



**FAKULTA
ŠROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel

**Optimalizace vstřikovacího systému pro
studentskou formuli**

**Fuel injection system optimization for
Formula Student car**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
2019**

Márk ERDÉLYI

Studijní program: B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD ŠROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Studijní obor: 2301R000 Studijní program je bezoborový

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

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Erdélyi Jméno: Márk Osobní číslo: 466427
Fakulta/ústav: Fakulta strojní
Zadávající 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:

Optimalizace vstřikovacího systému pro studentskou formuli

Název bakalářské práce anglicky:

Fuel injection system optimization for formula Student car

Pokyny pro vypracování:

Vypracujte rešerši v oblasti palivových soustav používaných pro motory pohánějící formule Student. Specifikujte požadavky na vstřikovače pro používaný motor a proveďte jejich výběr z dostupných modelů. Proměřte charakteristické vlastnosti vybraných vstřikovačů a vypracujte jejich zástavbu do motoru.

Seznam doporučené literatury:

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: **18.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **10.07.2019**

Platnost zadání bakalářské práce:


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


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

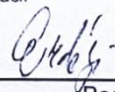

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

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.

29.04.2019

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Prehlásenie

Prehlasujem, že bakalársku prácu s názvom: „Optimalizace vstřikovacího systému pro studentskou formuli“ som vypracoval samostatne pod vedením Ing. Víta Dolečka, Ph.D. Všetky zdroje použité pri tvorbe sú uvedené v zozname použitej literatúry na konci mojej bakalárskej práce.

V Prahe

.....

Márk Erdélyi

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu tejto práce, Ing. Vítovi Dolečkovi, Ph.D., za vedenie mojej bakalárskej práce a za cenné rady a pripomienky pri jej vypracovaní.

Chcel by som sa touto cestou tiež poďakovať mojej rodine za ich podporu a trpezlivosť, ktorú preukázali počas celej doby môjho štúdia.

Moja vďaka patrí tiež mnohým súčasným i bývalým členom tímu CTU CarTech za ich pomoc, rady a konzultáciu.

Anotačný list

Meno autora:	Márk ERDÉLYI
Názov BP:	Optimalizace vstřikovacího systému pro studentskou formuli
Anglický názov:	Fuel injection system optimization for Formula Student car
Rok:	2019
Študijný program:	B2342 Teoretický základ strojního inženýrství
Ústav:	12120 — Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel
Vedúci a konzultant BP:	Ing. Vít Doleček, Ph.D.
Bibliografické údaje:	počet strán 38 počet obrázkov 24 počet tabuliek 4 počet príloh 2
Kľúčové slová:	Formula Student, Vstrekovací systém paliva, Vstrekovač paliva, Experimentálne meranie
Keywords:	Formula Student, Fuel injection system, Fuel injector, Experimental measurement
Anotácia:	Témou práce je špecifikácia požiadaviek na vstrekovacie ventily používané tímom CTU CarTech z hľadiska optimalizácie. Výber nových vstrekovačov a návrh ich zástavby do motora. Ďalej práca obsahuje metódy a výsledky experimentálneho merania charakteristických vlastností vybraných vstrekovačov. V tejto práci je tiež obsiahnutá rešerš v oblasti vstrekovacích systémov a palivových sústav vozidiel Formula Student pre tím CTU CarTech.
Abstract:	This thesis contains an overview of fuel supply and injection systems used in CTU Cartech Formula Student racecars. The theme of this thesis is also the specification of requirements on fuel injectors in terms of optimization. The goal was to choose new fuel injectors and design their installation. This thesis further contains methods of measuring their specific properties and results of these experimental measurements.

Obsah

1. Úvod	1
2. Formula Student SAE	2
3. Prostriedky pre tvorbu zápalnej zmesi zážihových motorov	3
3.1. Karburátor	3
3.2. Vstrekovacie systémy a ich rozdelenie	3
3.3. Elektromagnetické vstrekovacie ventily	5
3.3.1. Konštrukcia a princíp fungovania elektromagnetických vstrekovačov	5
3.3.2. Vlastnosti elektromagnetických vstrekovačov	6
4. Motor používaný vo Formula Student	8
4.1. Pravidla FSAE Formula Student	8
4.2. Motor používaný tímom CTU CarTech	8
5. Palivová sústava závodného auta FS.10	9
5.1. Palivová nádrž	10
5.2. Palivové čerpadlo	11
5.3. Regulátor tlaku paliva	11
5.4. Rozdeľovač paliva – rail	12
6. Špecifikácia požiadaviek na vstrekovací ventil	13
7. Výber nových vstrekovacích ventilov	15
8. Návrh zástavby nových vstrekovacích ventilov	16
8.1. Výroba a realizácia zástavby vstrekovačov do motora	16
9. Meranie charakteristických vlastností vybraných vstrekovačov	18
9.1. Ovládanie vstrekovačov	18
9.2. Zapojenie vstrekovačov	19
9.3. Princíp a metóda merania statického objemového prietoku	20
9.4. Princíp a metóda merania času oneskorenia vstrekovania	21
9.5. Výsledky merania vlastností vstrekovačov	22
10. Záver	23
Zoznam použitej literatúry	25
Zoznam použitých skratiek a veličín	26
Zoznam obrázkov	27
Zoznam tabuliek	28
Zoznam príloh	29

1. Úvod

Spaľovacie motory patria k strojom, ktoré spaľovaním palivovej zmesi transformujú chemickú energiu na energiu tepelnú. Vzniknutá tepelná energia sa následne premieňa na mechanickú prácu a časť tepelnej energie zo spaľovacieho priestoru uniká.

Palivová sústava má za úlohu dopraviť do spaľovacej komory alebo sacieho potrubia žiadané množstvo paliva v správny okamih. Prostriedkami pre tvorbu zápalnej zmesi boli v minulosti najmä karburátory. Tie boli počas 90. rokov minulého storočia takmer úplne nahradené vstrekočmi paliva kvôli zvyšujúcim sa požiadavkám na emisie a spotrebu. Vstrekovacie ventily taktiež zabezpečujú presnejšie dávkovanie paliva pri rôznych prevádzkových parametroch motora.

Na závodnom aute študentskej formule tímu CTU Cartech je na dopravu paliva tiež využitá vstrekovacia sústava, ktorej optimalizácia je cieľom tejto bakalárskej práce. Tento proces spočíva v mojom prípade v:

- Zoznámení sa s problematikou vstrekovacích systémov a palivových sústav prostredníctvom rešerše
- Špecifikácii požiadaviek vstrekočov pre používaný motor z hľadiska optimalizácie
- Výbere nových vstrekovacích ventilov, ktoré tieto požiadavky splňujú
- Vypracovaní ich zástavby do motoru tímu CTU CarTech
- Premeraní ich charakteristických vlastností.

2. Formula Student SAE

Formula Student SAE je medzinárodná študentská konštrukčná súťaž, do ktorej sú zapojené vyše 500 univerzít z celého sveta. Súťaž sa každoročne usporadúva už od roku 1976. Hlavným cieľom tejto súťaže je prehĺbenie teoretických znalostí študentov technických odborov a ich následná praktická aplikácia v oblasti konštruovania pretekárskych automobilov formulového typu. Oproti bežným pretekom sa v tomto projekte súťaží nielen v jazdných disciplínach (Dynamic Events), ale aj v tzv. Static Events. V týchto disciplínach odborníci preverujú poznatky konštruktérov o postavenom aute. Ďalej sa musí obhájiť obchodný plán predaja série 1000 kusov za rok a finančná náročnosť vozidla.

Tím CTU Cartech je tímom Fakulty strojní ČVUT, ktorý v roku 2019 stavia už 11. generáciu prototypového vozidla. Tím sa každý rok zúčastňuje závodov v rôznych štátoch Európy.



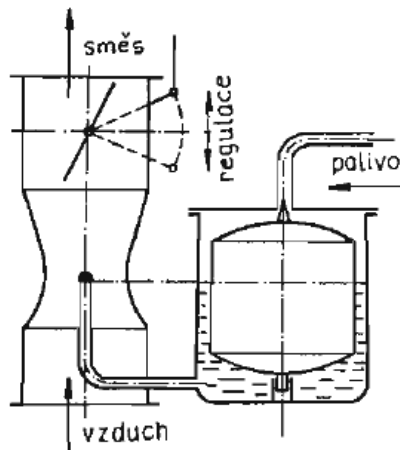
Obr. 1 – Vozidlo FS.10

3. Prostriedky pre tvorbu zápalnej zmesi zážihových motorov

Pri spaľovaní paliva je z chemického hľadiska nevyhnutné aby okysličovadlo (kyslík) malo dostatočný prístup k molekulám paliva. Z tohto dôvodu je dôležité, aby sa palivo ohrialo, rozprášilo a zmiešalo s kyslíkom. Tento proces sa realizuje tzv. prostriedkami pre tvorbu zmesi. [1]

3.1. Karburátor

Elementárny karburátor je typ zariadenia, ktorý využíva princíp Venturiho efektu (Obr. 2). S rastúcim prietokom vzduchu difúzorom klesá tlak vzduchu v tomto mieste. Zvyšujúci sa rozdiel tlaku sa prejaví ako zrýchlenie prúdenia paliva z plavákovkej komory do sacieho potrubia. Palivo sa v prúde vzduchu rozprašuje a postupne odparuje, dopomáha k tomu aj fakt, že za difúzorom rýchlosť prúdenia zmesi poklesne. Samotné tvorenie zmesi prebieha od výstupu kvapalného paliva až po koniec kompresného zdvihu. Popísaný typ jednoduchého karburátoru by vyhovoval motoru len v jednom prevádzkovom bode, lebo množstvo nasávaného vzduchu klesá s rastúcim podtlakom. Preto sa využíva niekoľko spôsobov korekcie. Karburátory však v súčasnosti prežívajú už len u malých motoroch dvojdobých a pri prenosných strojoch. [1]



Obr. 2 – Schéma jednoduchého karburátoru [1]

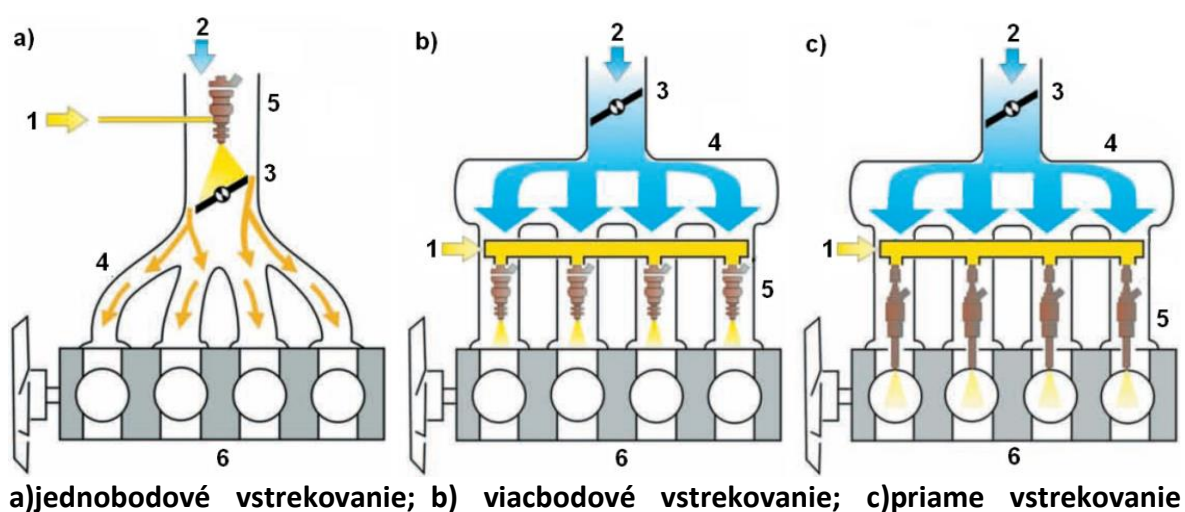
3.2. Vstrekovacie systémy a ich rozdelenie

Tieto zariadenia umožňujú vstrekať palivo pod tlakom buď do sacieho potrubia, pred sacie kanály alebo priamo do spaľovacieho priestoru. Prietok paliva je riadený dobou otvorenia trysky a prispôbuje sa prietoku vzduchu. Výhody tohto typu tvorby zápalnej zmesi sú presnejšie dávkovanie paliva, zníženie spotreby paliva, zníženie škodlivín vo výfukových plynoch, jednoduchší štart so studeným motorom a lepšie rozdelenie zmesi do

jednotlivých valcov motora. Vstrekovanie paliva podľa miesta vstrekovania sa delí na nepriame a priame.

Pri nepriamom vstrekaní dochádza k vstreknutiu paliva ešte pred sacím ventilom, a to buď do sacieho potrubia alebo do sacích kanálov motora. Z vývojového hľadiska bol karburátor najprv nahradený jednobodovým vstrekovacím ventilom umiestneným pred škrtiacou klapkou tzv. SinglePoint Injection (Obr. 3 a). Tento systém bol však nevýhodný z dôvodu nerovnomerného rozdelenia paliva medzi valce, ktorý bol spôsobený kondenzáciou paliva na stenách nasávacieho potrubia. Umiestnením samostatných vstrekovacích ventilov k jednotlivým valcom sa tento problém podaril vymedziť, takýto systém poznáme pod názvom viacbodové vstrekovanie tzv. MultiPoint Injection (Obr. 3 b). V súčasnosti má v oblasti nepriameho vstrekovania uplatnenie takmer výhradne len systém viacbodového sekvenčného vstrekovania, ktorý je riadený elektronicky.

V prípade vnútornej tvorby zmesi ide o vstrekovanie paliva priamo do spaľovacieho priestoru (Obr. 3 c). Každý valec má svoj vstrekovací ventil. Zmes paliva so vzduchom vzniká až vo valci a otvoreným sacím ventilom prúdi počas doby nasávania len vzduch potrebný k spaľovaniu. Na systém priameho vstrekovania sú kladené väčšie nároky. Vstrekovací proces prebieha vo všeobecnosti rýchlejšie a presnejšie. Ďalšími podstatnými rozdielmi sú vyšší tlak paliva a podstatne kratší čas, za ktorý je k dispozícii na dopravu paliva do spaľovacej komory. [2], [3].



Obr. 3 – Druhy vstrekovacích systémov paliva [7]

3.3. Elektromagnetické vstrekovacie ventily

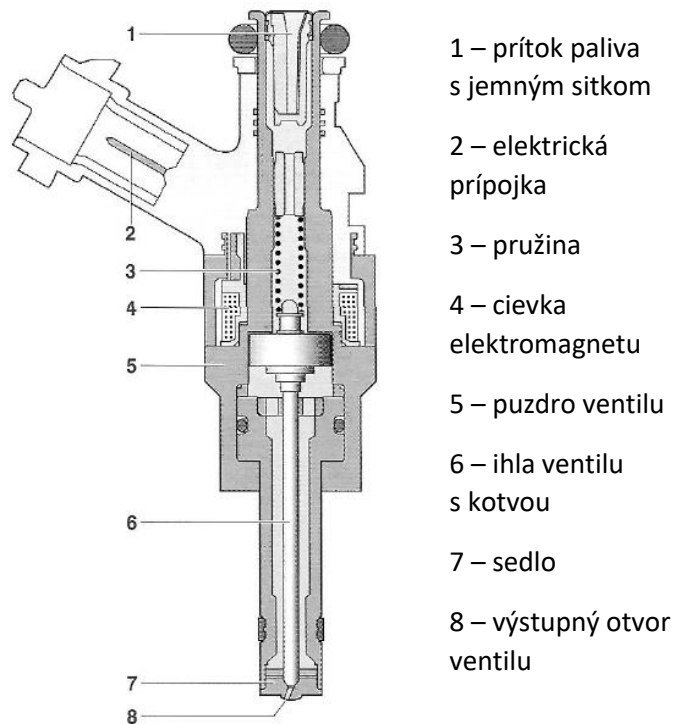
Vznik prvých mechanických vstrekovacích ventilov sa datuje do 20. rokov 20. storočia, kedy tieto vstrekovače našli uplatnenie v leteckých motoroch vojenských lietadiel. V automobilovom priemysle sa začali mechanické vstrekovacie ventily aplikovať počas 50. rokov a v nasledujúcich desaťročiach, hlavne zásluhou firmy Bosch, nastal pomerne veľký vývoj elektricky riadených vstrekovacích systémov, ktorý viedol až k súčasným systémom s elektromagnetickými ventilmi.

Elektromagnetické vstrekovače sú aktivované elektrickou riadiacou jednotkou motora, ktorá spracováva pomocou snímačov prevádzkové údaje ako natočenie kľukového hriadeľa, otáčky motora, zloženie zmesi, tlak a teplota vzduchu v sacom potrubí, poloha škrtiacej klapky, napätie akumulátoru. Na základe týchto údajov dokáže riadiaca jednotka dopočítať aktivačný signál pre vstrekovací ventil. Časovanie a dĺžka tohto signálu určuje okamih začiatku vstrekovania a dobu trvania vstrekovania. Takýto komplexný systém dokáže zabezpečiť veľmi presné dávkovanie paliva v rôznych podmienkach prevádzky motora. [3]

3.3.1. Konštrukcia a princíp fungovania elektromagnetických vstrekovačov

Väčšina dnes vyrábaných vstrekovacích ventilov má prívod paliva z hornej strany v axiálnom smere, preto je tento typ označovaný aj ako „Top Feed“ (Obr. 4). Cez tento prívod je privádzané palivo pri pracovnom tlaku. V kludnom stave, teda ak elektrickým obvodom vstrekovača neprechádza žiadny elektrický prúd, tak pôsobením sily pružiny a tlaku paliva ostáva ihla ventilu pritlačená k sedlu ventilu. V prípade, ak ventil prijme aktivačný signál a cievkou prechádza dostatočne veľký prúd, tak v okolí cievky vzniká magnetické pole, ktoré spôsobí pritiahnutie kotvy ihly smerom hore. Po nadvihnutí ihly zo sedla začína cez vstrekovač prúdiť palivo, až pokiaľ sa nepreruší elektrický signál. Následne sa ihla vstrekovača vracia späť do pôvodnej polohy.

Správna tesnosť pri sedle ventilu v kludnom stave je docielená použitím tesniacej dvojice kužel - guľička. Na konci ventilu sa nachádza krúžok so vstrekovacími otvormi, ktorých počet a usporiadanie má vplyv na smer a tvar lúča rozprašovaného paliva. V hornej časti vstrekovača býva umiestnený aj filter vo forme jemného sitka, ktorý slúži k zachyteniu možných nečistôt obsiahnutých v palive. Tie by mohli zapríčiniť trvalé poškodenie ventilu. [3,4]

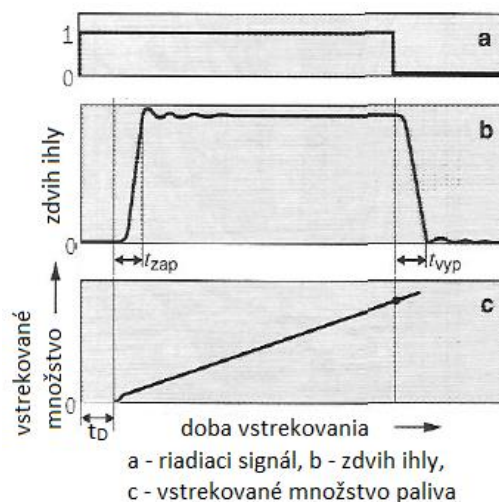


Obr. 4 – Konštrukcia elektromagnetického vstrekovača [3]

3.3.2. Vlastnosti elektromagnetických vstrekovačov

Jedným zo základných vlastností vstrekovacích ventilov je ich statický objemový prietok, ktorý nám určuje množstvo paliva pretekajúceho vstrekovačom za určitý čas pri úplnom otvorení ventilu. Väčšinou sa táto veličina udáva v jednotkách cm^3/min .

Ďalšou dôležitou charakteristikou vstrekovača je jeho reakcia na riadiaci signál. Každý vstrekovač má určité časové oneskorenie t_D začiatku otvárania ventilu oproti okamihu začiatku riadiaceho signálu (Obr. 5). Dĺžka tohto oneskorenia t_D závisí najmä na mechanickej zotrvačnosti pohyblivej časti ventilu a na indukcii magnetického poľa v cievke.

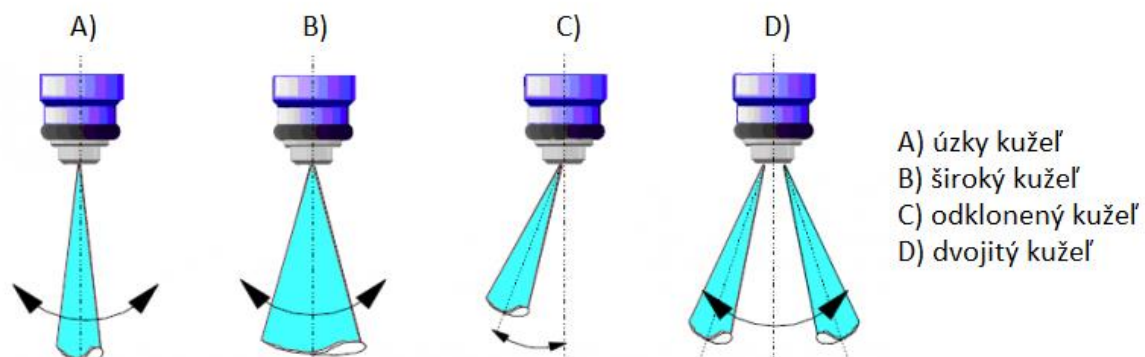


Obr. 5 – Priebeh signálov pre aktiváciu vstrekovača [3]

Elektromagnetické vstrekovacie ventily sa vyznačujú taktiež svojou impedanciou, pričom rozlišujeme vstrekovače s vysokou (10 až 16 Ω) a nízkou impedanciou (1,5 až 3 Ω). Hlavným rozdielom medzi týmito dvoma druhmi je, že vstrekovacie ventily s vysokou impedanciou sú riadené iba jednotným riadiacim napätím. Vstrekovače s nízkou impedanciou si vyžadujú vysoký počiatočný elektrický prúd, ktorý zaistí rýchle zdvihnutie ihly. Potom pri otvorení vstrekovacom ventile postačuje k udržaniu stáleho zdvihu ihly už len nižší riadiaci prúd. Takýto komplexný priebeh elektrického prúdu býva zabezpečený zložitejším riadiacim obvodom.

Úlohou vstrekovacích ventilov je aj nasmerovanie vstrekovaného paliva. Smer, tvar a rozmery lúča paliva závisia na geometrii sacieho potrubia a kanálov, umiestnení vstrekovača a rýchlosti prúdenia vzduchu. Z dôvodu splnenia týchto požiadaviek, výrobcovia ponúkajú rôzne prevedenia geometrie vstrekovaného paliva, ktorá býva väčšinou definovaná ako kužeľový priestor, cez ktorý pri vstrekovaní prechádza 70 až 80 percent objemu paliva (Obr. 6).

Literatúra použitá v tejto kapitole: [3],[4],[5].



Obr. 6 – Typy geometrie vstrekovaného paliva [8]

4. Motor používaný vo Formula Student

4.1. Pravidla FSAE Formula Student

Pri konštrukcii vozidiel v kategórii Formula Student Combustion Vehicle je potrebné sa riadiť pravidlami súťaže, ktoré sa samozrejme vzťahujú aj na spaľovací motor v týchto autách. Použitý spaľovací motor musí byť piestový, štvordobý, ďalej musí spĺňať podmienku maximálneho zdvihového objemu 710 cm^3 . Ako palivo sa smie používať benzín RON 98 alebo etanol E85, v závislosti od paliva je nutné do sacieho traktu motora integrovať restriktor. Ten má za cieľ obmedziť prietok vzduchu do motora, a tým znižuje jeho výkon. Pri použití RON 98 ako paliva je maximálny geometrický priemer restriktora 20 mm a pre E85 je to 19 mm. Pravidlá dovoľujú atmosférické plnenie, ale aj preplňovanie.

4.2. Motor používaný tímom CTU CarTech

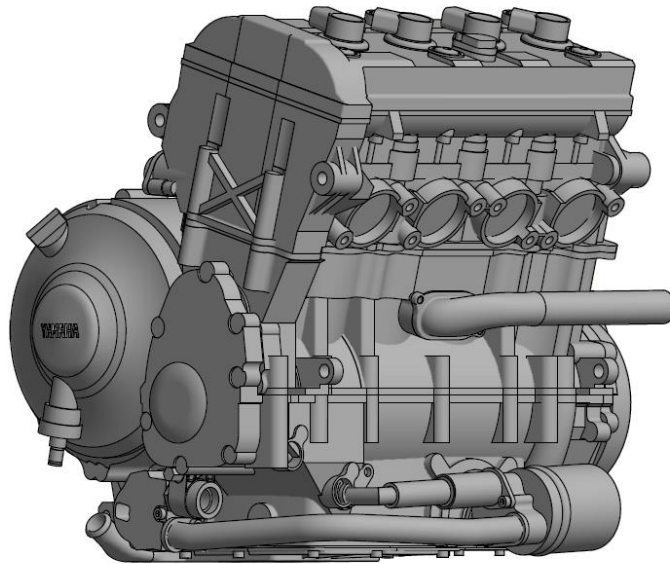
Tím CTU CarTech si už pri konštruovaní prvej generácii vozidla Formula Student zvolilo štvorvalcový radový motor zo športového motocyklu Yamaha YZF-R6, typ 2C0 alebo 13S. Medzi nespochybniteľné prednosti tohto motora patria vysoká spoľahlivosť a cenová dostupnosť.

Parametre sériového motora Yamaha YZF-R6 poskytnuté výrobcom	
Typ motora	Zážihový, štvordobý
Zdihový objem	599 cm^3
Typ rozvodu	DOHC
Vrtanie x zdvih	67 x 42,5 mm
Kompresný pomer	12,8:1

Tab. 1 – Základné parametre sériového motora Yamaha YZF-R6

V dobe od vzniku tímu v roku 2008 až do súčasnosti sa v rámci rozsiahleho vývoja vykonali úpravy, ktoré docielili lepšie využitie tohto typu motora na účely súťaže Formula Student. Patria sem návrh a konštrukcia vlastného sacieho a výfukového systému, pretože tieto sériové komponenty nemôžu byť použité vzhľadom na zástavbu a pravidlá súťaže. Modifikáciou mazacej sústavy s mokrou olejovou vaňou na systém s využitím suchej olejovej vane sa dosiahlo nižšieho uloženia celého motora v rámci auta. To bolo podstatné nielen z hľadiska celkového ťažiska, ale aj kvôli obálkam vnútri ktorých musia byť niektoré časti umiestnené. Ďalšia zásadná úprava vychádza z restriktora, ktorý sa

začne aerodynamicky upchávať pri približne 10 500 otáčkach za minútu, preto sú prevádzkové otáčky nášho motora znížené na hodnoty od 6 500 min⁻¹ do 10 500 min⁻¹. Takáto zmena si vyžadovala návrh nového profilu vačkových hriadeľov, ktorý umožňuje lepšie plnenie a zvýšenie krútiaceho momentu pri nižších otáčkach.

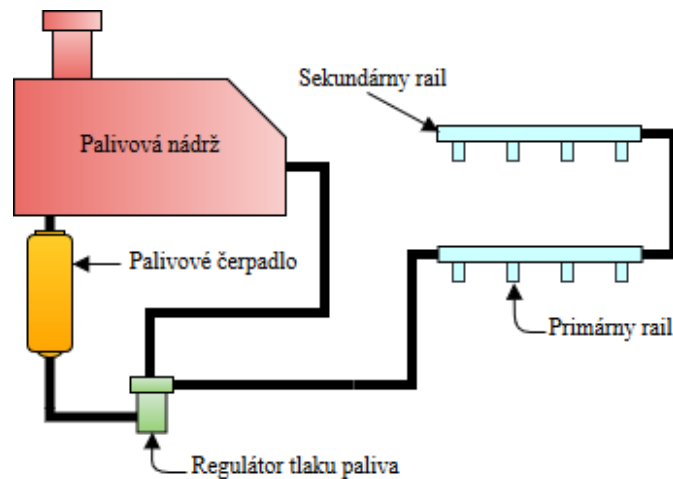


Obr. 7 – Motor FS.10

5. Palivová sústava závodného auta FS.10

Hlavnými časťami sú palivová nádrž, elektrické palivové čerpadlo, regulátor tlaku paliva, rozdeľovač paliva – rail a elektromagnetické vstrekovacie ventily. Palivová sústava použitá na vozidle FS.10 má usporiadanie podľa Obr. 8. Regulátor tlaku paliva je umiestnený za palivovým čerpadlom v blízkosti nádrže. Nadbytočné palivo, ktoré sa do regulátoru dostáva je vedené krátkym vedením späť do nádrže. Regulátor tlaku paliva teda zaisťuje, aby mali vstrekovače k dispozícii vždy palivo s konštantným tlakom.

Riadiaca jednotka EFI Euro-4 umožňuje použitie dvoch radov vstrekovacích ventilov, každému valcu prislúcha dvojica vstrekovačov. Jeden je umiestnený v sacom potrubí, približne 90 mm od sacieho ventilu a nazýva sa primárny. Druhý, sekundárny vstrekovací ventil je uložený v pléne sacieho traktu a je nasmerovaný do nátrubku. Vzdialenosť sekundárneho vstrekovača od hlavy valcov činí asi 220 mm. Sekundárne vstrekovače sú aktivované pri vyšších otáčkach motora, kedy primárne nedokážu za tak krátku dobu dostatočne pripraviť homogénnu zmes paliva s nasávaným vzduchom.



Obr. 8 – Zjednodušená schéma palivovej sústavy FS.10

5.1. Palivová nádrž

Počiatočná časť palivového systému je nádrž, z ktorej za žiadnych okolností nesmie unikať palivo do okolia. Musí byť bezpečne uchytená tak, aby uchytenie mohlo zabezpečiť určitú flexibilitu voči ostatnej časti vozidla. Nesmie však niesť žiadne vonkajšie zaťaženie. Umiestnením palivovej nádrže a ostatných častí systému musí byť zabezpečená minimálna vzdialenosť 50 mm od hociktorej časti výfukovej sústavy a dostatočná ochrana od akéhokoľvek zdroja tepla. Ďalej musí byť opatrená prívodom vzduchu z okolia za účelom udržiavania atmosférického tlaku vzduchu v nádrži nad hladinou paliva. Inak by v nádrži vznikol pôsobením čerpadla podtlak, ktorý by zabraňoval ďalšiemu čerpaniu pohonnej hmoty. Pre prípad prevrátenia vozidla musí byť v prívode vzduchu zabudovaný aj spätný ventil. Celkový objem nádrže je navrhnutý podľa požiadaviek spotreby počas hlavných pretekov na 22 km.

Tím CTU CarTech využíva najmä kvôli nízkej hmotnosti lepenú dvojdielnu uhlíkovú kompozitnú nádrž vyrobenú z presýtenej uhlíkovej tkaniny tzv. prepregu. Technológia výroby spočíva v laminácii jednotlivých vrstiev na formy rezané vodným lúčom a následnom vytvrdzovaní v peci. Z vnútornej strany je ešte dodatočne aplikovaná vrstva epoxidovej živice, ktorá zaisť tesnosť nádrže. Dôležitou súčasťou nádrže je špeciálny zásobník paliva – vložka uložená na dne. Má vysokú schopnosť nasiaknuť kvapalinu a zamedziť tak odlievaniu paliva pri jazde monopostu na závodnej trati najmä v zákrutách alebo pri náhlej zmene rýchlosti. Je tiež náhradou separátneho palivového filtra pred čerpadlom a filtruje častice väčšie ako 15 mikrónov.

5.2. Palivové čerpadlo

Palivové čerpadlo má za každých prevádzkových okolností dodávať motoru dostatočné množstvo paliva pri tlaku potrebnom k vstrekovaniu. Rozlišujeme mechanické a elektrické čerpadlá. Na vozidle FS.10 a aj predošlých generáciách bolo ako čerpadlo použité elektrické benzínové čerpadlo radu GSL od firmy Walbro (**Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.**). Medzi jeho výhody patrí spoľahlivosť, malé zástavbové rozmery a hmotnosť. Ďalšia jeho výhoda vyplýva z umiestnenia mimo nádrže, ktoré umožňuje v prípade poruchy rýchlu výmenu tejto súčasti palivového systému. Vzdialenosť od nádrže by však nemala prekročiť hodnotu 0,6 m. Toto čerpadlo funguje na princípe výstredníkového čerpadla tzv. gerotoru (Obr. 9). Je tvorený dvojicou excentrických rotorov, pričom vnútorný má o jeden zub menej ako vonkajší a vnútorný rotor je poháňaný jednosmerným elektromotorom.



Obr. 10 – Palivové čerpadlo Walbro GSL [9]

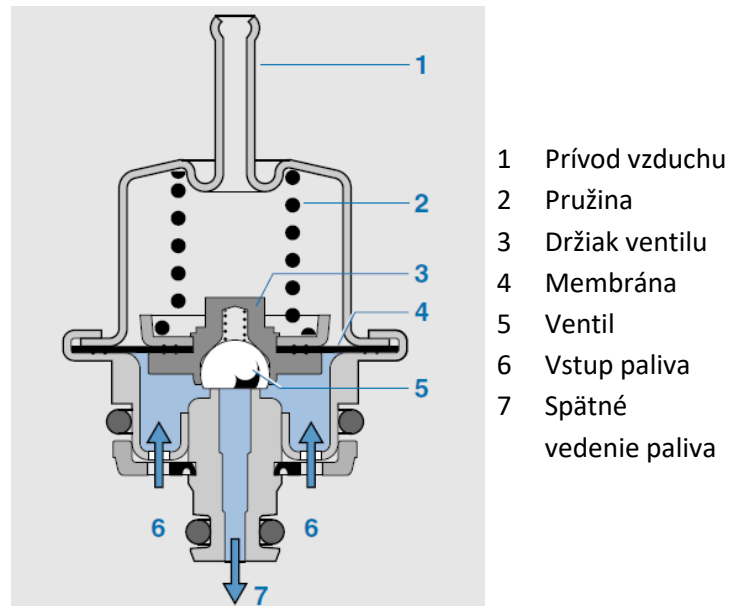


Obr. 9 – Mechanizmus výstredníkového čerpadla Walbro GSL [10]

5.3. Regulátor tlaku paliva

Regulátor tlaku paliva je zaradený priamo za palivovým čerpadlom. Jeho funkciou je udržiavanie konštantného tlaku paliva a prebytočné palivo prepúšťať späť do nádrže. Princíp fungovania vyplýva z jeho konštrukcie, ktorá pozostáva z membrány (Obr. 11). Pružná gumová membrána rozdeľuje teleso regulátoru na dve časti. V jednej komore sa nachádza pružina, ktorá tlačí svojou silou na membránu. Z druhej strany membrány pôsobí silou natlakované palivo. Ak tlak paliva prekročí otvárací tlak regulátoru, otvorí sa ventil a krátkym spätným vedením začne prúdiť palivo do nádrže až do chvíle, kým sa sily pôsobiace na oboch stranách membrány nevyrovnejú. U palivového systému vozidiel tímu CTU Cartech, kedy umiestnenie regulátoru je v blízkosti nádrže, je tlak paliva regulovaný na

konštantnú hodnotu voči okoliu, takže v komorovej membráne pôsobí len atmosférický tlak. [4]



Obr. 11 – Konštrukcia regulátoru tlaku paliva [4]

5.4. Rozdeľovač paliva – rail

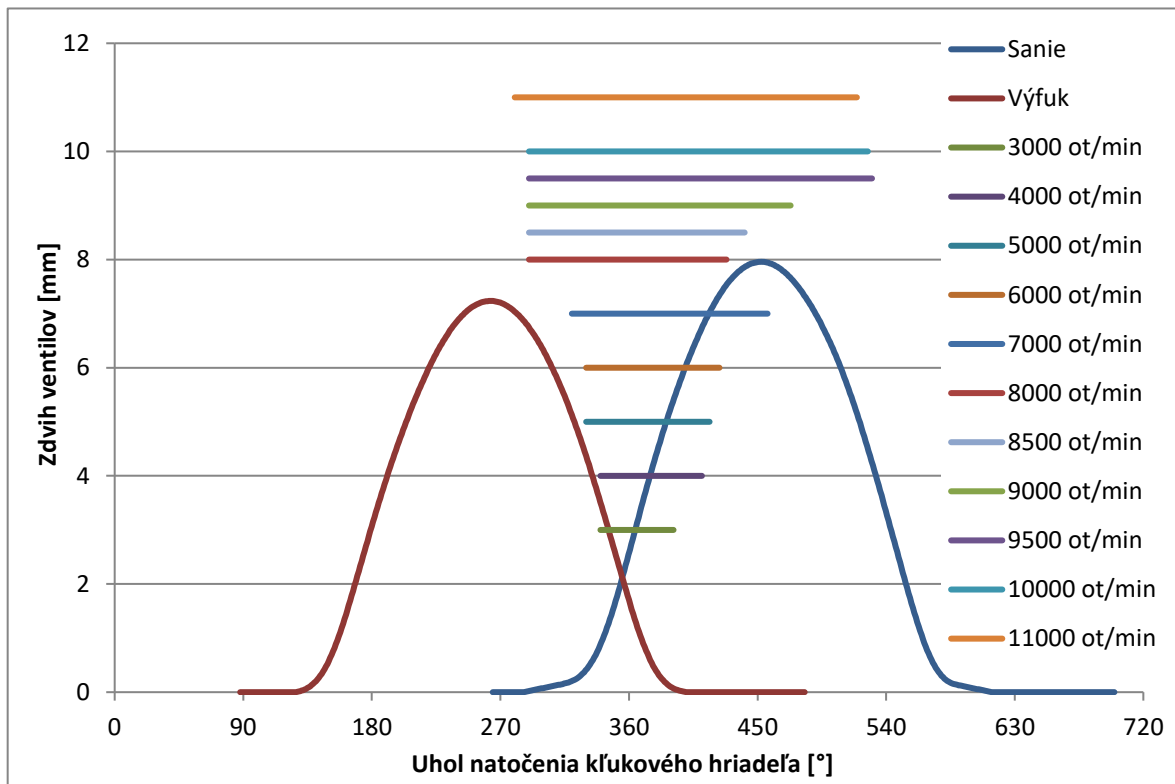
Táto časť palivovej sústavy má viacero účelov, ktoré sú predovšetkým pevné uchytenie vstrekočav a rovnomerné zásobovanie vstrekovacích ventilov natlakovaným palivom. Objem railu musí byť dostatočne veľký, aby pri periodickom vstrekaní do jednotlivých valcov nedochádzalo k tlakovým pulzáciám, ktoré by mohli mať negatívny vplyv na presnosť odmeriavania paliva pri jednotlivých vstrekoch. Na monoposte FS.10 sú použité zvarané hliníkové rozdeľovače paliva kvôli úspore hmotnosti, ich 3D model je zobrazený na Obr. 12.



Obr. 12 – 3D model rozdeľovača paliva FS.10

6. Špecifikácia požiadaviek na vstrekovací ventil

Ako už bolo spomenuté, v súčasnosti sa využívajú dva rady vstrekovacích ventilov. Zatiaľ čo primárne vstrekovače sú aktivované v celom rozsahu používaných otáčok, sekundárne začínajú vstrekovať až od vyšších otáčok. Na Obr. 13 je vyneseny priebeh zdvihu sacieho a výfukového ventilu v závislosti na uhlu natočenia kľukového hriadeľa, pričom 0° značí hornú úvrať piestu na začiatku expanzie. Vodorovnými úsečkami sú zobrazené fázovania a doby trvania vstreku primárnych vstrekovačov v uhloch.



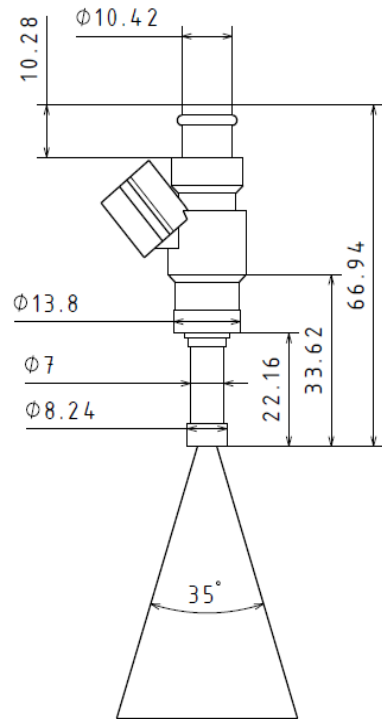
Obr. 13 – Fázy vstrekovania primárnych vstrekovačov pri rôznych otáčkach

Z tohto grafu je zrejmé, že vstrekovanie paliva prebieha aj v dobe prekrytia ventilov, teda ak sú oba ventily súčasne otvorené. Tento jav môže viesť k úniku čerstvej zmesi do výfuku, čo môže mať nepriaznivý vplyv na spotrebu paliva. V súťaži Formula Student je jedným z disciplín práve meranie spotreby paliva počas hlavného závodu. Z tohto dôvodu by bolo optimálne pri zachovaní rovnakého množstva vstrekaného paliva skrátiť čas trvania vstreku a zároveň posunúť počiatok vstrekovania. Znamená to, že by sa mal zvýšiť objemový prietok pri vstrekaní. K tomu môžeme dospieť dvoma spôsobmi, buď použitím nových vstrekovačov s väčším prietokom alebo zvýšením tlaku vstrekovania. Ďalej sa budem venovať v tejto práci prvej z možností – výmenou primárnych vstrekovačov

Na začiatok je potreba špecifikovať vlastnosti vstrekovačov používaných doteraz. Jedná sa o pôvodné primárne vstrekovacie ventily motocyklu Yamaha YZF-R6 - 2C0 (Obr. 14). Dôležitými parametrami sú jeho zástavbové rozmery, geometria vstrekaného paliva. Ďalej je potreba určiť ich statický objemový prietok. Musia byť tiež zohľadnené ich elektrické vlastnosti ako napr. ich impedancia, ktorá je dôležitá z hľadiska ich riadenia



Obr. 14 – Pôvodný vstrekovač YAMAHA R6

Špecifické vlastnosti pôvodných vstrekovacích ventilov	
Zástavbové rozmery a geometria vstrekaného paliva	
Statický objemový prietok odmeraný pri konštantnom vstrekovacom tlaku 3 bar	235 cm ³ /min
Impedancia vstrekovača	12,5 Ω

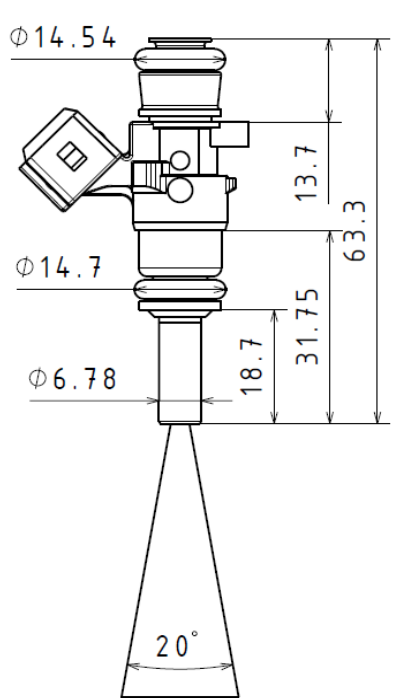
Tab. 2 – Vlastnosti vstrekovacích ventilov Yamaha YZF-R6

7. Výber nových vstrekovacích ventilov

Požiadavky na nové vstrekovacie ventily vychádzajú z vlastností pôvodných vstrekočavov, ktoré sú popísané v predošlej kapitole. Najdôležitejšou z nich je zvýšený objemový tok vstrekovanej paliva. Pretože vstavaný riadiaci obvod v používanej riadiacej jednotke EFI Euro-4 je určený len pre vstrekočave s vysokou impedanciou, nové vstrekočave musia byť taktiež vysokoimpedantné. Zástavbové rozmery vybraných vstrekočavov by mali približne odpovedať tým pôvodným, tým pádom by na ostatných častiach motorovej sústavy, a to hlavne na sacom trakte, nemuseli byť vykonané tak rozsiahle zmeny. Do úvahy sa brala aj ich cenu a celkovú dostupnosť. Nutné je spomenúť, že vo väčšine prípadov výrobcovia vstrekočavov neuvádzajú parametre svojich modelov, čo len ďalej obmedzuje možnosti výberu.

Po zohľadnení vyššie vymenovaných faktorov sa dospelo k výberu vstrekovacích ventilov Bosch Motorsport EV14 varianta CKxT – 0 280 158 038. Sériá elektromagnetických vstrekočavov EV14 sa vyznačuje svojou kompaktnosťou, nízkou hmotnosťou a nízkou náchylnosťou k tvorbe bublín z benzínových par.

Literatúra použitá v tejto časti: [6].

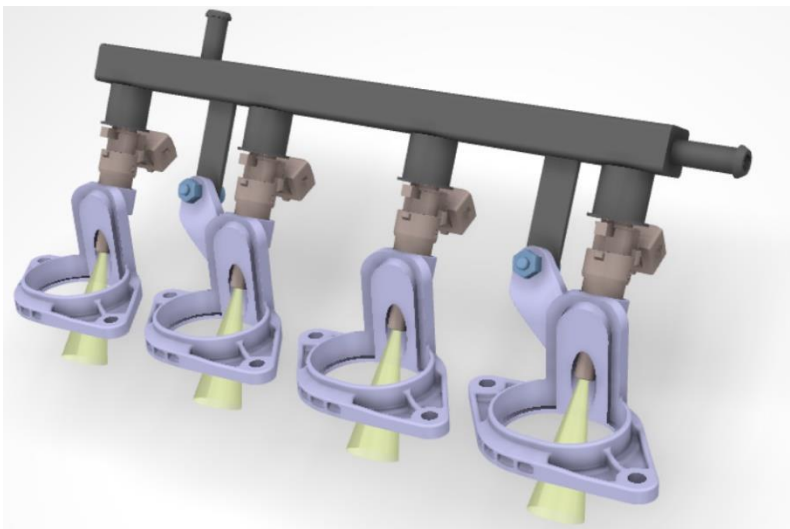
Vlastnosti vstrekočavov BOSCH 0 280 158 038	
Zástavbové rozmery a geometria vstrekovanej paliva	
Statický objemový prietok výrobcom daný pri konštantnom vstrekovacom tlaku 3 bar	347 cm ³ /min
Impedancia vstrekočava	12 Ω

Tab. 3 – Vlastnosti vstrekovacích ventilov Bosch Ev 14 0 280158 038

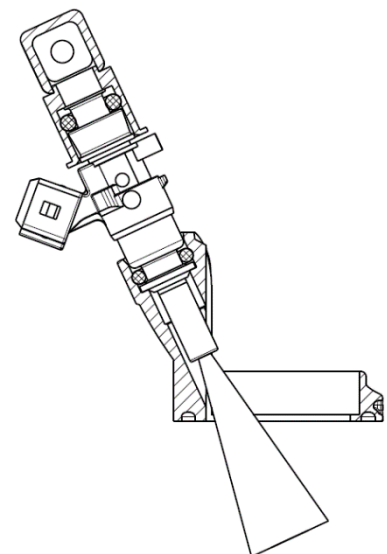
8. Návrh zástavby nových vstrekovacích ventilov

Pri konštrukčnom návrhu zástavby vybraných vstrekovačov je žiaduce, aby smerovanie rozprášeného paliva a miesto vstrekovania ostalo zachované. Je potreba aby nové vstrekovacie ventily boli utesnené na oboch koncoch pri vstrekovacom tlaku 3 bar. Pri ich zástavbe do sacieho potrubia je nutné dbať tiež na to, aby ich poloha v axiálnom smere bola zaistená, lebo natlakované palivo pôsobí svojou silou na vstrekovače práve v tomto smere.

Podľa návrhu zástavby sú vstrekovače na strane prívodu paliva uložené v rozdeľovači paliva. Na opačnej strane sú vstrekovače uložené priamo v prírubách sacieho traktu. Cez tieto príruby sa pripojuje celá sacia sústava spolu so vstrekovačmi k hlave valcov motora (Obr. 16). Funkčné tesniace plochy na oboch stranách vstrekovača sú realizované pomocou O-krúžkov, ktoré sú dodávané spolu so vstrekovacími ventilmi (Obr. 15). Rozmery dier, v ktorých sú vstrekovače uložené sa použili podľa odporúčania výrobcu. Axiálna poloha vstrekovačov je riešená spojením úchytov rozdeľovača paliva s prírubami sacieho systému na dvoch miestach skrutkovým spojom skrutka – matica so závitom M5.



Obr. 16 – Pohľad na uloženie vstrekovačov



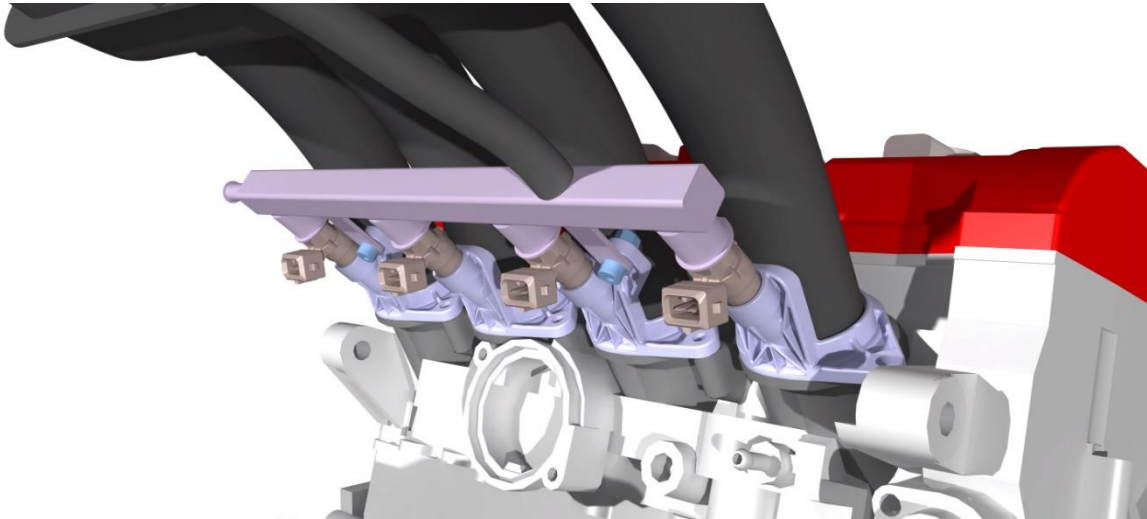
Obr. 15 – Pohľad na uloženie vstrekovača v reze

8.1. Výroba a realizácia zástavby vstrekovačov do motora

Výroba jednotlivých častí bola zvolená s ohľadom na možnosti tímu CTU CarTech. Na výrobu hliníkových prírub saciej sústavy bola vybraná technológia selektívneho sintrovania laserom, ktorá bola tímu poskytnutá v rámci sponzorskej spolupráce.

Pri výrobe rozdeľovača paliva bol ako hlavný profil použitý hliníkový štvorcový profil s hrúbkou steny 1,8 mm, do ktorého sa vyvrtali diery na prípojky. Pri vrtaní dier pre prípojky

vstrekovačov je zásadné dbať na presnosť ich vzájomnej osovej vzdialenosti, ktorá je daná osovou vzdialenosťou sacích otvorov v hlave valcov. Prípojky vedenia paliva a vstrekovacích ventilov boli vyrobené sústružením z hliníkových tyčových polotovarov. Koncovky rozdeľovača paliva a úchyty k prírubám sa vyrezali laserovým lúčom. Poslednou časťou výroby rozdeľovača paliva bolo zvarenie jednotlivých častí. S ohľadom na materiál a hrúbku steny zváraných častí sa zvolilo zváranie metódou TIG.



Obr. 17 – Model návrhu zástavby nových vstrekovacích ventilov

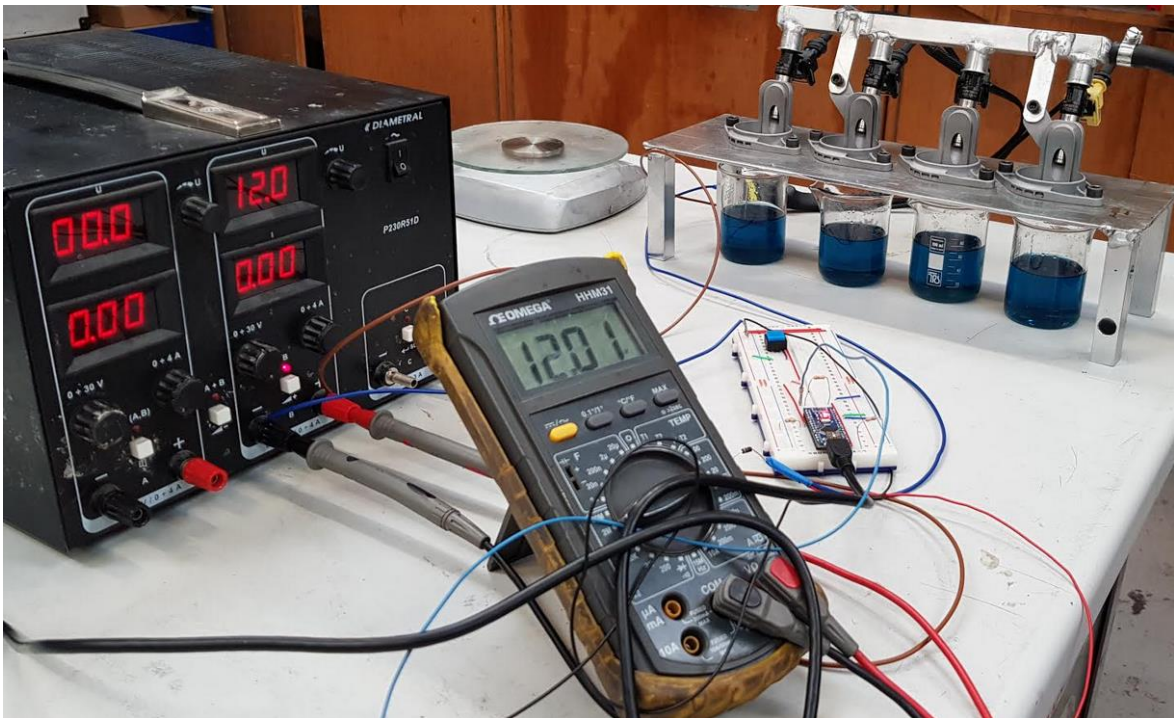


Obr. 18 – Zástavba nových vstrekovačov na motore Yamaha R6 tímu CTU CarTech

9. Meranie charakteristických vlastností vybraných vstrekovačov

Ako už bolo spomenuté v kapitole 3.3.2 pri riadení elektromagnetických vstrekovacích ventilov je dôležité poznať ich vlastnosti, a to hlavne ich statický objemový prietok a časové oneskorenie vstrekovača na riadiaci signál.

Odmeriavanie množstva vstrekovaného paliva je riadené dobou trvania vstrekovania. Celkové množstvo paliva pri jednom vstreknutí je súčin statického prietoku a času, kým je ventil otvorený. Ďalej riadiaca jednotka EFI Euro-4 používaná tímom CTU CarTech pracuje aj s korekciou vstrekovania na základe časového oneskorenia vstrekovača v závislosti napätí akumulátoru. Z tohto dôvodu bolo tiež podstatné zistiť ako sa rôznymi napájacími napätiami mení časové oneskorenie.

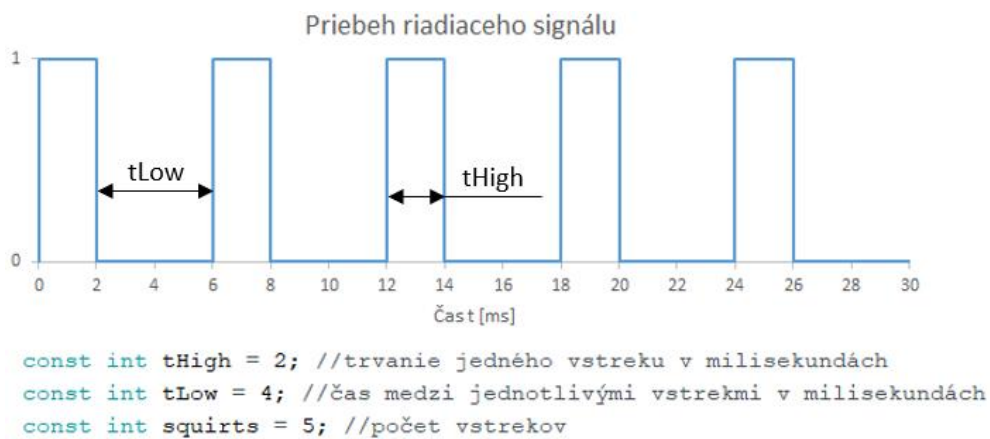


Obr. 19 – Meracia zostava

9.1. Ovládanie vstrekovačov

Vybrané vstrekovače Bosch EV14 sú vysokoimpedantné. Majú teda ovládanie, ktoré spočíva v zasielaní dvojhodnotového aktivačného signálu riadiacou jednotkou. V závislosti od hodnoty tohto signálu potom vstrekovačom tečie alebo netečie prúd, ktorý má na starosť otváranie vstrekovacieho ventilu. Šírkou pulzu je kontrolovaná doba, kým je vstrekovač otvorený.

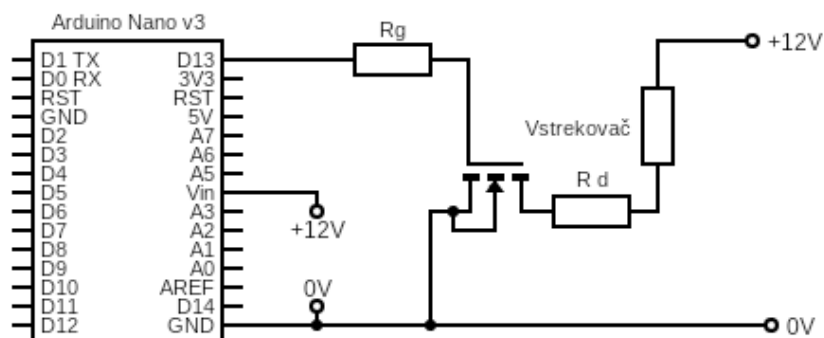
Kvôli zjednodušeniu riadenia vstrekovačov sa ako ovládač zvolil programovateľný mikrokontrolér Arduino, ktorý dokáže prijímať a posielať informácie na základe vopred vytvoreného a nahraného programu. Arduino má vlastný programovací jazyk a voľne dostupné programovacie prostredie. Po zoznámení sa so softvérom sa vytvoril program, ktorý periodicky posiela vstrekovačom signál na otvorenie ventilu. Vid' Príloha 1. V rámci tohto programu sa dajú jednoducho meniť konštanty, ktoré majú na starosť počet opakovaní vstrekú, šírku pulzu a čas medzi jednotlivými vstrekmi, keď ostáva vstrekovač zatvorený (Obr. 20).



Obr. 20 – Príklad priebehu riadiaceho signálu pri určitom nastavení parametrov

9.2. Zapojenie vstrekovačov

Samotný mikrokontrolér bol napájaný z osobného počítača a zdroj napájacieho napätia bol regulovateľný jednosmerný laboratórny zdroj Diametral. Do elektrického obvodu bol zapojený MOSFET tranzistor s kanálom typu N (Obr. 21). Správnosť zapojenia bolo možné kontrolovať pripojením osciloskopu do obvodu. Konštantný tlak paliva 3 bar v rozdeľovači bol zaistený palivovou sústavou vozidla FS.10, pričom z dôvodu časovej náročnosti experimentu bolo palivové čerpadlo napojené tiež na laboratórny spínaný zdroj.



Obr. 21 – Schéma zapojenia vstrekovačov

9.3. Princíp a metóda merania statického objemového prietoku

Meranie statického objemového prietoku nových vstrekočavov prebiehalo nasledovne, v programe sa nastavili parametre tak aby vstrekovanie prebiehalo kontinuálne určitú dobu. Následne sa odvážila hmotnosť vstreknutého paliva. Z nasledujúceho vzťahu sa napokon určil statický objemový prietok:

$$\dot{V} = \frac{m_c}{\rho_p \cdot t_c},$$

kde

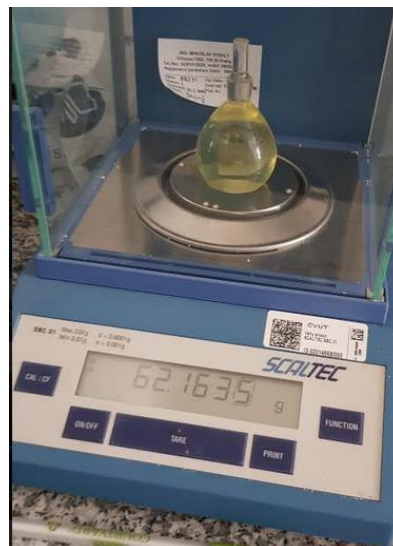
\dot{V} je statický objemový prietok vstrekočava [cm³·min⁻¹]

m_c je celková hmotnosť vstreknutého paliva [g]

ρ_p je hustota vstreknutého paliva [g·cm⁻³]

t_c je celkový čas vstrekovania [min]

Počas merania bol tlak paliva konštantne 3 bar. K docieleniu vyššej presnosti výsledkov sme rovnaké meranie zopakovali viackrát a výsledný statický objemový prietok sme dopočítali ako aritmetický priemer prietokov z jednotlivých meraní. Hustotu sme zisťovali tak, že sme odmernú banku naplnili palivom, odvážili sme ju na presných laboratórnych váhach a z hodnôt hmotnosti a objemu meraného paliva sme dopočítali jej hustotu (Obr. 22 **Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.**).



Obr. 22 – Meranie hustoty paliva

9.4. Princíp a metóda merania času oneskorenia vstrekovania

Ako to už bolo popísane v kapitole 3.3.2, oneskorenie vstrekovania je čas od počiatku riadiaceho signálu na otvorenie vstrekača až po okamih, kedy sa vstrekačový ventil začne reálne otvárať. Na meranie času oneskorenia sa tiež použil vopred vytvorený program. Princíp merania spočíval v periodickom vysielaní otváracieho napätového pulzu do vstrekača. Po dobehnutí programu sa odvážila celková hmotnosť vstreknutého paliva a predelila počtom opakovaní pulzu – počtom vstreknutí, tým pádom sme zistili priemerné množstvo vstreknutého paliva pre jedno vstreknutie (Tab. 4). Meranie sme vykonali pre rôzne šírky pulzov.

Menovité napájacie napätie $U_v = 12 \text{ V}$, tlak paliva $p_p = 3 \text{ bar}$, hustota paliva $\rho_p = 0,8 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$					
Šírka pulzu (tHigh) [ms]	Čas medzi jednotlivými pulzami (tLow) [ms]	Počet vstrekov [-]	m_c [g]	V_c [cm ³]	V_v [cm ³]
2	20	5000	22	27,5	0,0055
5	20	5000	77	96,25	0,01925
10	20	5000	173	216,25	0,04325

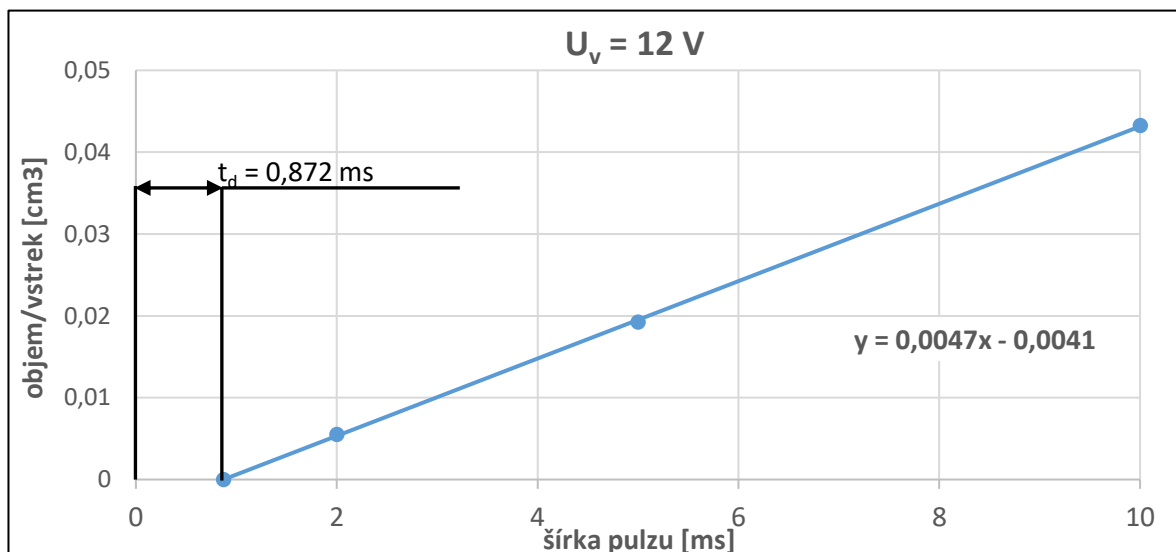
m_c - celková hmotnosť vstreknutého paliva

V_c - celkový objem vstreknutého paliva

V_v - objem paliva na jeden vstrek

Tab. 4 – Namerané hodnoty pri napájacom napätí vstrekačov $U_v = 12 \text{ V}$

Získanú množinu bodov sme vyniesli do grafu závislosti množstva vstreknutého paliva pre jeden vstrek na šírke pulzu (Obr. 23). Z grafu je zrejmé, že priamka spájajúca tieto body pretína vodorovnú os na jej kladnej polovici. Vzdialenosť tohto priesečníka od počiatku značí práve čas oneskorenia t_d vstrekača pre dané napájacie napätie.

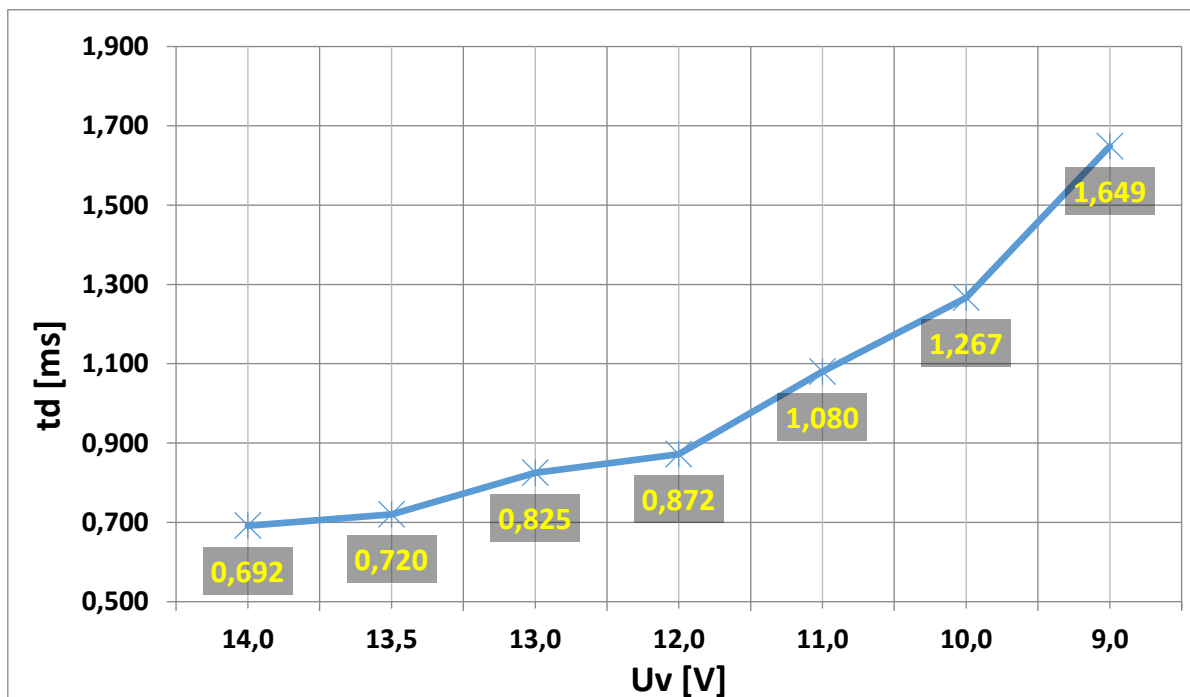


Obr. 23 – Graf závislosti objemu paliva na jeden vstrek na šírke pulzu pri $U_v = 12 \text{ V}$

9.5. Výsledky merania vlastností vstrekočav

Pri meraní statického prietoku sme nechali vstrekočače striekať kontinuálne po dobu 30 s, za túto dobu sa v nádobe nazbieralo v priemere 128 g paliva. Pri odmeranej hustote paliva $0,8 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ takéto množstvo paliva odpovedá objemu 160 cm^3 . Výsledný nameraný statický objemový prietok je teda $320 \text{ cm}^3\cdot\text{min}^{-1}$, čo je o $27 \text{ cm}^3\cdot\text{min}^{-1}$ menej ako uvádza samotný výrobca.

Meranie času oneskorenia vstrekovania sa vykonalo rovnakým spôsobom pre rôzne napájacie napätia vstrekočav. Tabuľky s nameranými hodnotami sú v Prílohe 2. Výsledná závislosť času oneskorenia na napájacom napätí je zobrazená na grafe (Obr. 23). So znižujúcim sa napätím narastá čas oneskorenia počiatku vstrekovania. Je to spôsobené tým, že nižším elektrickým prúdom sa indukuje slabšie elektromagnetické pole. Získané hodnoty sa môžu následne použiť pri kompenzácii vstrekovania riadiacou jednotkou.



Obr. 24 – Graf závislosti oneskorenia vstrekovania na napájacom napätí

10. Závěr

V závere tejto práce sú zhrnuté splnené ciele, ktoré boli vopred stanovené, ďalej sú tu zmienené odporúčenia z hľadiska budúceho vývoja.

Splnené ciele tejto bakalárskej práce sú nasledovné:

- Vytvorenie adekvátnej rešerše na tému vstrekovacích ventilov a palivovej sústavy používanej v závodných vozidlách CTU CarTech

Vytvorená rešerš umožnila prehĺbiť si poznatky v danej problematike a na základe získaných informácií sa mohlo pristúpiť k vypracovaniu ďalších bodov tejto práce.
- Vypracovanie požiadaviek na nové vstrekovacie ventily z hľadiska optimalizácie

Z dôvodu dlhej doby prekrytia sacích a výfukových ventilov hrozí únik čerstvej zmesi paliva a vzduchu do výfukov ešte pred jej zapálením. Riešením môže byť použitie nových vstrekovacích ventilov s väčším prietokom, tým by sa skrátil vstrekovací čas. Táto zmena by pri správnom načasovaní vstrekovania mala mať pozitívny vplyv na spotrebu paliva.
- Výber nových vstrekovacích ventilov na základe špecifikovaných požiadaviek

Vybrané vstrekovacie Bosch EV 14 CKxT majú podľa meraní o $85 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ väčší objemový prietok ako doteraz používané vstrekovacie. Nové vstrekovacie sú tiež plne kompatibilné s doteraz používanou riadiacou jednotkou.
- Vytvorenie konštrukčného návrhu zástavby vybraných vstrekováčov do motora Yamaha YZF-R6 používaného tímom CTU CarTech

Návrh zástavby vybraných vstrekováčov spočívala v ich integrácii do navrhnutého modelu kompozitného uhlíkového sacieho traktu. Pri návrhu bola snaha o zachovanie vzdialenosti a nasmerovania vstrekováča voči sacím kanálom v hlave motora. Konštrukčný návrh prebehol v súlade s pravidlami súťaže Formula Student pre rok 2019.



- Zmeranie charakteristických vlastností nových vstrekovacích ventilov, ktorých výsledky sa môžu aplikovať pri ich použití v aute

Poslednou časťou tejto práce bolo premeranie charakteristických vlastností vstrekovačov, a to najmä statického objemového prietoku a času oneskorenia začiatku vstrekovania. Za účelom tohto merania bolo navrhnuté a vyrobené meracie stanovište. Vstrekovacie ventily boli ovládané mikrokontrolérom, ktorý vstrekovací proces riadil cyklicky podľa pripraveného programu. Vytvorená meracia zostava môže v budúcnosti slúžiť aj rôznym experimentálnym meraniam vstrekovačov v rámci tímu CTU CarTech.

Do budúca by bolo vhodné vykonať porovnávacie meranie mernej spotreby paliva v závislosti na otáčkach motora pre oba vstrekovače. Podľa výsledkov tohto merania by sa dal overiť predpokladaný pokles spotreby paliva pri použití nových vstrekovacích ventilov s väčším prietokom. Z dôvodov technických porúch na brzdovom stanovišti sa žiaľ tieto merania nemohli uskutočniť ešte pred ukončením tejto práce.

Zoznam použitej literatúry

- [1] MACEK, J. *Spalovací motory 2*. Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-05015-6.
- [2] HEYWOOD, John B. *Internal combustion engine fundamentals*. New York: McGraw-Hill, c1988. ISBN 00-702-8637-X.
- [3] HROMÁDKO, J. *Spalovací motory*. GRADA, 2011. ISBN 978-80-247-3475-0.
- [4] ROBERT BOSCH GmbH. *Gasoline-engine management – Basics and components*, Stuttgart: Robert Bosch GmbH, 2001.
- [5] VAN BASSHUYSEN, Richard; SCHÄFER, Fred. *Internal combustion engine handbook: basics, components, systems, and perspectives*. SAE International, 2004. ISBN 0-7680-1139-6.
- [6] Injection valve EV14, Bosch Motorsport [online]. Dostupné z: http://www.bosch-motorsport.de/content/downloads/Raceparts/Resources/pdf/Data%20sheet_67797771_Injection_Valve_EV_14.pdf
- [7] Druhy vstrekovacích systémov [online]. Dostupné z: <http://www.autolexicon.net/cs/articles/mpi-multi-point-injection/>
- [8] Typy geometrie vstrekovaného paliva [online]. Dostupné z: <http://vpr-engineering.nl/en/tech-talk/06-gdi-vs-pfi-injectors-mechanics/>
- [9] Palivové čerpadlo Walbro GSL [online]. Dostupné z: http://www.vepetersen.com/images/walbro_aftermarket_catalog_2013.pdf
- [10] Mechanizmus výstředníkového čerpadla Walbro GSL [online]. Dostupné z: <http://www.vansairforce.com/community/showthread.php?t=169035>
- [11] Palivové pumpy Walbro [online]. Dostupné z: <https://www.walbro.com/products/rotary-fuel-pumps/>

Zoznam použitých skratiek a veličín

Symbol	Význam	Jednotky
\dot{V}	objemový prietok	$\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$
m_c	celková hmotnosť vstreknutého paliva	g
ρ_p	hustota vstreknutého paliva	$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
t_c	celkový čas vstrekovania	min
U_v	Menovité napájacie napätie	V
p_p	tlak paliva	bar
V_c	celkový objem vstreknutého paliva	cm^3
V_v	objem paliva na jeden vstrek	cm^3

Zoznam obrázkov

Obr. 1 – Vozidlo FS.10	2
Obr. 2 – Schéma jednoduchého karburátoru [1].....	3
Obr. 3 – Druhy vstrekovacích systémov paliva [7].....	4
Obr. 4 – Konštrukcia elektromagnetického vstrekovača [3]	6
Obr. 5 – Pribeh signálov pre aktiváciu vstrekovača [3].....	6
Obr. 6 – Typy geometrie vstrekovaného paliva [8]	7
Obr. 7 – Motor FS.10.....	9
Obr. 8 – Zjednodušená schéma palivovej sústavy FS.10	10
Obr. 9 – Mechanizmus výstredníkového čerpadla Walbro GSL [10]	11
Obr. 10 – Palivové čerpadlo Walbro GSL [9].....	11
Obr. 11 – Konštrukcia regulátoru tlaku paliva [4].....	12
Obr. 12 – 3D model rozdeľovača paliva FS.10	12
Obr. 13 – Fázy vstrekovania primárnych vstrekovačov pri rôznych otáčkach.....	13
Obr. 14 – Pôvodný vstrekovač YAMAHA R6	14
Obr. 15 – Pohľad na uloženie vstrekovača v reze	16
Obr. 16 – Pohľad na uloženie vstrekovačov	16
Obr. 17 – Model návrhu zástavby nových vstrekovacích ventilov	17
Obr. 18 – Zástavba nových vstrekovačov na motore Yamaha R6 tímu CTU CarTech ..	17
Obr. 19 – Meracia zostava	18
Obr. 20 – Príklad priebehu riadiaceho signálu pri určitom nastavení parametrov	19
Obr. 21 – Schéma zapojenia vstrekovačov	19
Obr. 22 – Meranie hustoty paliva	20
Obr. 23 – Graf závislosti objemu paliva na jeden vstrek na šírke pulzu pri $U_v = 12 \text{ V}$..	21
Obr. 24 – Graf závislosti oneskorenia vstrekovania na napájacom napätí.....	22

Zoznam tabuliek

Tab. 4 – Základné parametre sériového motora Yamaha YZF-R6	8
Tab. 2 – Vlastnosti vstrekovacích ventilov Yamaha YZF-R6	14
Tab. 3 – Vlastnosti vstrekovacích ventilov Bosch Ev 14 0 280158 038	15
Tab. 4 – Namerané hodnoty pri napájacom napätí vstrekovačov $U_v = 12\text{ V}$	21



Zoznam príloh

Príloha 1 – Program v Arduine pre ovládanie riadiaceho signálu vstrekočov

Príloha 2 – Namerané a dopočítané hodnoty merania času oneskorenia vstrekovania pre celú škálu napájacích napätí

Príloha 1 – Program v Arduine pre ovládanie riadiaceho signálu vstrekovačov

```
const int tHigh = 2; //trvanie jedného vstrelu v milisekundách
const int tLow = 4; //čas medzi jednotlivými vstrekmi v milisekundách
const int squirts = 5; //počet vstrekov
int j = 0;
unsigned long start_T = 0;
unsigned long end_T = 0;
unsigned long finalTime = 0;

int button = LOW;

void setup() {
  pinMode(2, INPUT);
  pinMode(13, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {

  button = LOW;

  button = digitalRead(2);

  if(button == HIGH){
    start_T = millis();
    j = 0;

    for (j=1; j<=squirts; j=j+1)
    {
      digitalWrite(13, HIGH);
      delay(tHigh);
      digitalWrite(13, LOW);
      delay(tLow);
      Serial.println(j);
    }

    end_T = millis();

    finalTime = end_T - start_T;
    Serial.println(finalTime);
    delay(1000);
    button = LOW;
  }
}
```

Príloha 2 – Namerané a dopočítané hodnoty merania času oneskorenia vstrekovania pre celú škálu napájacích napätí

Menovité napájacie napätie $U_v = 14 \text{ V}$					
Šírka pulzu (tHigh) [ms]	Čas medzi jednotlivými pulzami (tLow) [ms]	Počet vstrekov [-]	m_c [g]	V_c [cm ³]	V_v [cm ³]
2	20	5000	25	31,25	0,00625
5	20	5000	87	108,75	0,02175
10	20	5000	184	230	0,046
Čas oneskorenia vstrekovania $t_d = 0,692 \text{ ms}$					

Menovité napájacie napätie $U_v = 13,5 \text{ V}$					
Šírka pulzu (tHigh) [ms]	Čas medzi jednotlivými pulzami (tLow) [ms]	Počet vstrekov [-]	m_c [g]	V_c [cm ³]	V_v [cm ³]
2	20	5000	24	30	0,006
5	20	5000	84	105	0,021
10	20	5000	179	223,75	0,04475
Čas oneskorenia vstrekovania $t_d = 0,720 \text{ ms}$					

Menovité napájacie napätie $U_v = 13 \text{ V}$					
Šírka pulzu (tHigh) [ms]	Čas medzi jednotlivými pulzami (tLow) [ms]	Počet vstrekov [-]	m_c [g]	V_c [cm ³]	V_v [cm ³]
2	20	5000	23	28,75	0,00575
5	20	5000	82	102,5	0,0205
10	20	5000	180	225	0,045
Čas oneskorenia vstrekovania $t_d = 0,825 \text{ ms}$					

Menovité napájacie napätie $U_v = 12 \text{ V}$					
Šírka pulzu (tHigh) [ms]	Čas medzi jednotlivými pulzami (tLow) [ms]	Počet vstrekov [-]	m_c [g]	V_c [cm ³]	V_v [cm ³]
2	20	5000	22	27,5	0,0055
5	20	5000	77	96,25	0,01925
10	20	5000	173	216,25	0,04325
Čas oneskorenia vstrekovania $t_d = 0,872 \text{ ms}$					

Menovité napájacie napätie $U_v = 11 \text{ V}$					
Šírka pulzu (tHigh) [ms]	Čas medzi jednotlivými pulzami (tLow) [ms]	Počet vstrekov [-]	m_c [g]	V_c [cm ³]	V_v [cm ³]
2	20	5000	18	22,5	0,0045
5	20	5000	77	96,25	0,01925
10	20	5000	175	218,75	0,04375
Čas oneskorenia vstrekovania $t_d = 1,080 \text{ ms}$					



Menovité napájacie napätie $U_v = 10 \text{ V}$					
Šírka pulzu (tHigh) [ms]	Čas medzi jednotlivými pulzami (tLow) [ms]	Počet vstrekov [-]	m_c [g]	V_c [cm ³]	V_v [cm ³]
2	20	5000	14	17,5	0,0035
5	20	5000	75	93,75	0,01875
10	20	5000	173	216,25	0,04325

Čas oneskorenia vstrekovania $t_d = 1,267 \text{ ms}$

Menovité napájacie napätie $U_v = 9 \text{ V}$					
Šírka pulzu (tHigh) [ms]	Čas medzi jednotlivými pulzami (tLow) [ms]	Počet vstrekov [-]	m_c [g]	V_c [cm ³]	V_v [cm ³]
2	20	5000	6	7,5	0,0015
5	20	5000	70	87,5	0,0175
10	20	5000	169	211,25	0,04225

Čas oneskorenia vstrekovania $t_d = 1,649 \text{ ms}$

Všetky merania prebehli pri konštantnom tlaku vstrekovania 3 bar. Hustota paliva počas merania činila $0,8 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.