



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky

**Návrh systému elektronické klapky pro
závodní vůz projektu Formula Student**

**Electronic throttle control system design for
a Formula Student race car**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
2019**

Tomáš ADAMEC

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



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Adamec** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **466507**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh systému elektronické klapky pro závodní vůz projektu Formula Student

Název bakalářské práce anglicky:

Electronic throttle control system design for Formula Student racing car

Pokyny pro vypracování:

1. Rešerše a stanovení technické specifikace systému
2. Návrh řídicího algoritmu a mechanismu elektronické klapky
3. Sestavení simulačního modelu navrženého mechanismu
4. Experimentální ověření navrženého algoritmu řízení
5. Kritické zhodnocení dosažených výsledků

Seznam doporučené literatury:

- Valášek, M. a kol.: Mechatronika, Vydavatelství ČVUT, Praha 1996
- Ellis, G.: Control System Design Guide, Elsevier, 2012, 4th Edition
- Anwar, S.: Fault Tolerant Drive by Wire Systems, Bentham Science Publishers, 2012
- Eriksson, L., Nielsen, L.: Modeling and Control of Engines and Drivelines, John Wiley & Sons, 2014

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

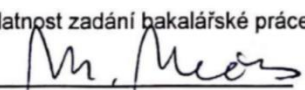
Ing. Martin Nečas, MSc., Ph.D., odbor mechaniky a mechatroniky FS

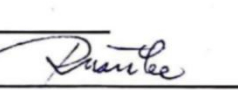
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

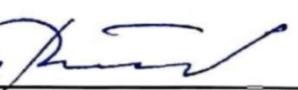
Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **16.08.2019**

Platnost zadání bakalářské práce:


Ing. Martin Nečas, MSc., Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

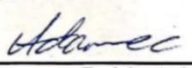

prof. Ing. Milan Růžička, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


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.

7.6.2019
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

ANOTAČNÝ LIST

Meno autora:	Tomáš Adamec
Názov BP:	Návrh systému elektronickej klapky pro závodní vůz projektu Formula Student
Anglický názov:	Electronic throttle control system design for a Formula Student race car
Akademický rok:	2018/2019
Študijný program:	B2342 Teoretický základ strojního inženýrství
Ústav:	12 105 Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky
Vedúci a konzultant BP:	Ing. Nečas Martin MSc., Ph.D.
Bibliografické údaje:	počet strán 32 počet obrázkov 15 počet tabuliek 2 počet grafov 5 počet príloh 1 CD
Kľúčové slová:	Elektronická klapka, ETC, Formula Student, CTU CarTech, Servo motor, Automobil
Keywords:	Electronic throttle, ETC, Formula Student, CTU CarTech, Servo motor, Race car
Anotácia:	Témou tejto práce je návrh systému elektronickej klapky pre pretekárske vozidlo projektu Formula Student. V práci sú definované technické požiadavky pre takýto systém a prínos pre formulové vozidlo v prípade jeho implementácie. Práca ďalej obsahuje zostavenie simulačného modelu mechanizmu, testovanie navrhnutého algoritmu a mechanizmu a výber senzorov a aktuátoru pre jeho realizáciu. V závere práce je zhodnotenie výsledkov a návrh niekoľkých ďalších krokov vývoja potrebných pre realizáciu systému.
Abstract:	The subject of this thesis is design of an electronic throttle control system for a Formula Student race car. Definition of technical parameters and benefits of implementation of this system. Development of a simulation model of the proposed mechanism, testing of the proposed mechanism and algorithm and choice of sensors and an actuator to be used in the system. In the end of this thesis I proposed a few steps of further development needed for realisation of this system.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že bakalársku prácu na tému „Návrh systému elektronické klapky pro závodní vůz projektu Formula Student“ som vypracoval samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov, uvedených v zozname použitej literatúry na konci práce.

V Prahe dňa

Tomáš Adamec

POĎAKOVANIE

Moja vďaka patrí celému tímu CTU CarTech vrátane bývalých členov za cenné rady, konštruktívne pripomienky a umožnenie praktického testovania návrhu. Ďakujem mojej rodine a blízkym za podporu pri štúdiu a trpezlivosť. V neposlednom rade ďakujem Ing. Martinovi Nečasovi MSc., Ph.D. za vedenie mojej bakalárskej práce.



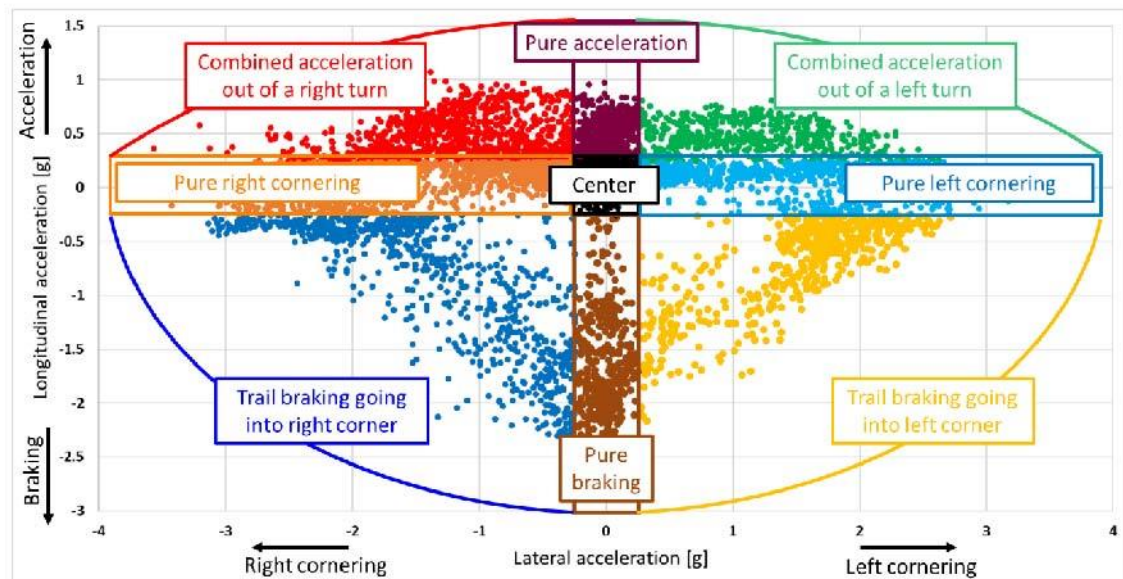
OBSAH

1. Úvod	7
1.1. Motivácia a ciele práce.....	7
1.2. Formula Student	8
1.3. CTU CarTech	8
2. Problematika elektronických škrtiacich klapiek	9
2.1. Elektronické klapky využívané vo Formula Student	11
2.2. Aktuálne využívaná klapka na monoposte FS.11	12
3. Technická špecifikácia	14
4. Návrh mechanizmu.....	15
4.1. Mechanizmus aktuátora a klapky	15
4.2. Pripojenie senzorov k plynovému pedálu.....	18
5. Algoritmus ovládania.....	18
5.1. Overovanie hodnovernosti senzorov	19
5.2. Bezpečnostné odpojenie napájania	21
6. Výber aktuátorov a senzorov	22
6.1. Výber senzorov	22
6.2. Výber aktuátoru	23
7. Experimentálna časť	24
7.1. Dynamické vlastnosti serva a mechanizmu	26
7.2. Bezpečnostný algoritmus	27
7.3. Testovanie spoľahlivosti.....	28
8. Zhodnotenie výsledkov.....	29

1. Úvod

1.1. Motivácia a ciele práce

Predpoklad úspechu pretekárskeho vozidla a dosahovanie najnižších časov, z hľadiska jeho konštrukcie spočíva najmä vo dvoch faktoroch. Prvým je najväčšia potenciálna plocha na tzv. „g-g“ diagrame (Obr. 1), ktorý predstavuje limity laterálneho a longitudinálneho zrýchlenia daného vozidla. Druhým faktorom, ktorého zlepšenie je hlavnou motiváciou pre vývoj systému elektronickej klapky, je zjednodušenie ovládania pre skúseného pilota, aby bol schopný sa k týmto limitom približovať vo všetkých jazdných stavoch vozidla. [1]



Obr. 1.: Príklad g-g diagramu od Optimim G [2]

Návrh spoľahlivého systému elektronickej škrtiacej klapky (ďalej ETC – electronic throttle control) bude základom pre ďalší vývoj systému a s ním spojených funkcií zlepšujúcich ovládateľnosť pretekárskeho monopostu, ktoré detailnejšie rozoberiem ďalej v tejto práci. Celý systém je navrhovaný pre pretekársky monopost navrhnutý tímom CTU CarTech pre účasť v súťaži Formula Student, a preto podlieha pravidlám tejto súťaže. Okrem pravidiel súťaže, musí byť systém prispôbený aj konceptu vozidla, na ktorom bude aplikovaný, a to hlavne zástavbovo a elektronicky.

Pre zaručenie správneho návrhu s ohľadom na pravidlá a spoľahlivé fungovanie systému bol proces rozdelený do nasledujúcich krokov:

- Rešerš elektronických škrtiacich klapiek

- Rešerš pravidiel súťaže Formula Student
- Stanovenie technických špecifikácií pre systém
- Návrh mechanizmu elektronickej škrtiacej klapky
- Návrh algoritmu riadenia klapky
- Zostavenie simulačného modelu zvoleného mechanizmu
- Experimentálne overenie navrhnutého algoritmu
- Zhodnotenie výsledkov a návrh krokov pre ďalší vývoj

1.2. Formula Student

Formula Student je medzinárodná dizajnová súťaž, v ktorej majú študenti vysokých škôl za úlohu každoročne navrhnuť a zostrojiť pretekársky monopost formulového typu podľa daných pravidiel. V súčasnosti v kategórii formulí so spaľovacím motorom súťaží 621 univerzít. Pravidlá súťaže sú pomerne benevolentné, čo umožňuje rozmanité riešenia a veľký priestor pre inováciu. Napriek tomu, veľký dôraz sa kladie na bezpečnosť vozidiel, vzhľadom na to, že sa jedná o prototypy s obmedzeným časom na testovanie.

Celá súťaž je rozdelená na statické a dynamické disciplíny, v ktorých sa hodnotí návrh vozidla a postupy použité pri jeho navrhovaní, finančné náklady na výrobu, fiktívna predajná stratégia a v neposlednom rade dynamické vlastnosti vozidla v 5 jazdných disciplínach.

1.3. CTU CarTech

Tím CTU CarTech v súčasnej dobe preteká so svojim jedenástym monopostom, FS.11. Vďaka dlhoročnej práci všetkých bývalých aj súčasných členov dosiahol tím veľa úspechov a pravidelne sa dostáva na pódiové umiestnenia.



Obr. 2.: CTU CarTech - 3. miesto na FS Czech 2018 [3]

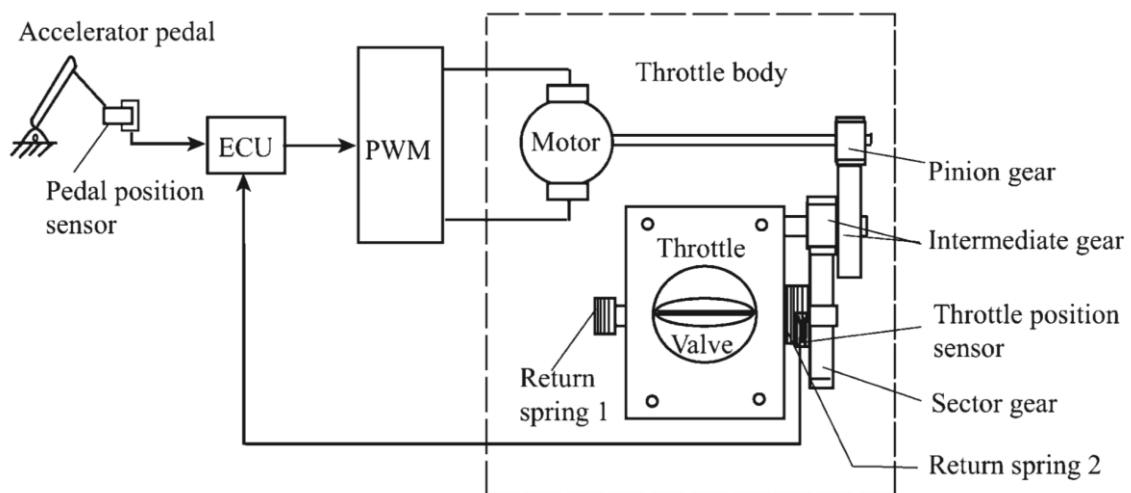
Posledné generácie vozidiel tímu CTU CarTech sú špecifické využívaním štvorvalcového spaľovacieho motora, kompozitného monokoku a nízkou celkovou hmotnosťou.

2. Problematika elektronických škrtiacich klapiek

Jediný regulačný člen spaľovacieho zážihového motora, ktorým je pilot schopný ovládať jeho krútiaci moment je práve škrtiaca klapka. Škrtiaca klapka reguluje prietok vzduchu v sacích kanáloch a tým aj maximálne množstvo paliva, ktoré dokáže vo valci zhorieť.

Elektronické ovládanie škrtiacej klapky je realizované pomocou polohových senzorov na plynovom pedále (ďalej iba APPS ako Accelerator Pedal Position Sensor), riadiacej jednotky, aktuátora (najčastejšie servo motor s prevodovkou) a polohových senzorov na telese škrtiacej klapky (ďalej iba TPS ako Throttle Position Sensor). Riadiaca jednotka vyhodnotí hodnoty zo senzorov a na základe toho určí polohu aktuátora.

Jednotlivé časti bežného systému ETC sú uvedené na obrázku (Obr. 3).



Obr. 3.: Diagram bežnej realizácie ETC systému [4]

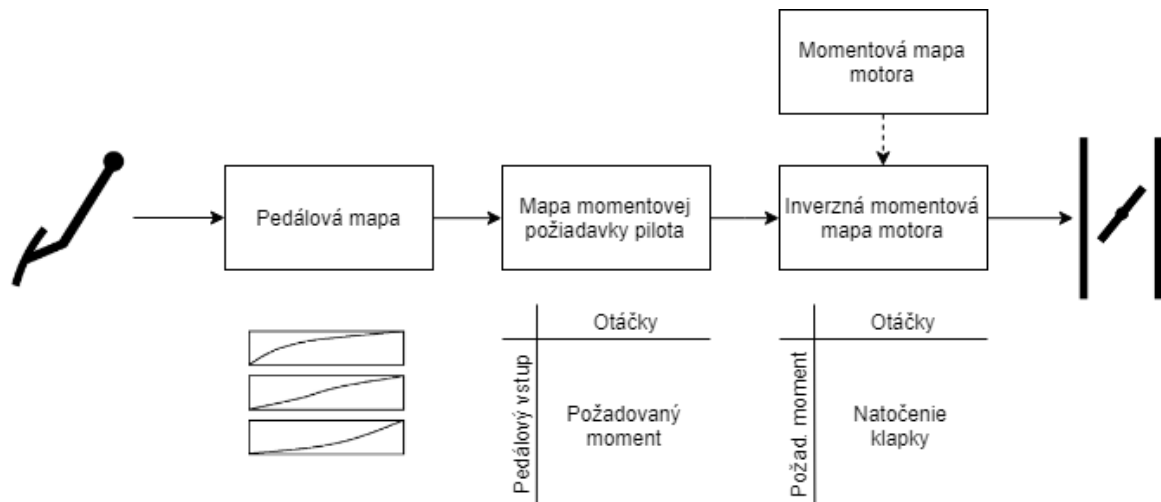
Nahradenie mechanického spojenia pedálu a klapky použitím ETC systému umožňuje rôzne módy ovládania klapky, pričom pozícia pedálu vstupuje do systému iba ako požiadavka na krútiaci moment. Na to aby bolo možné elektronickou klapkou vždy dosiahnuť požadovaný moment, musia byť v riadiacej jednotke motora nasledujúce mapy:

- **Momentová mapa motora** – predstavuje teoretický model motora. Pozostáva z dvojrozmernej tabuľky, ktorá predstavuje diskretnú funkciu krútiaceho

momentu v závislosti na otáčkach motora a pozícii škrtiacej klapky. Jednotlivé bunky tejto mapy sa ladia na motorovej brzde.

- **Inverzná momentová mapa motora** – dopočítava sa z momentovej mapy motora a v závislosti na požadovanom krútiacom momente a aktuálnych otáčkach motora vráti potrebné natočenie klapky v danom momente.
- **Mapa momentovej požiadavky pilota** – predstavuje funkciu požadovaného momentu na základe vstupu z plynového pedálu a otáčok motora. Táto mapa umožňuje úplne prispôsobenie výstupného momentu v závislosti na polohe plynového pedálu. Rozsah prispôsobiteľnosti je obmedzený maximálnym a minimálnym dostupným momentom pre dané otáčky. Táto mapa môže mať charakteristiku „konštantného momentu“, kde sa pri akýchkoľvek otáčkach motor snaží dosiahnuť moment požadovaný pilotom alebo „konštantného výkonu“, kde sa pri zvýšení otáčok (napríklad pri strate trakcie na hlanej náprave) zníži výsledný moment.
- **Mapa pedálu** – jednorozmerná tabuľka, v ktorej sa volí charakteristika pedálu. Umožňuje jednoduché nastavenie odozvy motora pre jednotlivých pilotov, iné pneumatiky alebo iné počasie. Táto mapa funguje ako „zosilovač“ pre pozíciu plynového pedálu a v motorsporte sa považuje za zastarané riešenie a je nahradzované viacerými prednastavenými mapami momentovej požiadavky pilota.

Grafické znázornenie vzťahu medzi jednotlivými mapami je pre lepšiu ilustráciu zobrazené na diagrame (Obr. 4).



Obr. 4.: Diagram realizácie požiadavky na moment

Systémy ETC v niektorých prípadoch dovoľujú aj polohovanie klapky nezávisle na polohe pedálu. To sa deje napríklad pri realizácii nasledujúcich funkcií:

- **Regulácia voľnobehu** – možnosť korekcií pre zmeny záťaže motora alebo teploty, pre udržanie stálych otáčok na voľnobehu.
- **Tempomat** – s pomocou ďalších senzorov dokáže ETC regulovať konštantnú (alebo adaptívnu) rýchlosť jazdy.
- **Trakčná kontrola** – ETC dokáže upraviť výkon motora v momente, keď riadiaca jednotka detekuje rozdiel v otáčkach predných a zadných kolies.
- **Prispôsobenie otáčok pri podradovaní** – Tzv. „blip“ alebo „rev. matching“ je metóda, pri ktorej krátkym otvorením klapky pri podradovaní dokáže elektronická klapka znížiť časy radenia a zamedziť blokovaniu zadnej nápravy kvôli rozdielnym rýchlostiam motora a kolies.

2.1. Elektronické klapky využívané vo Formula Student

Väčšina tímov používa teleso elektronickej klapky od výrobcu Bosch a jeho ovládanie najčastejšie riešia priamo v riadiacej jednotke motora. Na nasledujúcom obrázku (Obr. 5) je zobrazený príklad použitia kupovanej elektronickej klapky v súťaži Formula Student.



Obr. 5.: Využitie Bosch elektronickej klapky na monoposte tímu Rhein Mosel Motorsport

Voľba kúpy elektronickej klapky od overeného výrobcu má značné výhody, ale pre našu aplikáciu sa hlavne kvôli nutným zmenám v systéme sania a vysokom umiestnení veľkej hmotnosti nehodí.

Výhody OEM riešenia:

- Relatívne nízka cena (približne 80 €)
- Spoľahlivosť
- Žiadne potrebné kapacity na výrobu

Nevýhody OEM riešenia:

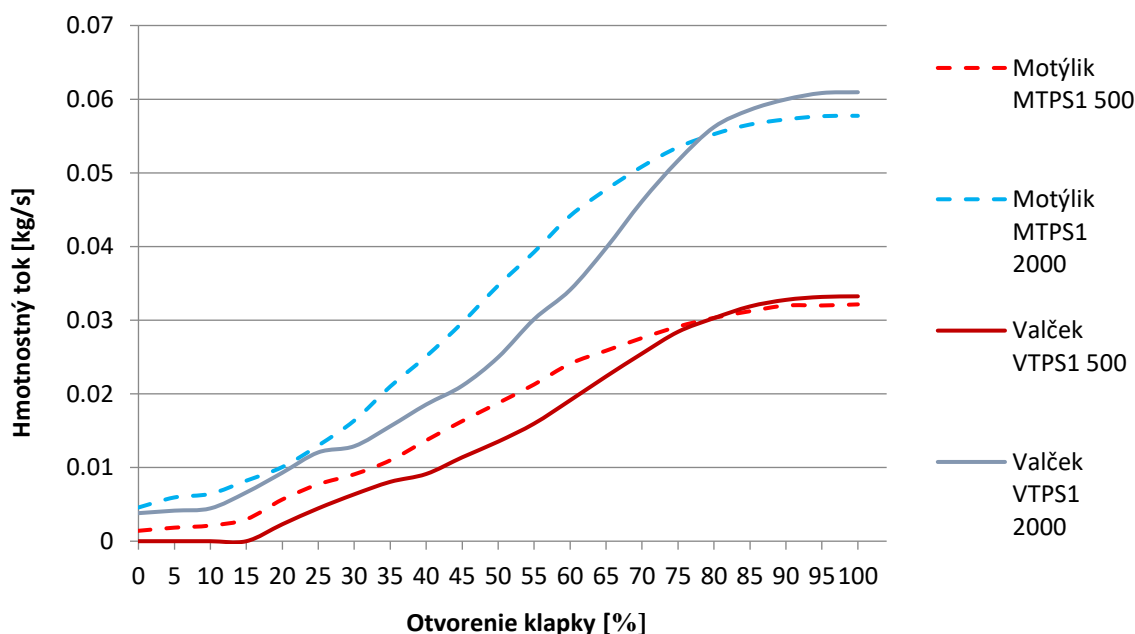
- Vysoká hmotnosť (približne 900g)
- Veľký priemer klapky a z toho plynúca potreba prispôbiť dizajn aktuálneho systému sania
- Neinovatívne riešenie – žiadne pridané body v dizajnovnej časti súťaže

2.2. Aktuálne využívaná klapka na monoposte FS.11

Pravidlá súťaže Formula Student SAE obmedzujú prívod vzduchu benzínových zážihových motorov kruhovým restriktorom o priemere 20 mm. Motor používaný pre pohon monopostov tímu CTU CarTech, Yamaha YZF-R6, mal vo svojej pôvodnej konfigurácii 4 škrtiace klapky a prívod vzduchu ekvivalentný štyrom kruhom o priemere

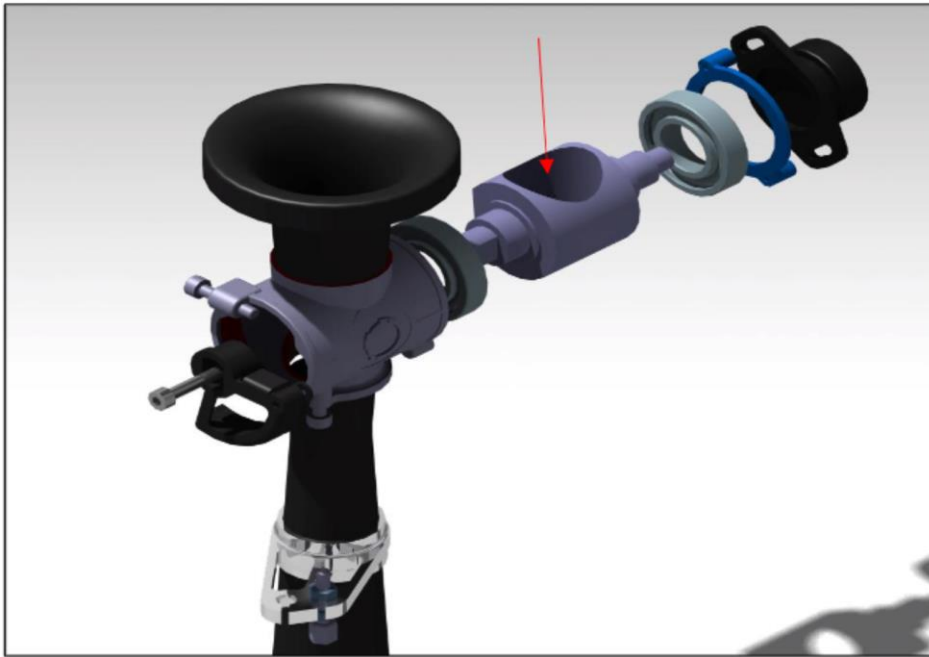
34 mm. Celkový výkon motora je veľmi citlivý na výsledný prietok vzduchu, preto bola v posledných rokoch nahradená tzv. motýliková škrtiaca klapka za valcové teleso s kuželovou dierou. Tento prechod znížil tlakové straty pri úplnom otvorení klapky, ale zmenil priebeh prietoku vzduchu vzhľadom na natočenie klapky. Pedál je medzi 50% a 80% natočenia klapky citlivejší a v celom priebehu menej lineárny, čím je zhoršená ovládateľnosť vozidla, najmä pri výjazdoch z pomalých zákrut. Porovnanie prietoku vzduchu dvoch typov klapiek pri rôznych tlakových spádoch je pre ilustráciu zobrazené na nasledujúcom grafe (Graf 1).

Provanie prietokov dvoch typov škrtiacich klapiek



Graf 1.: Prietok vzduchu jednotlivými typmi škrtiacich klapiek [5]

Používaná klapka (Obr. 6) pozostáva z hliníkového telesa, v ktorom je pomocou dvoch plastových valivých ložísk uložené valcové plastové teleso klapky, na obrázku označené červenou šípkou. Na jednej strane klapky je potenciometer slúžiaci ako TPS, na druhej strane je vačka, na ktorú sa upevňujú plynové lanko.



Obr. 6.: Rozpad zostavy aktuálne používanej klapky [6]

3. Technická špecifikácia

Navrhovaný systém musí v prvom rade spĺňať všetky pravidlá súťaže, čo bude zohľadnené hlavne pri návrhu riadiaceho algoritmu. Ďalej, veľký dôraz bude pri návrhu kladený na celkovú hmotnosť systému a jeho spoľahlivosť, keďže sa jedná o vysoko umiestnenú hmotu a z hľadiska bezpečnosti o kritickú časť vozidla. Mechanizmus by mal byť v čo najväčšej miere kompatibilný s aktuálnou klapkou, aby bola zaručená možnosť návratu k mechanickému ovládaniu v prípade problémov so systémom ETC. Elektronické časti systému musia mať aspoň základné krytie, zaručujúce plnú funkciu v daždi a mechanizmus by mal byť schopný plnej funkcie aj pri znečistení prachom. Systém by mal byť odolný voči teplotám do 100 stupňov alebo musí byť zabezpečená regulácia jeho teploty.

Výsledný návrh systému by mal byť schopný nastavovať polohu klapky rýchlejšie ako skúsený pilot, a to s dostatočnou rezervou, pre možnosť použitia systému pri návrhu zložitejších funkcií kontroly ovládania vozidla. Pre dosiahnutie čo najlepšieho riadenia ovládania klapky by mal mať čo najmenší výsledný moment zotrvačnosti a čo najmenšie pasívne odpory. Dôležitý bude aj výber správneho aktuátora a zostavenie modelu riadenia jeho polohy.

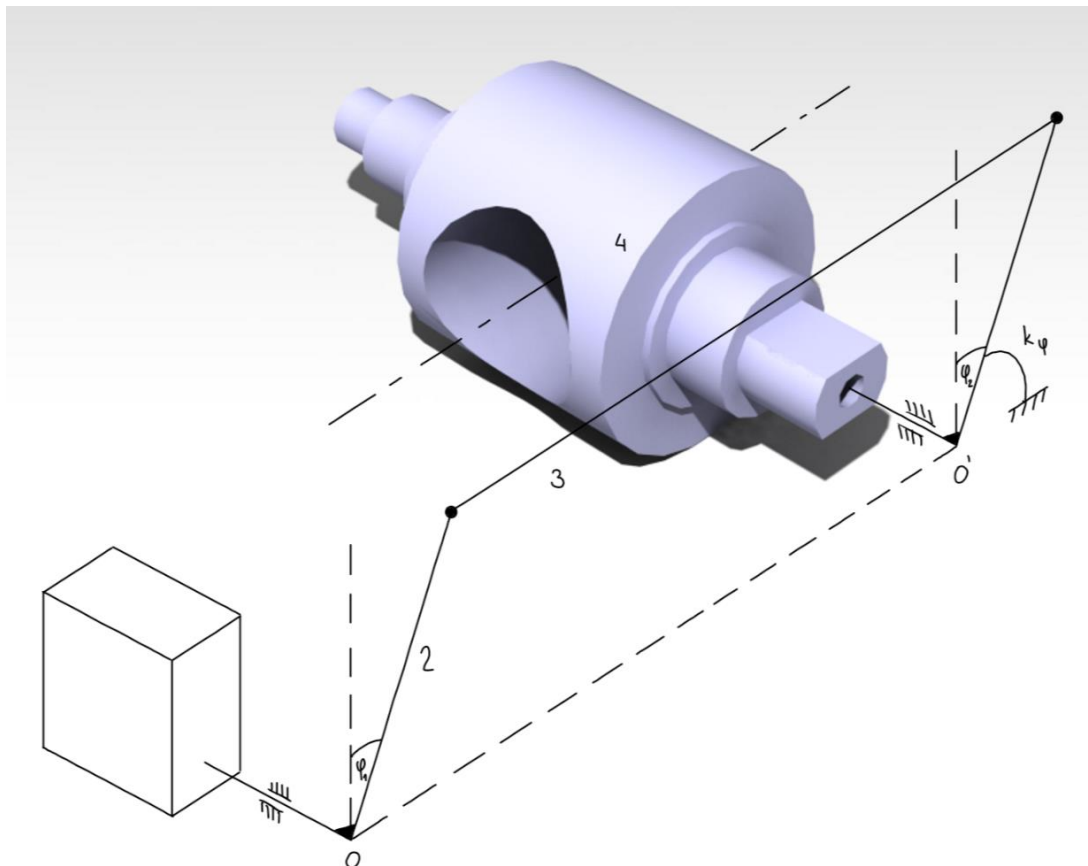
Z elektronického hľadiska, by mal byť systém pripravený na ďalší vývoj, tzn. mal by mať potrebné vstupy, výstupy a modul zbernice CAN pre komunikáciu s ostatnými riadiacimi jednotkami aktuálne používanými vo vozidle. Jednotka by mala disponovať vstupmi pre senzory rýchlostí kolies pre možnosť vývoja trakčnej kontroly, dostatočné množstvo analógových vstupov pre všetky senzory polohy pedálu, polohy klapky, tlakov

v brzdových okruhoch, potenciometra snímajúceho zaradenú rýchlosť a v neposlednom rade vstup pre senzor otáčok motora. Vo výstupoch musí byť zahrnutý signál ovládajúci napájanie vstrekovačov, pumpy a zapalovania motoru a výstup pre riadenie aktuátora. Alternatívou je voľba riadiacej jednotky motoru, ktorá tieto funkcie podporuje a bude schopná ovládať navrhnutý systém ETC.

4. Návrh mechanizmu

4.1. Mechanizmus aktuátora a klapky

Kvôli nutnosti použiť dva senzory natočenia klapky (TPS), by bolo náročné umiestniť aktuátor do osy rotácie klapky. Z toho dôvodu bol ako mechanizmus zvolený paralelogram zobrazený na obrázku (Obr. 7). Výhodou tohto mechanizmu je aj totožný prenos natočenia aktuátora a klapky.



Obr. 7.: Nákres navrhovaného mechanizmu

Pre zvolený mechanizmus bola zostavená vlastná pohybová rovnica v tvare:

$$(I_{20} + m_3 r^2 + I_{40'}) \ddot{\varphi} + k\varphi = M - k\varphi_0$$

Hodnoty dosadzované do rovnice boli pre vyrábané diely dopočítané z 3D modelu a hustoty použitého materiálu a pre kupované diely bola použitá hmotnosť uvedená od výrobcu:

$$I_{20} = 3,524 \cdot 10^{-7} \quad - \text{moment zotrvačnosti páky (2)}$$

$$m_3 = 0,010 \text{ kg} \quad - \text{hmotnosť spojovacej tyče, kĺbov a šróbov (3)}$$

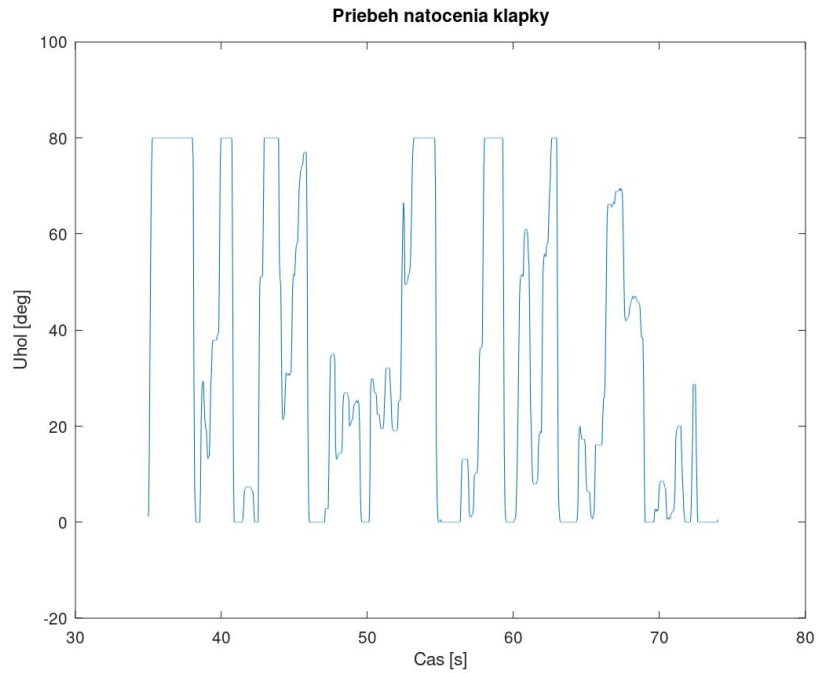
$$r = 0,024 \text{ m} \quad - \text{dĺžka pák (2 a 4)}$$

$$I_{40'} = 3,806 \cdot 10^{-6} \quad - \text{moment zotrvačnosti páky a telesa klapky (4)}$$

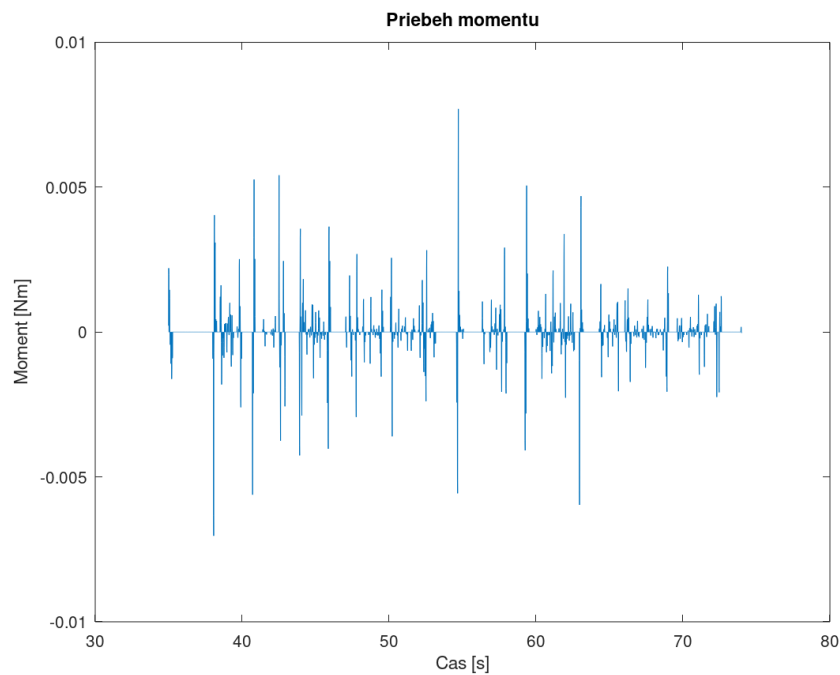
Dosadením hodnôt do vlastnej pohybovej rovnice mechanizmu a jej úpravov dostávame výslednú funkciu zotrvačného momentu v závislosti na uhlovom zrýchlení škrtiacej klapky:

$$M(\ddot{\varphi}) = 5,886 \cdot 10^{-6} \ddot{\varphi}$$

Pre výber správneho aktuátora bola vytvorená simulácia, ktorej vstupom boli skutočné pohyby škrtiacej klapky získané z telemetrie posledného vozidla FS.10 priam pri pretekoch. Pri simulácii bola zanedbaná tuhosť torznej pružiny, keďže tá bude volená až podľa zvoleného aktuátora a momentu potrebného na vrátenie mechanizmu do pôvodného stavu. Špecifikácie vybraných aktuátorov nezahrnovali dáta, z ktorých by mohla byť táto hodnota určená. V súčasnosti má používaná pružina relatívne vysokú tuhosť, kvôli rýchlemu návratu klapky do pôvodnej polohy a kvôli dostatočnému odporu v pedáli. V prípade ETC systému bude mať torzná pružina jedinú úlohu, definovanú pravidlami, a to vrátiť klapku do pôvodnej polohy v časovom intervale 1 s v prípade, že aktuátor stratí napájanie. Na nasledujúcich grafoch je zobrazený priebeh natočenia klapky (Graf 2) z úseku trate a odpovedajúci moment (Graf 3) potrebný pre realizáciu rovnakého natočenia zvoleného mechanizmu.



Graf 2.: Priebeh natočenia klapky na úseku trate na FS Spain 2018



Graf 3.: Simulovaný priebeh zotrvačného momentu

Po prefiltrovaní dát z celej dĺžky pretekov dostávame zo simulácie nasledovné hodnoty pre maximálny zotrvačný moment a maximálnu dosahovanú uhlovú rýchlosť.

$$M_{max} = 0,0077 \text{ Nm}$$

$$\dot{\varphi}_{max} = 951,28 \text{ } ^\circ/s$$

Hodnoty získané zo simulácie budú použité pri výbere aktuátora a pre overenie jeho dynamických vlastností v experimentálnej časti. Kvôli výberu servo motorov boli tieto hodnoty prepočítané aj do jednotiek, v ktorých sa bežne uvádzajú ich vlastnosti.

$$M_{max} = 0,0785 \text{ kgcm}$$

$$\dot{\varphi}_{max} = 0,063 \text{ s}/60^\circ$$

4.2. Pripojenie senzorov k plynovému pedálu

Kvôli zachovaniu možnosti pripojiť plynové lanko bude veľká časť mechanizmu zachovaná. V ose otáčania pedálu budú pripojené dva rotačné polohové senzory na snímanie natočenia pedálu. Vďaka tomu dostaneme lineárny priebeh signálu zo senzora vzhľadom na polohu pedálu. Zároveň je takéto riešenie konštrukčne pomerne jednoduché a pre prispôbenie na prechod na systém ETC budú potrebné relatívne malé úpravy pedálovej zostavy.

5. Algoritmus ovládania

Algoritmus ovládania podlieha prísny m pravidlám zo strany organizácie súťaže Formula Student. V pravidlách sú definované odchýlky a časové limity kontroly vstupov zo senzorov a aktuálnej polohy klapky voči požadovanej polohe. V pravidlách sú definované aj požiadavky na bezpečnostné opatrenia v prípade, keď je detekované nejaké zlyhanie systému.

Hodnovernosť TPS a APPS

Ak medzi aspoň dvoma TPS alebo dvoma APPS nenastáva hodnovernosť a tento stav pretrváva dlhšie ako 100 ms, napájanie elektronickej klapky musí byť ihneď odpojené. Hodnovernosť senzorov TPS je definovaná ako rozdiel menší ako 10% medzi hodnotami senzorov a žiadne detekované zlyhania (skrat, prerušenie vedenia...).

Interpretácia pravidiel CV 1.6.7, CV 1.4.3, T 11.9 a T 11.8.8 [7].

Požadovaná hodnota TPS

Ak je pozícia klapky odlišná od požadovanej hodnoty TPS o viac ako 10% na dlhšiu dobu ako 500 ms, napájanie elektronickej klapky musí byť ihneď odpojené.

Interpretácia pravidla CV 1.6.10 [7].

Odpojenie napájania ETC

Po odpojení napájania sa musí elektronická klapka ihneď vrátiť aspoň na polohu voľnobehu. Tolerancia na presnosť polohy voľnobehu je $\pm 5\%$ celkového chodu klapky. Ak sa klapka nedostane do určenej polohy v časovom intervale 1 s od odpojenia napájania, napájanie zapaľovania, vstrekovania a palivovej pumpy musí byť ihneď odpojené. Táto akcia musí ostať aktívna, až kým sa klapka neuzavrie do určenej polohy na dobu dlhšiu ako 1 s.

Interpretácia pravidiel CV 1.6.6 z prílohy [7].

5.1. Overovanie hodnovernosti senzorov

Pred nastavovaním polohy klapky navrhovaný algoritmus skontroluje splnenie všetkých bezpečnostných podmienok. V prvom kroku načíta hodnoty napätia na senzoroch a priradí im digitálne hodnoty. Nasleduje kontrola hodnovernosti TPS a APPS.

V podmienke sa porovná hodnota rozdielu dvoch senzorov s násobkom rozsahu senzorov pri danom chode pedálu (alebo klapky pri kontrole hodnovernosti TPS). Táto hodnota si vyžaduje ladenie na aktuálne používanom mechanizme a jeho konfigurácii. Ak je rozdiel menší alebo rovný porovnáwanej hodnote, nastaví sa výsledná hodnota APPS, ktorá je priemerom hodnôt z dvoch senzorov.

V prípade nesplnenia podmienky sa pripočíta čas trvania posledného cyklu celého algoritmu do premennej, ktorá keď presiahne nastavenú hodnotu, APPS (alebo TPS) sa vyhodnotia ako nehodnoverné. Takýto spôsob merania času splnenia, resp. nesplnenia podmienky má isté nevýhody, napríklad veľkosť kroku je úmerná časovej náročnosti algoritmu (aktuálne približne 4 ms). Z toho dôvodu je nutné v konfigurácii algoritmu zvoliť o niečo nižší časový limit pre zabezpečenie splnenia pravidiel. Časový limit však nemôže byť príliš nízky, aby bola dosiahnutá požadovaná spoľahlivosť systému a bezpečnostné podmienky neprerušili jazdu skôr, ako je to nutné. Pre uspokojivú spoľahlivosť systému bola zvolená hranica minimálneho času všetkých podmienok na 80% času definovaného pravidlami.

Alternatívou by bolo porovnávanie celkového času od spustenia programu, v tomto prípade je však algoritmus o niečo zložitejší a neponúka žiadne výhody oproti zvolenej metóde. Ideálnym riešením by bola paralelná kontrola hodnôt na inom jadre

procesoru, čo však na používanom zariadení nie je možné a pre odladenie systému na správne fungovanie to ani nie je potrebné. Príklad kontroly hodnovernosti priamo v kóde je uvedený na nasledujúcom obrázku (Obr. 8). Pod obrázkom je popis použitých premenných a konštánt.

```
//APPS plausibility
  if(abs(APPS1 - APPS2) <= APPS_error_thresh && condition_APPS_T == 0){

    APPS = (APPS1 + APPS2)/2;

  } else {

    APPS = (APPS1 + APPS2)/2;
    condition_APPS_T += delta;

    if(abs(APPS1 - APPS2) <= APPS_error_reset){
      condition_APPS_T = 0;
    }

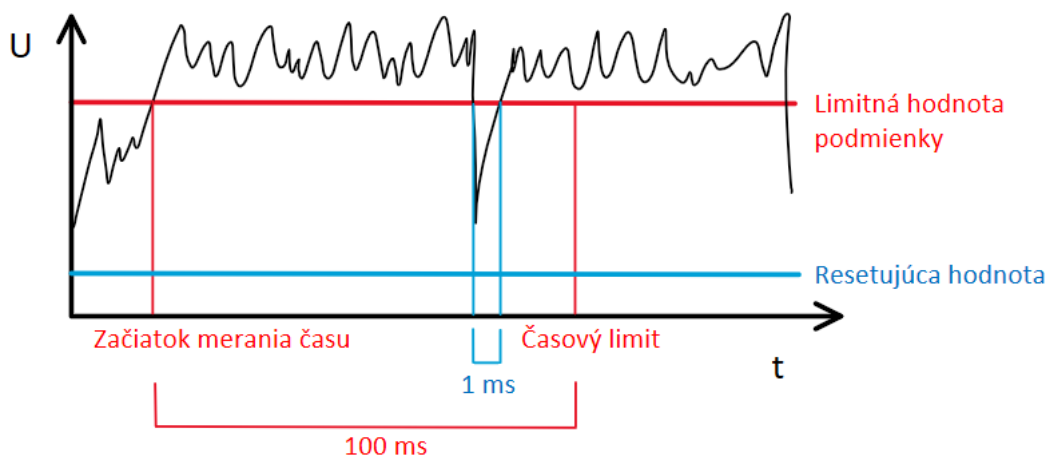
    if(condition_APPS_T >= APPS_time) {
      APPS = 0;
      analogWrite(ServoPower, LOW);
      ServoPowerBool = false;
      ImplausibilitySource = 1;
    }
  }
}
```

Obr. 8.: Ukážka kódu pre realizáciu bezpečnostnej podmienky

- *APPS1 a APPS2* – digitálna hodnota prvého a druhého senzoru polohy pedálu namapovaná na jednotný rozsah
- *APPS_error_thresh* – percentuálna hodnota odchýlky hodnôt senzorov definovaná pravidlami (10%) pre násobená jednotným rozsahom senzorov
- *APPS_error_reset* – hodnota resetujúca meranie času
- *condition_APPS_T* – aktuálna hodnota meraného času od vzniku odchýlky medzi senzormi
- *delta* – čas jedného cyklu algoritmu, na základe ktorého sa počíta *condition_APPS_T*
- *APPS_time* – dĺžka času definovaná pravidlami
- *ServoPower* – výstupný pin mikrokontroleru, ovládajúci napájanie serva

- *ServoPowerBool* – premenná uchováajúca stav napájania servo motoru. Vstupuje do ďalších podmienok.
- *ImplausibilitySource* – zdroj nehodovernosti. Určuje postup algoritmu po spustení bezpečnostnej procedúry

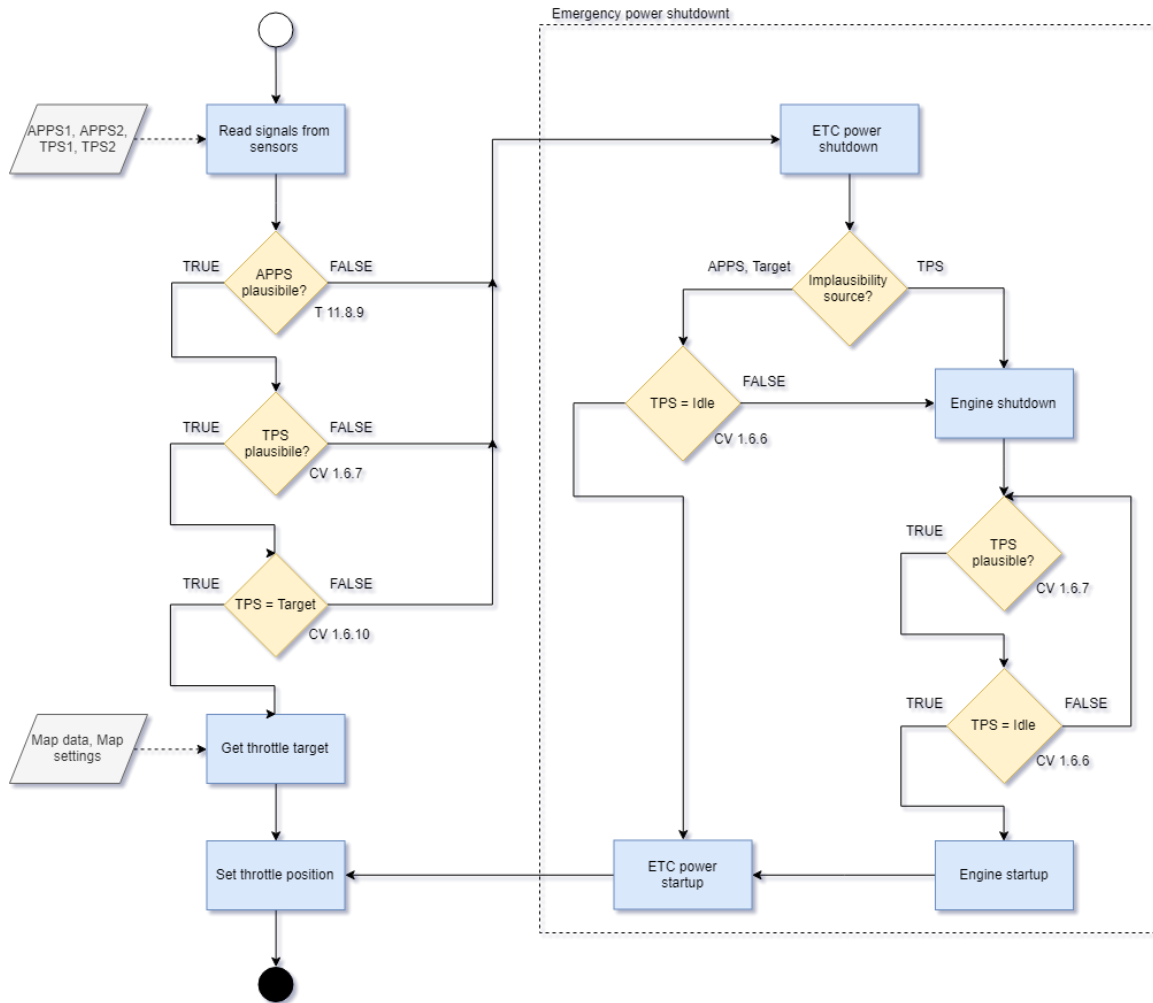
Ako prevencia pred vplyvom šumu na spustenie bezpečnostnej procedúry bola použitá hysterézná charakteristika pre všetky bezpečnostné podmienky. Toto opatrnie zabezpečí, že krátky pokles napätia na signále zo senzora nespôsobí reset meraného času. Meranie času podmienky sa resetuje až pri nižšej limitnej hodnote ako je tá, ktorá meranie času spustí. Princíp takejto podmienky je ilustrovaný na obrázku (Obr. 9).



Obr. 9.: Príklad na hysteréznu charakteristiku podmienky

5.2. Bezpečnostné odpojenie napájania

Pri nesplnení jednej z bezpečnostných podmienok algoritmus prechádza do bezpečnostnej procedúry vyznačenej na vývojovom diagrame (Obr. 10). Po odpojení napájania klapky, v závislosti na podmienke, z ktorej bola bezpečnostná procedúra spustená, sa buď vypne motor (ak procedúru zavolala nehodovernosť TPS), alebo sa kontroluje, či sa v priebehu jednej sekundy vráti klapka do polohy voľnobehu. Po opätovnom splnení podmienok na hodovernosť TPS a polohu klapky sa napájanie motora a elektronickej klapky znova zapne. Všetky kroky algoritmu sú viditeľné na nasledujúcom vývojovom diagrame.

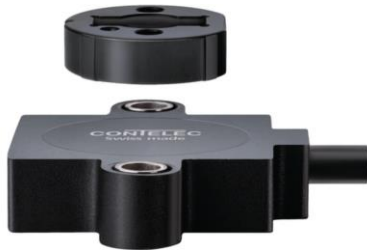


Obr. 10.: Vývojový diagram navrhovaného algoritmu

6. Výber aktuátorov a senzorov

6.1. Výber senzorov

Pre rotačný charakter všetkých meraných veličín (natočenie plynového pedálu, natočenie škrtiacej klapky) boli vybrané rotačné polohové senzory namiesto lineárnych. Pre senzory snímajúce polohu plynového pedálu boli kvôli nízkej poruchovosti a jednoduchšej zástavbe vybrané magnetické senzory fungujúce na princípe Hallovhovho efektu. Pre snímanie polohy škrtiacej klapky, kvôli zmenám teploty počas jazdy a počas zahrievania motoru, boli vybrané rotačné potenciometre, ktoré majú iba zanedbateľný teplotný „drift“.



Obr. 11.: Bezkontaktný senzor Contelec [8]



Obr. 12.: Rotačný potenciometer Variohm [9]

6.2. Výber aktuátora

Kvôli zachovaniu čo najnižšej hmotnosti celého systému a kvôli jednoduchosti ovládania bol vybraný servo motor určený pre RC modelárstvo. Natočenie servo motoru je riadené prostredníctvom PWM. Šírka pulzu medzi 1 a 2 ms pri frekvencii 50 Hz zodpovedá rozsahu natočenia daného servo motoru (zvyčajne 180 stupňov). Hlavnou nevýhodou servo motorov je ich veľký odber (až 3A), a to aj pri udržiavaní polohy. Vzhľadom na aktuálnu energetickú bilanciu elektronických zariadení posledného monopostu je takýto odber prijateľný.

Hodnoty získané zo simulácie boli prepočítané do jednotiek uvádzaných výrobcami servo motorov:

$$M_{max} = 0,0740 \text{ kgcm}$$

$$\dot{\varphi}_{max} = 0,1087 \text{ s}/60^\circ$$

Na základe dát zo simulácie mechanizmu bol vybraný servo motor Turnigy™ SC-3404V DS, ktorého krútiaci moment rádovo prevyšuje zotrvačné sily pôsobiace pri pohybe navrhnutého mechanizmu a jeho rýchlosť s dostatočnou bezpečnosťou prevyšuje návrhovú rýchlosť mechanizmu. Voľbou silnejšieho a rýchlejšieho servo motoru by v budúcnosti mal byť zjednodušený aj vývoj funkcií ako trakčná kontrola alebo tzv. „blip“, keďže pri týchto funkciách je požadovaná čo najrýchlejšia odozva klapky. Cena a hmotnosť tohto motora neboli veľmi odlišné od menej výkonných verzií, preto táto voľba neprináša žiadne zásadné nevýhody.

Moment dosahovaný zvoleným motorom a jeho uhlová rýchlosť:

$$M = 3,6 \text{ kgcm}$$

$$\dot{\varphi} = 0,04 \text{ s}/60^\circ$$

V experimentálnej časti práce bude výber vlastností overený na dostupnejšom serve Savox SH-0262MG, ktorého vlastnosti sú:

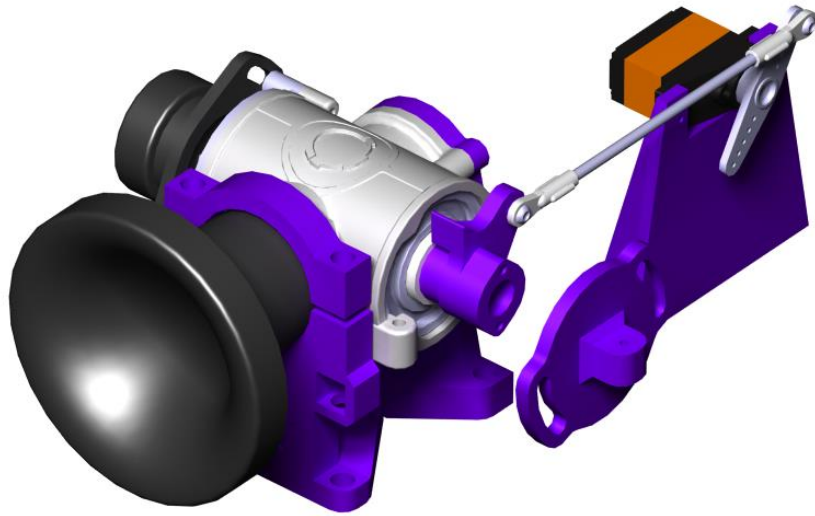
$$M = 1,2 \text{ kgcm}$$

$$\dot{\varphi} = 0,06 \text{ s}/60^\circ$$

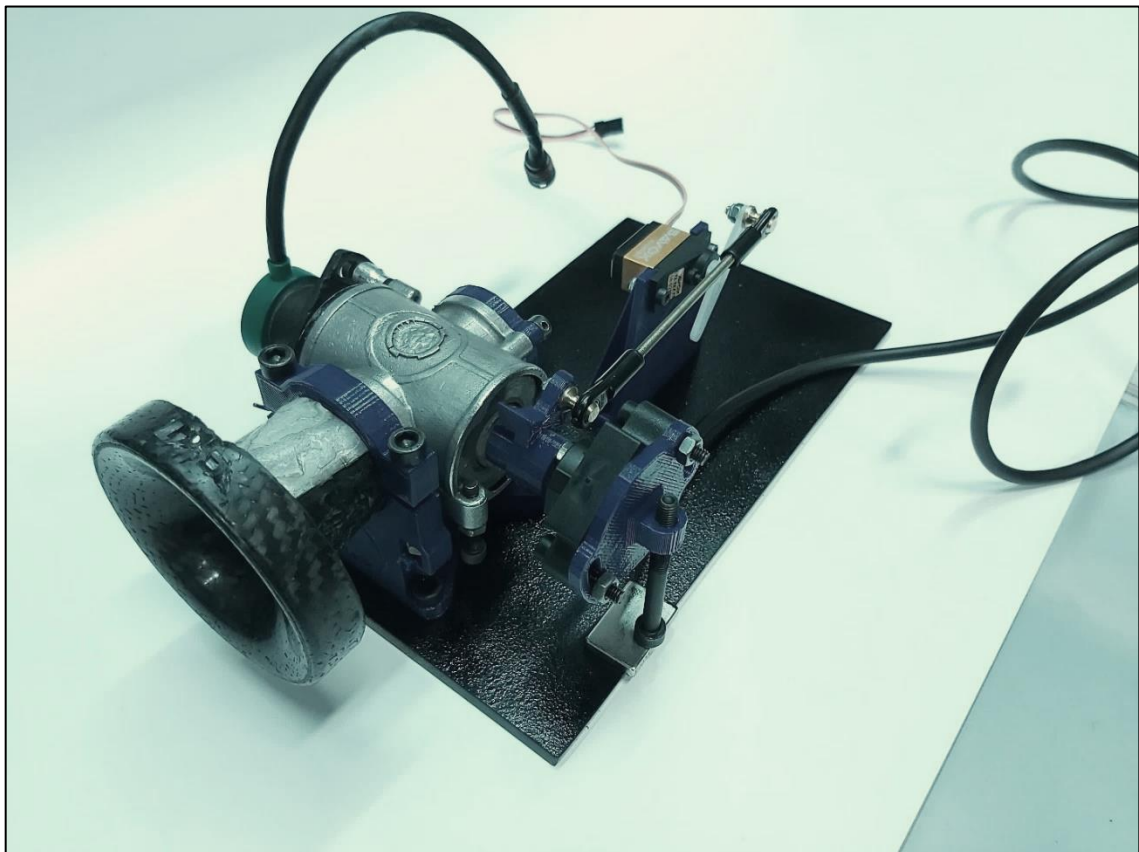
Menej výkonné servo bolo okrem svojej dostupnosti vybrané za účelom jednoduchšieho odhalenia problémov spojených požiadavkami na výkon motoru s opotrebením mechanizmu alebo faktormi nezahrnutými v simulačnom modeli, ako napríklad pasívne odpory v kĺboch mechanizmu.

7. Experimentálna časť

Pre overenie navrhovaného algoritmu bol vybraný mikrokontroler Arduino Nano, kvôli jednoduchšej konfigurácii a možnosti využiť knižnice urýchľujúce vývoj prototypu. Testovanie senzorov plynového pedálu bolo realizované pomocou mechanického prepojenia dvoch potenciometrov. Kvôli jednoduchosti mechanizmu nebolo potrebné upevňovať senzory priamo na pedálovú zostavu. Pre overenie algoritmu na používanej klapke bol zostrojený prípravok na jej uchytenie pomocou technológie 3D tlače plastov. Testovací prípravok systému bol navrhnutý s ohľadom na simulovanie porúch systému, umožňuje napríklad jednoduché posunutie alebo natočenie bezkontaktného rotačného senzoru. Na nasledujúcich obrázkoch je zobrazený model testovacieho prípravku a jeho realizácia.



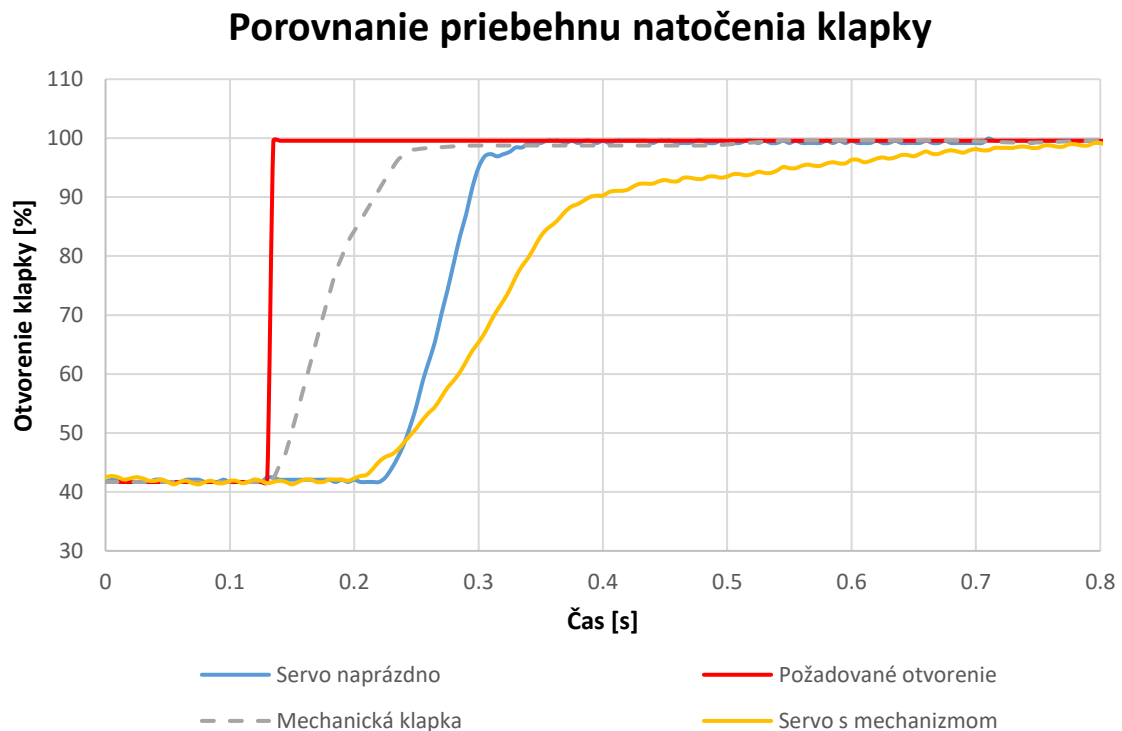
Obr. 13.: Model testovacieho prípravku



Obr. 14.: Realizácia testovacieho prípravku

7.1. Dynamické vlastnosti serva a mechanizmu

Pre zistenie dynamických vlastností systému s použitým aktuátorom boli vykonané merania priebehu natočenia ako odozvy na skokový signál. Meraný bol priebeh natočenia serva naprázdno a serva pripojeného k celému mechanizmu. Výsledky z meraní boli vynesené na graf (Graf 4) a prirovnané k priebehu natočenia mechanickej klapky.



Graf 4.: Porovnanie priebehu natočenia klapky

Z grafu je možné vyčítať niekoľko dôležitých poznatkov. Prvým je, že odozva serva má v oboch prípadoch oneskorenie oproti nastaveniu požadovaného natočenia. Analýzou dát boli zistené presné hodnoty oneskorenia. Pri opakovaných meraniach sa oneskorenie stále vyskytovalo a jeho hodnoty sa pohybovali v rozmedzí 60 až 100 ms. Tento problém mohol byť spôsobený chybou v testovacom softwari alebo použitom mikrokontroleri. V budúcnosti môže byť táto hypotéza overená pripojením osciloskopu a kontrolovaním oneskorenia medzi vyvolaním signálu (stlačením tlačítka) a jeho zmenou.

Okrem toho je na grafe viditeľný vplyv zaťaženia na celkovú rýchlosť, ktorú servo dosahuje, čas potrebný na nastavenie polohy a presnosť nastavenej polohy. Rýchlosť serva naprázdno zodpovedala rýchlosti udávanej výrobcom. Rýchlosť serva pripojeného k mechanizmu značne klesla a v posledných približne 17% chodu mechanizmu servo

výrazne spomalilo. Je jasne vidieť, že servo je poddimenzované a pre aplikáciu nie je vhodné. Prehľad nameraných dát je zobrazený v nasledujúcej tabuľke (Tabuľka 1).

	Dosiahnutá rýchlosť	Celkové nastavenie polohy ($\pm 1\%$)	Nastavenie polohy bez oneskorenia ($\pm 1\%$)	Oneskorenie oproti signálu
Servo naprázdno	0,058 s/60°	205 ms	120 ms	85 ms
Servo s mechanizmom	0,138 s/60°	600 ms	535 ms	65 ms
Mechanická klapka	0,063 s/60°	140 ms	140 ms	N/A

Tabuľka 1.: Prehľad výsledkov merania

7.2. Bezpečnostný algoritmus

Postupne bol simulovaný každý prípad opísaný v pravidlách súťaže a overené správne fungovanie algoritmu. Zvolené scenáre (Tabuľka 2) testovania boli niekoľkokrát opakované a podľa objavených chýb bol algoritmus opravený. V tabuľke sú vyznačené prípady, ktorých nesplnenie odhalilo chybu v algoritme.

Situácia	Akcia	Časový limit
Odsunutie senzoru od klapky	Vypnutie motora	80 – 100 ms
Odsunutie senzoru od pedálu	Vypnutie napájania klapky	80 – 100 ms
Zablokovanie klapky predmetom	Vypnutie motora	400 – 500 ms
Vrátenie senzoru klapky po vypnutí motoru – klapky zablokovaná	Žiadna akcia – motor vypnutý	N/A
Uvoľnenie klapky	Zapnutie motora	> 1000 ms

Tabuľka 2.: Testovacie scenáre porúch

V prípade vrátenia senzoru klapky po vypnutí motora sa pri prvom testovaní napájanie vstrekovačov, pumpy a zapalovania hneď zaplo. V algoritme chýbala kontrola návratu na pozíciu voľnobehu.

Prípad nesplnenia časového limitu bolo náročnejšie odhaliť. Časový limit daný pravidlami splnený síce bol, ale nebola splnená dolná časová hranica zvolená pri návrhu pre zaručenie spoľahlivosti pri jazde. Systém vypol motor po 34 ms. Príčinou bolo, že v pôvodnom algoritme sa meranie času prerušilo, keď sa odchýlka hodnoty nachádzala pod limitnou hodnotou, ale zároveň nad resetovacou hodnotou. V takomto stave systém fungoval ďalej, ale v premennej uchováajúcej čas podmienky bola uložená hodnota

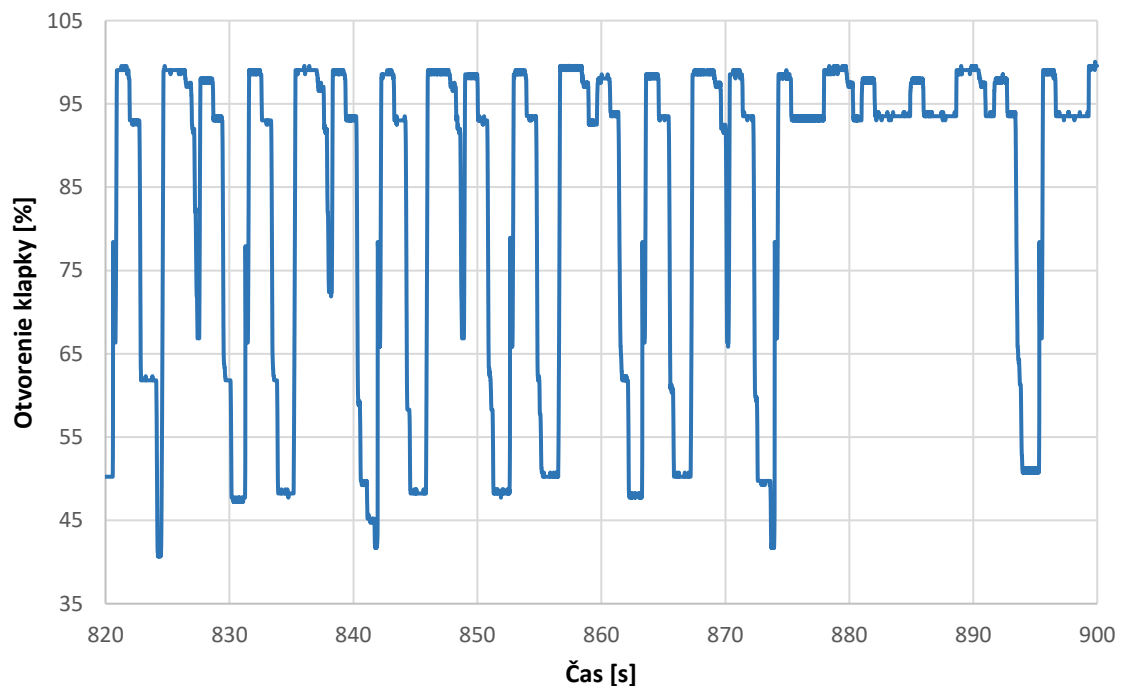
z predošlého testovania. Algoritmus bol upravený aby meranie času pokračovalo až kým sa naplní podmienka alebo kým je časomiera resetovaná.

7.3. Testovanie spoľahlivosti

Do ovládacieho softwaru bola nahratá krátka sekvencia dát polohy klapky z telemetrie monopostu FS.11 a systém simuloval nepretržitú jazdu. V dátach bol kontrolovaný priebeh natočenia klapky a priebežne bola kontrolovaná teplota aktuátora.

Pri testovaní bol odhalený problém s prehrievaním servo motoru. Po približne 14 minútach simulovania pretekov servo začalo strácať výkon a nedokázalo nastavovať správnu polohu klapky. Na nasledujúcom grafe (Graf 5) je zreteľne vidno úsek, v ktorom klapka ostala otvorená, kvôli strate výkonu.

Priebeh natočenia klapky pri teste spoľahlivosti



Graf 5.: Úsek z testovania spoľahlivosti

V ďalšom vývoji systému bude udržanie optimálnej teploty serva značnou výzvou aj kvôli umiestneniu klapky. Na monoposte FS.11 sa klapka nachádza v prednej časti nad motorom a výfukovými zvodmi, kde stúpa veľké množstvo tepla. Takéto umiestnenie (Obr. 15) klapky by mohlo spôsobiť prehriatie serva ešte pri zahrievaní motoru pred štartom pretekov.



Obr. 15.: Poloha klapky na monoposte FS.11

8. Zhodnotenie výsledkov

Všetky kroky procesu návrhu stanovené v úvode práce boli splnené a pri ich plnení bol položený základ pre realizáciu systému. V experimentálnej časti boli odhalené nedostatky navrhnutého algoritmu, na základe ktorých bol algoritmus upravený a opätovne testovaný. Výsledkom práce je návrh systému, ktorý spĺňa pravidlá súťaže podarilo sa ním overiť koncept. Vzhľadom na to, že teleso klapky používané na testovanie tohoto systému je jediný existujúci kus, čas na testovanie bol značne obmedzený používaním klapky na monoposte FS.11. Z rovnakého dôvodu neboli možné ani žiadne modifikácie telesa klapky. Systém ako taký si pred použitím na monoposte vyžaduje veľké množstvo testovania, ladenia a ďalšieho vývoja.

Navrhované ďalšie kroky vývoja, ktoré v tejto práci neboli uskutočnené, ale pre realizáciu spoľahlivého a dobre fungujúceho systému sú dôležité, sú napríklad:

- Rešerš a analýza modelu riadenia používaného v servo motoroch určených pre RC modelárstvo
- Zostavenie presnejšieho simulačného modelu so zahrnutím vlastností zvoleného motoru, pasívnych odporov mechanizmu a torznej pružiny so správnou tuhosťou
- Dôkladné testovanie vplyvu tuhosti torznej pružiny na fungovanie serva
- Výber výkonnejšieho serva vhodného pre túto aplikáciu
- Návrh riešenia problému s prehrievaním
- Porovnanie vybraného mechanizmu s možnými alternatívami
- Elektrotechnický návrh riadiacej jednotky alebo výber riadiacej jednotky motora schopnej riadiť navrhnutý systém

ZOZNAM POUŽITÉJ LITERATÚRY

- [1] **William F. Milliken, Douglas L. Milliken.** Race Car Vehicle Dynamics. miesto neznáme:SAE International, 1995. 1560915269
- [2] **Racecar Engineering.** OptimumG G-G Diagram [Online] 1.7.2018. [Citácia: 12.8.2019]
<https://www.racecar-engineering.com/wp-content/uploads/2018/05/OptimumG-G-G-diagram.jpg>
- [3] **FSCzech 2018.** CTU CarTech – 3. miesto [Online]. [Citácia: 12.8.2019]
<https://fsczech.smugmug.com/Photo/2018/Saturday/i-42dKlr6/A>
- [4] **Xiaohong Jiao.** An Adaptive Servo Control Strategy for Automotive Electronic Throttle and Experimental Validation [Online] [Citácia: 14.8.2019]
https://www.researchgate.net/publication/262938429_An_Adaptive_Servo_Control_Strategy_for_Automotive_Electronic_Throttle_and_Experimental_Validation
- [5] **CTU CarTech.** Meranie prietoku klapiek. Interné materiály tímu CTU CarTech. 2014-2019
- [6] **Čepek, Richard.** Optimalizace tvaru sání motoru pro Formuli Student, Praha: FS ČVUT 2018
- [7] **Formula Student Germany.** Formula Student Rules 2019. www.formulastudent.de [Online] 7. 10. 2019. [Citácia: 6. 7. 2019]
https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2019/rules/FS-Rules_2019_V1.1.pdf
- [8] **Contelec AG.** Vert-X E datasheet [Online] 4.10.2016. [Citácia: 13.8.2019]
http://www.contelec.ch/fileadmin/user_upload/contelec/Downloads/Datenblaetter/Englisch/Vert-X_E/Vert-X%2031E/Vert-X_31E_24V_0.5-4.5V_e.pdf
- [9] **Variohm EuroSensor.** Throttle Position Sensor [Online] 16.8.2019. [Citácia: 16.8.2019]
<https://www.variohm.com/pressrelease/detail.php?aid=385&did=Throttle-Position-Sensor>

DAĽŠIA POUŽITÁ LITERATÚRA

Formula 1 Dictionary. Engine Torque Map and Pedal Map [Online]
http://www.formula1-dictionary.net/engine_torque_map.html

Valášek, M. a kol. Mechatronika, Vydavatelství ČVUT, Praha 1996

Ellis, G. Control System Design Guide, Elsevier, 2012, 4th Edition

Anwar, S. Fault Tolerant Drive by Wire Systems, Bentham Science Publishers, 2012

Eriksson, L., Nielsen, L. Modeling and Control of Engines and Drivelines, John Wiley & Sons, 2014

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1.: Příklad g-g diagramu od Optimim G [2]	7
Obr. 2.: CTU CarTech - 3. miesto na FS Czech 2018 [3]	8
Obr. 3.: Diagram bežnej realizácie ETC systému [4]	9
Obr. 4.: Diagram realizácie požiadavky na moment	11
Obr. 5.: Využitie Bosch elektronickej klapky na monoposte tímu Rhein Mosel Motorsport	12
Obr. 6.: Rozpad zostavy aktuálne používanej klapky [6]	14
Obr. 7.: Náskres navrhovaného mechanizmu	15
Obr. 8.: Ukážka kódu pre realizáciu bezpečnostnej podmienky	20
Obr. 9.: Příklad na hysteréznú charakteristiku podmienky	21
Obr. 10.: Vývojový diagram navrhovaného algoritmu	22
Obr. 11.: Bezkontaktný senzor Contelec [8]	23
Obr. 12.: Rotačný potenciometer Variohm [9]	23
Obr. 13.: Model testovacieho prípravku	25
Obr. 14.: Realizácia testovacieho prípravku	25
Obr. 15.: Poloha klapky na monoposte FS.11	29

ZOZNAM GRAFOV

Graf 1.: Prietok vzduchu jednotlivými typmi škrtiacich klapiek [5]	13
Graf 2.: Pribeh natočenia klapky na úseku trate na FS Spain 2018	17
Graf 3.: Simulovaný pribeh zotrvačného momentu	17
Graf 4.: Porovnanie priebehu natočenia klapky	26
Graf 5.: Úsek z testovania spoľahlivosti	28

ZOZNAM TABULIEK

Tabuľka 1.: Prehľad výsledkov merania	27
Tabuľka 2.: Testovacie scenáre porúch	27

ZOZNAM PRÍLOH

Príloha 1 – Prílohou je CD, ktoré obsahuje súbory podľa zoznamu

OBSAH PRÍLOŽENÉHO CD

1. Kód použitý pri testovaní mechanizmu
2. Kód simulácie v softwari GNU Octave
3. Dáta z telemetrie vozidla použité pre simuláciu
4. Plné znenie práce v PDF