalším krokem je nasunutí středících kolíků do tělesa klapky a přiložit podložku k tělesu. Do tělesa je potom možné vložit DC motor a zajistit ho proti pootočení dvěma šrouby. Na hřídel DC motoru je nasunut pastorek prvního stupně a zajištěn stavěcím šroubem. Následně je do podložky uložena předlohová hřídel s nasazeným kolem prvního stupně. Na váleček se nasune kolo druhého stupně a zajistí šroubem a podložkou. V dalším kroku se k tělesu přiloží kryt převodovky. Je třeba dávat pozor na uložení předlohové hřídele v krytu převodovky, aby nebyla hřídel uložena šikmě. Kryt převodovky je s tělesem klapky spojen šesti šrouby. Po dotažení šroubů je třeba zkontrolovat volný a plynulý chod převodovky bez větších vůlí v uložení. Na druhou stranu tělesa je následně nasunut snímač úhlového natočení klapky. Mezi distanční trubky na distančním víku a příčnou dírou ve válečku se nasadí vratná pružina. Nakonec je třeba nastavit krajní polohy škrtkící klapky pomocí dvou dorazových šroubů. Sestavená škrtkící klapka je zobrazena níže (obr. 30).



Obr. 30 - Sestavená škrtkící klapka se sundaným víkem DC motoru



8 Závěr

Tato práce byla zaměřena na návrh elektronické škrtkící klapky pro vůz FS.13 týmu CTU CarTech účastníci se studentské soutěže Formula Student. V první části jsem se věnoval teoretickému rozboru jednotlivých součástí škrtkící klapky se zhodnocením různých variant řešení. Dále jsem uvedl platná pravidla soutěže týkající se návrhu elektronické škrtkící klapky.

V návrhové části jsem po zvážení požadavků na konstrukci popsal jednotlivé součásti škrtkící klapky a plynového pedálu s volbou materiálů. Následně jsem zvolil vyhovující DC motor pro pohon škrtkící klapky a vhodné senzory pro snímání polohy plynového pedálu a polohy škrtkící klapky. Dále jsem navrhl potřebné parametry vratné pružiny a převodový mechanismus pro redukci otáček a zvýšení přenášeného krouticího momentu z DC motoru na váleček škrtkící klapky. Pro ověření dimenzování a volbu materiálu jsem použil výpočetní software KISSsoft.

Pro ověření návrhu jsem pomocí softwaru GT suite 2018 vytvořil matematický model odpovídající reálné škrtkící klapce. Z výsledku simulace jsem zjistil čas potřebný k otočení škrtkícího elementu. K plnému otevření klapky z volnoběžné polohy dojde za 0,6 s, k uzavření za 0,4 s. Tato reakční doba není nijak oslnivá, ale při uvážení doposud nejrychlejší doby potřebné k otevření 0,7 s považuji navrhované parametry klapky za dostačující pro testovací fázi.

V poslední části své práce jsem se věnoval popisu výroby škrtkící klapky, přičemž byl brán ohled na týmu dostupné technologie výroby.

Na mou práci lze navázat při návrhu elektronické klapky druhé generace. Potenciál pro vylepšení návrhu vidím ve využití dynamického modelu pro návrh optimálních parametrů převodového mechanismu a pohonu. Pokud by stačil pohon menších rozměrů, snížily by se setrvačné síly a tím by se urychlil pohyb klapky. Další možností pro zrychlení funkce je použití nižšího převodového stupně. Konstrukčně by šlo klapku ještě zjednodušit, čímž by bylo možné snížit její hmotnost.



9 Použité zdroje

- [1] Formula student rules [online]. [cit. 2021-06-22]. Dostupné z:
https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2020/rules/FS-Rules_2020_V1.0.pdf
- [2] ČEPEK, Richard. Optimalizace tvaru sání motoru pro Formuli Student. Praha, 2018. Diplomová práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Ing. Vít Doleček, Ph.D.
- [3] JANTAČ, František. Návrh škrticí klapky zážehového motoru. Brno, 2016. Diplomová práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Ing. Martin Beran.
- [4] KŘÍŽ, Radim. Návrh sacího systému přepřínovaného motoru Formule Student. Brno, 2020. Diplomová práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Ing. Michal Janoušek, Ph.D.
- [5] UHLÍŘ, Ivan, Jaroslav NOVÁK, Jiří ŠTASTNÝ, Lukáš NOVÁK a Josef VLČEK. *Elektrické stroje a pohony*. 2. Praha: Nakladatelství ČVUT. ISBN 978-80-01-03730-0.
- [6] ROUBÍČEK, Ota. Princip stejnosměrných motorů [online]. 2008, 13. 8. 2008, , 1 [cit. 2021-7-30]. Dostupné z: <https://elektrika.cz/data/clanky/princip-stejnosmernych-motoru>
- [7] Servo Motor – Types and Working Principle. Electronics Hub [online]. 2015 [cit. 2021-7-30]. Dostupné z: <https://www.electronicshub.org/servo-motors/>
- [8] NOVÁK, Martin. Technická měření. V Praze: České vysoké učení technické, 2018. ISBN 978-80-01-06388-0.
- [9] Electronic throttle body Bosch Motorsport 82 mm. 4turbo [online]. [cit. 2021-8-1]. Dostupné z: <https://www.4turbo.pl/electrical-throttle-body-bosch-motorsport-82-mm,3,51312,35108>
- [10] Snímače v motorových vozidlech. VLČEK, Jiří. Jednoduchá elektronika. 2009, s. 16. ISBN 999-00-001-7423-2.
- [11] VOJÁČEK, Antonín. Magnetické senzory přiblížení - 2. díl. Automatizace hw [online]. 2018, , 1 [cit. 2021-7-30]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/magneticke-senzory-priblizeni-2-dil.html>
- [12] ŘASA, Jaroslav a Josef ŠVERCL. Strojnické tabulky pro školu a praxi. Praha: Scientia, 2004. ISBN 80-718-3312-6.
- [13] Electronic throttle valve. Bosch mobility solutions [online]. [cit. 2021-7-30]. Dostupné z: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/solutions/air-management/electronic-throttle-valve/>
- [14] Pružina T059-210-375L - technická data. Sodemann - pružiny [online]. [cit. 2021-8-1]. Dostupné z: <https://www.sodemann-pruziny.cz/t059-210-375l>



- [15] MIG 500 Turbo 12V Race. Pecka modelář [online]. [cit. 2021-7-31]. Dostupné z: <https://www.peckamodel.cz/133079-mig-500-turbo-12v-race>
- [16] C. ROBERTS, Charles. Vehicle accidents caused by defects Throttle Control System. Croberts.com [online]. [cit. 2021-8-1]. Dostupné z: <http://www.croberts.com/Throttle-control-system-defects.htm>
- [17] KRÁLOVÁ, Magda. Věda a technika v pozadí: Rozbij sklenici. Edu Techmania [online]. [cit. 2021-8-1]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/sites/default/files/podrobnosti/insert/322-3.gif>
- [18] Porsche slide valve throttle bodies. GrabCAD Comunity [online]. 2011 [cit. 2021-8-1]. Dostupné z: https://grabcad.com/library/porsche-slide-valve-throttle-bodies?fbclid=IwAR3BwozPh-XSqeZ2hrA_qIt4HrzesbSfe_5fBGG6GHLUIO7ODXR0CYhEKxQ
- [19] Cosworth Roller Barrel Throttle Parts - Ford Duratec HE 2.0L / 2.3L. Picclick [online]. Northampton [cit. 2021-8-1]. Dostupné z: <https://picclick.co.uk/Cosworth-Roller-Barrel-Throttle-Parts-Ford-Duratec-253503546127.html>
- [20] SUBRAMANI, Guru. Drive By Wire - Automotive Systems. Slideplayer [online]. [cit. 2021-8-1]. Dostupné z: <https://slideplayer.com/slide/10893249/>
- [21] How a rotary position sensor works. Electronics stackexchange [online]. 2016 [cit. 2021-8-1]. Dostupné z: <https://electronics.stackexchange.com/questions/249074/how-a-rotary-position-sensor-works>
- [22] Euro XPD. Variohm [online]. [cit. 2021-8-1]. Dostupné z: <https://www.variohm.com/products/motorsports-sensors/rotary-position-sensors-for-motorsport/euro-xpd-d-shaft>
- [23] Euro - CMRT - Micro Rotary Sensor. Variohm [online]. [cit. 2021-8-1]. Dostupné z: <https://www.variohm.com/products/position-sensors/non-contacting-rotary-position-sensors/euro-cmrt>



10 Seznam použitých obrázků

Obr. 1 - Motýlková škrtkící klapka BOSCH [9].....	10
Obr. 2 - Šoupátková škrtkící klapka Porsche 911 [18]	11
Obr. 3 - Válečková škrtkící klapka [19]	11
Obr. 4 - Mechanické ovládání škrtkící klapky pomocí táhel (vlevo) a lanovodu (vpravo) [16]	12
Obr. 5 - Rozpad sestavy elektronicky ovládané škrtkící klapky [20]	13
Obr. 6 - Schéma DC motoru [6]	14
Obr. 7 - Elektrický obvod znázorňující funkci odporového snímače polohy [8]	15
Obr. 8 Princip funkce Hallova jevu [11]	16
Obr. 9 - Princip funkce úhlového snímače využívajícího Hallova efektu [21]	16
Obr. 10 - Převodový mechanismus s ozubenými koly [17].....	17
Obr. 11 - Schéma systému elektronického ovládaní škrtkící klapky.....	20
Obr. 12 - Model sestava elektronické škrtkící klapky	21
Obr. 13 - Model sestavy plynového pedálu	23
Obr. 14 - Schéma ETC systému	24
Obr. 15 - DC motor MIG 500 12V	25
Obr. 16 - Zvolený snímač Euro – CMRT Micro Rotary Sensor [23]	27
Obr. 17 - Rozsah pohybu snímané části.....	27
Obr. 18 - Zvolený snímač Euro XPD [22]	27
Obr. 19 - Parametry volené vratné pružiny [14].....	30
Obr. 20 - Matematický model elektronické škrtkící klapky	32
Obr. 21 - Přechodová charakteristika škrtkící klapky	32
Obr. 22 - Polotovary tělesa škrtkící klapky a krytu převodovky vyrobené sintrováním hliníku	34
Obr. 23 - Upnutí tělesa při obrábění na CNC frézce	34
Obr. 24 - Přípravek zajišťující váleček proti pootočení během obrábění	35
Obr. 25 - Obrobené těleso škrtkící klapky	35
Obr. 26 - Kryt převodovky před (vlevo) a po (vpravo) obrábění.....	36
Obr. 27 - Váleček škrtkící klapky po obrobení	36
Obr. 28 - Kola převodového mechanismu	37
Obr. 29 - Podložka vložená mezi těleso klapky a kryt převodovky	37
Obr. 30 - Sestavená škrtkící klapka se sundaným víkem DC motoru.....	38



11 Seznam tabulek

Tab. 1 - Parametry voleného DC motoru MIG 500 12V [15].....	26
Tab. 2 - Parametry ozubených kol	28
Tab. 3 - Výsledky kontrolního výpočtu	29