

Mendelova univerzita v Brně
Provozně ekonomická fakulta

Otevřená modulární řídicí jednotka pro spalovací motor

Diplomová práce

Vedoucí práce:
Dr. Ing. Radovan Kukla

Daniel Andrejčík

Brno, 2016

Chci poděkovat Dr. Ing. Radovanu Kuklovi za možnost věnovat se samostatně
tomuto nestandardnímu tématu

Prohlašuji, že jsem tuto práci: Otevřená modulární řídicí jednotka pro spalovací motor vypracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace jsou uvedeny v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů, a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací. Jsem si vědom, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 Autorského zákona. Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity o tom, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity, a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně dne 1. ledna 2017

.....

Abstract

ANDREJČÍK, D. *Open Source modular ECU*. Diploma thesis. Brno 2013

Goal of this thesis is creation of Cheap, open and modular engine control unit for internal combustion engine driven by gaseous fuels. For this purpose was implemented fuel mixing based on fuzzy logic, and proposed platform is optimized for low cost usage.

Key words

Thesis, Test platform, Combustion Engine, Fuzzy logic, natural gas, gaseous fuels.

Abstrakt

ANDREJČÍK, D. *Otevřená modulární řídicí jednotka pro spalovací motor* Diplomová práce. Brno 2016

Práce se teoreticky zabývá návrhem a implementací Elektronické řídicí jednotky pro malý spalovací generátor. Cílem je vytvořit levné volně dostupné řešení aplikovatelné na již postavené spalovací motory. Navrhované řešení je postavené na levné dostupné elektronice a řídí spalovací motor pomocí fuzzy logiky

Klíčová slova

Závěrečná práce, testovací platforma, bezpečnost, fuzzy logika, plynná palivá, vnitřní spalovací motor.

Contents

1	Úvod a cíl práce	9
1.1	Úvod	9
1.2	Vize uplatnění této práce v budoucnu	10
1.3	Cíl práce	11
2	Analýza problému	13
2.1	Nároky na elektronické řízení	13
2.2	Dostupné řešení na Českém trhu	14
2.3	Problematika spalovacích motorů	16
2.3.1	Základy spalovacích motorů a jejich dělení	16
2.3.2	Řízení spalovacího motoru	19
2.3.3	Měření spalovacího procesu v praxi	19
2.3.4	Mechanické senzory polohy	19
2.3.5	Měření teploty, tlaku a objemu	20
2.3.6	Chemické složení výfukových plynů	20
2.3.7	Přímé měření spalování	20
2.3.8	Řízení vstupní směsi paliva a vzduchu	21
2.4	Dostupné algoritmy strojového učení pro spalovací motor	21
2.4.1	Využití multidimenzionálních map v multipalivových systémech	22
2.4.2	Využití neuronových sítí	23
2.4.3	Fuzzy řízení směšování směsi	23
2.4.4	Kombinace Fuzzy řízení a Neuronové sítě	24
2.4.5	Využití sparse Bayesian učícího algoritmu	24
2.4.6	Kalibrace palivové mapy s least squares support vector machine and genetic algorithm	25
2.4.7	Rekonstrukce točivého momentu z úhlu klikové hřídele	25
2.4.8	Sítování v Návrhu řídicí jednotky	25
3	Metodika řešení	26
4	Výběr nebo návrh platformy	27
4.1	Vývojové desky	27
4.2	Moduly a měřené veličiny	28
4.2.1	Spínací moduly	28
4.2.2	Vstřikování	28
4.2.3	Ovládací prvky	29
4.2.4	Plynové Příslušenství	29
5	Návrh otevřené platformy pro řízení a monitorování 4-taktního spalovacího motoru, se zaměřením na plynná paliva	32
5.1	Základní funkce systému	32
5.2	Formální zápis / Návrh Systému	32

5.2.1	Popis manuálního chodu	33
5.2.2	Popis automatického chodu	34
5.2.3	Popis vnitřní logiky	34
6	Návrh bezpečnostních prvků, analýza rizik	39
6.1	Start a roztáčení motoru	40
7	Přestavba elektrocentrály z mechanického řízení na elektronické	41
7.1	Přestavovaný motor a jeho chování	41
8	Implementace návrhu	44
9	Validace návrhu experimentem	47
9.1	Testování příměsi vody	48
10	Vize využití práce do budoucna	50
10.1	Minimalizace návrhu pro zajištění cenové efektivity	50
10.2	Možné rozšíření do budoucna a další proveditelné testy	51
10.2.1	Využití v jiných systémech	52
11	Zhodnocení práce, publikace výsledků a zveřejnění návrhu	54
12	Literatura	56

1 Úvod a cíl práce

1.1 Úvod

V 18-tém století se v Německu začaly vyrábět první spalovací motory. Už je to více než 150 let co používáme tuto technologii (Strandh 1981). Začlenili jsme ji již do našeho každodenního života tak hluboko, že si život bez ní ani neumíme představit. Dnešní svět stojí na komplexní síti logistiky, která nám přepravuje spotřební materiál, odváží odpad, rozváží různé palivo, nebo vozí lidi za prací. Dá se tedy říci, že jsme na těchto technologiích do určité míry závislí. Dokonce i většina záložních zdrojů pro krizové situace funguje na spalovacích motorech, protože jsou relativně levné, spolehlivé a dokáží generovat velké množství energie.

Samozřejmě víme, že z pohledu ekologie tato technologie není pro naši civilizaci ideální. Nejen že způsobuje emise, které škodí našemu životnímu prostředí, ale je třeba myslet i na to, že se zdroje fosilních paliv jednou vyčerpají. Je známo, že v současné době už jsou rozpracovány projekty na bázi využití alternativních zdrojů. Bohužel v praxi se ukazuje, že alternativní technologie nemusí být vždy v konečném důsledku levnější nebo efektivnější. Pro to do té doby, než se tyto alternativní technologie dostanou na požadovanou úroveň, se zde už nyní nabízí řešení maximálně zefektivnit stávající technologie, postavené na bázi fosilních paliv. Například díky použití elektroniky, je pak možné docílit efektivnější práce motoru i redukce spotřeby paliva. Už víme, že nahradit ze dne na den miliony spalovacích motorů nelze. Například bateriemi poháněné zařízení se sice již dávno staly každodenní součástí našeho života, ale ani tato technologie není ideální. Signálem toho, že se dostáváme k hranici maximálního výkonu akumulátorů je, že se jejich kapacita už nezvyšuje o desítky procent, jako se to dařilo dříve, ale ustaluje na určité úrovni. A nejde tu jenom o kapacitu akumulátorů. V budoucnu budeme řešit nejen otázky bezpečnosti a výrobní ceny akumulátorů, ale i otázku dostatečného množství surovinových zdrojů pro jejich výrobu. Z pohledu běžného spotřebitele jsou akumulátory považovány za velice bezpečnou technologii. V minulosti se touto otázkou nebylo třeba tolik zabývat, protože například selhání baterie v náramkových hodinkách nebo v běžném kalkulátoru neznamenalo až tak významnou škodu. Přesto například firma Samsung, která bere kvalitu svých výrobků velice vážně, dnes čelí značnému fiasku. Jejich mobilní telefony už podruhé trpí výrobní vadou, která vede k fatálnímu selhání akumulátoru a vedla i k újmě na zdraví majitelů těchto přístrojů. A toto je pouze příklad malé baterie s kapacitou 3500 mAh. Je otázkou co by znamenalo kritické selhání akumulátorů například v elektromobilech, nákladních vozidlech nebo třeba v letadlech. Stačí, že jeden z mnoha článků vzplane a tím rozpoutá řetězovou reakci. Ukazuje se, že problémem je samotný materiál ze kterého jsou baterie vyráběny: Rtuť, Olovo, Kadmium, Nikl, Zinek a hlavně problematické Lithium, které je hořlavé. Ostatní kovy sice nehoří, ale i tak mohou ohrožovat náš organizmus, a už při jejich těžbě a následnému zpracování vznikají vůči našemu životnímu prostředí různá rizika (Dillon 1994). V současné době se nacházíme ve takzvané

”Zlaté době” kdy se dostáváme na vrchol daných technologií baterií. Jejich cena závratně klesá, mnohem rychleji než bylo predikováno (BECKY BEETZ 2015). Dostupnost surovin potřebných pro výrobu akumulátorů je však do budoucna nejistá.

Více velkých firem se snaží situaci kolem akumulátorů zlepšit, z těchto hráčů například jmenovitě Elon Reeve Musk dotuje technologii baterií a snaží se postavit budoucnost na nich, nebo například Robert Murray-Smith pracuje na nahrazení nebezpečných chemických prvků uhlíkem nebo konopím v bateriích a kondenzátorech. Akumulátory na bázi konopí by znamenaly obrovsky převrat, protože by se mohly vyrábět i z odpadu konopých rostlin a byly by téměř ekologické. Pokud se kdokoliv zajímá o tyto technologie, doporučuji projít si práci Roberta Murray-Smitha a podívat se na původní studii z roku 2013 (Wang et al. 2013). Tyto technologie mají rozhodně své místo i v budoucnosti, ale zatím nejsou schopny spalovací motory plně nahradit.

Dále tu máme jaderné fůzní a fízíní reaktory. Obě tyto technologie však mají jednu společnou vlastnost, která je automaticky dělá nepoužitelnou v určitých oblastech. Vzhledem k tomu, že vyžadují váhově těžké stínění od radiace, nejsou použitelné například v leteckém průmyslu. Naopak k pohonu velkých lodí nebo ponorek, je jejich použití možné. Z výše uvedeného plyne, že spalovací motory a fosilní paliva budou patrně s naší civilizací spojeny déle, než bychom jsi si přáli, ale zatím je nemáme čím nahradit. Proto se v této práci zabývám otázkou návrhu a implementace jednoduchého elektronického řízení spalovacího motoru. Mým cílem je vytvořit otevřenou platformu pro malé spalovací motory se zaměřením na plynné a hybridní paliva.

1.2 Vize uplatnění této práce v budoucnu

Tato práce vychází z jednoho z mých dlouhodobých plánů. Někdy v budoucnu bych si totiž přál mít vlastní energeticky nezávislý dům, neboli dům, kde nebude potřeba dodávat ani elektřinu ani plyn. Tomuto řešení se v moderní literatuře říká ostrovní systém.

V tomto systému je však potřeba řešit několik docela zásadních problémů. Například:

- Generování energie
- Uskladnění energie
- Každodenní provoz - problém vyrovnaní dodávky a poptávky v různých časech a obdobích
- Krizové situace

Samotné generování energie zde není problém. Problém je její uskladnění. Ideální by bylo mít k dispozici několik různých zdrojů energie a paliv. Solární panely, geotermální generátory nebo malé větrné elektrárny mohou vyrobit určité

množství energie a ukládat je na pozdější dobu. Část energie z těchto zdrojů by bylo možné ukládat v akumulátorech a část využít jako příměs ke spalovacím motorům. Právě spalovací motory budou hrát velkou roli v krizových situacích jako záložní zdroje.

V České republice se přímo nabízí výroba paliv z rostlinných produktů. Určitá část pozemků v zemi je zatím nevyužitá a v porovnání s sousedními státy Evropské Unie i cenově dostupné. V některých oblastech je naše zemědělská půda kvalitní a úrodná. Při produkci plodin pro výrobu biopaliv, lze však využít i méně kvalitní půdu, než je nutná k produkci plodin pro potravinářský průmysl. Při správném obhospodařování lze produkovat různé plodiny a využít tím i méně kvalitní půdu.

Díky pokroku v oblasti biopaliv dnes můžeme skoro z každé plodiny vytvořit Bio-palivo, a tím teoreticky můžeme spojit jeden nebo více ostrovních systémů se zemědělskou produkcí. Hlavní plodiny mohou být použity v potravinářství a vedlejší nebo doplňkové plodiny mohou být použity pro výrobu biopaliv, které budou zásobovat naše ostrovní systémy. V praxi by to znamenalo, že uvedené pole bude produkovat nejen potraviny, ale navíc ještě přispěje k energetické nezávislosti lidských sídel.

Například i ze zbytkové kukuřice můžeme vytvořit kukuřičné kaše, které lze dalším zpracováním proměnit na palivový etanol(Shakhashiri 2012). Stejně tak nevyužitá sojová bobý lze proměnit v olej a dále v palivo vhodné pro dieselové motory. Podobně lze proměnit v kapalná paliva nebo bioplyny i zemědělské produkty jako například: slunečnice, len, řepka olejná anebo obyčejné brambory (Platform 2013).

Pokud bychom se pustily touto cestou, dostaneme sice každý rok množství různých paliv, ale je nutno počítat s tím, že některé budou kvalitní, zatímco jiné naopak silně nekvalitní. Na první pohled z toho vyplývá, že by každý konkrétní druh paliva potřeboval speciální motor, nebo minimálně svůj vlastní profil pro elektronické řízení motoru. Toto řešení by však nebylo efektivní. Jednou z alternativních možností je mít například jeden motor, který se ale umí přizpůsobit různým druhům paliva. Tímto se dostávám k vysvětlení cíle této práce: Záměrem je vytvořit jednoduchý řídicí systém malého spalovacího motoru, který bude dostatečně chytrý na to, aby se přizpůsobil různým druhům paliva. Pochopitelně s ohledem na jeho ekologický provoz.

1.3 Cíl práce

Cílem práce je tedy zhotovení řídicí jednotky, aplikovatelné na malé spalovací motory. Zaměřují se hlavně na plynná paliva, kde výsledek práce bude testován nejdříve se stlačeným zemním plynem k ověření, zdali zvolený přístup je nebo není použitelný. Tento hlavní cíl pak rozdělují na tyto dílčí cíle:

- Analýza problémů
- Kontrola dostupných řešení a jejich porovnání

-
- Nastudování problematiky spalovacích motorů
 - Analýza dostupných metod strojového učení a možnosti jejich aplikace na řešený problém
 - Návrh otevřené platformy pro řízení a monitorování 4-taktního spalovacího motoru, se zaměřením na plynná paliva
 - Návrh bezpečnostních prvků, analýza rizik
 - Minimalizace návrhu pro zajištění cenové efektivity
 - Výběr nebo návrh platformy
 - Přestavba elektrocentrály z mechanického řízení na elektronické
 - Konstrukce návrhu a aplikace na elektrocentrálu
 - Validace návrhu experimentem
 - Návrh učících algoritmů pro řízení motoru
 - Vyhodnocení výsledků

2 Analýza problému

Na našem trhu existuje velké množství spalovacích motorů s již vestavěným generátorem. V případě, že vyžadujeme k našemu projektu specifické nebo nestandardní napájení, je možné koupit odděleně motor a samotný generátor, nebo nějaký již vyrobený generátor převinout. Cena generátoru a motoru je daná především materiálem a použitou technologií. Motory a generátory z lepších materiálů jsou znatelně spolehlivější, výkonnější, ale i cenově náročnější. Tato závislost mezi cenou a výkonem je lineární. Co se týče řízení, drtivá většina ekonomicky přijatelných řešení obsahuje mechanické řízení, které je levné a spolehlivé. Navíc diagnostika a oprava takového systému je možná na místě a zvládnutelná i méně kvalifikovaným personálem, bez sofistikovaného elektronického vybavení. Tento typ řízení je ale nevhodný pro více-palivové řešení. Právě zde však vidím dostatek prostoru pro uplatnění svého návrhu. Cena elektroniky v posledních letech klesá závratně dolů a také máme k dispozici množství univerzálních vývojových desek, přesto však komerční řešení jsou cenově náročná. Samotné nároky na celkový systém se budou měnit podle aktuálního využití.

2.1 Nároky na elektronické řízení

V současné době je cena elektrických zařízení důležitá u cca 80 procent všech produktů. V tomto případě můžeme minimalizovat cenu pomocí použití víceúčelových desek, u kterých je cena tlačena dolů konkurencí v tomto sektoru. Jeden z faktorů, který nelze příliš ovlivnit je naopak nutnost specifického vybavení v případě implementace plyných paliv. Cena vstřikovačů, regulátorů a plynových nádob je daná současným trhem, a tyto výdaje nejdou minimalizovat bez ohrožení bezpečnosti celého zařízení. Vzhledem k tomu, že sám nedisponuji velkým množstvím finančních zdrojů, a tento projekt je plánován pouze pro mé osobní použití po záštitou univerzity, celý projekt je navrhován tak, aby byl co nejméně cenově náročný.

Jeden z hlavních problémů na které jsem narazil u konkurenčních řešení je cenová dostupnost. Nejlépe hodnocené řešení pro malé spalovací motory jsou předražené nebo na našem trhu nesehnatelné. Tato uzavřená řešení ovšem dávají smysl v případě, že chceme zajistit stoprocentní funkčnost a stabilitu, ale v mém celkovém specifickém plánu spoléhám spíše na více autonomních záložních systémů. Jinými slovy, k tomuto zkušebnímu použití preferuji cenu a dostupnost nad absolutní spolehlivostí.

Jak již bylo zmíněno výše, důležitou vlastností pro mne je samotná funkčnost a modularita. Pouze cenově nejnáročnější modely jsou schopné strojového učení a obsahují podporu pro více druhů paliv. Z pohledu otevřenosti návrhu, nabízejí některé konkurenční platformy veškerý zdrojový kód, pod záštitou "General Public License", proto i tato práce bude po dokončení zveřejněna stejným způsobem, pro případ, že i někdo jiný pro ni najde využití.

2.2 Dostupné řešení na Českém trhu

Cena benzínových elektrocentrál je na Českém trhu docela příznivá. Dvou Kilowatový model lze získat od pěti tisíc korun českých. V případě, že jsou naše nároky vyšší, lepší modely se pohybují od 10 tisíc Kč nahoru. Jiná situace nastává v případě, kdy potřebujeme zakoupit cenově dostupnou plynovou elektrocentrálu. Na našem trhu se jich nenabízí mnoho, a i díky tomu je cena průměrné centrály kolem 30 tisíc korun českých.

Elektrocentrála benzínová a plynová (PLG/CNG) LPGG 43-3F HERON



Elektrocentrála benzínová a plynová, rámová, počet fází: 3f, max. výkon benzín 5,3kW(400V)/2x2,1kW(230V), LPG 5,1kW(400V)/2x2,0kW(230V), CNG 4,7kW(400V)/2x1,8kW(230V).

Katalogové číslo: **M-8896319**
 Výrobce: **HERON**
 EAN (čárový kód): 8595126961394
 Hmotnost: 88 kg

Dostupnost: **Skladem: sklad III**
 Záruka: 2 roky
 Běžná cena: 33 900 Kč
 Steva: 1 699 Kč (5,0%)

Doprava: **Zdarma**

Naše cena bez DPH: 26 686,78 Kč
Naše cena s DPH: 32 291 Kč

Poslat e-mailem ks **Koupit**
 Vytisknout
 Porovnat zboží

Obr. 1: Elektrocentrála od výrobce Heron

Na internetu lze pořídit ze zahraničí různé balíčkové díly na přestavbu benzínové elektrocentrály na plynovou. Ty se pohybují v ceně kolem 5 tisíc Kč (obr. 2), ale neposkytují žádné garance ohledně bezpečnosti, spolehlivosti nebo výkonu. Jsou postaveny na bázi membránového regulátoru/reduktoru.

Champion Generator Tri-Fuel Conversion Kit Adapter fo

Item condition: **New**

Quantity: More than 10 available / 44 sold

Price: **US \$187.00**
 Approximately 4,582.66 CZK


Buy It Now
Add to cart

83 watching
 Add to watch list
 Add to collection

44 Sold
 New Condition

Shipping: **\$63.10 (approx. 1,546.34 CZK)** USPS Priority Mail Internatic
 International items may be subject to customs processing and additional
 Item location: Summersville, West Virginia, United States
 Ships to: Worldwide

Delivery: Estimated between **Mon. Nov. 28 and Wed. Dec. 7**
 Seller ships within 3 days after receiving cleared payment

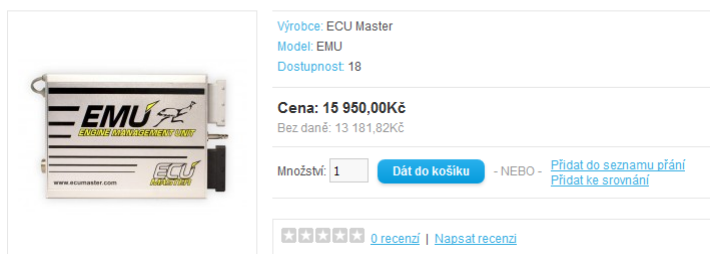


Obr. 2: Set s reduktorem pro malé spalovací motory. (Zdroj Ebay.com)

V případě, že chceme jít cestou elektronického řízení pro malé motory, nalezeme na českém trhu řešení žádné. Je to pravděpodobně způsobeno nízkým zájmem o tyto produkty. V dnešní době už v podstatě není problém najít elektrickou zásuvku a tak se malé spalovací motory za účelem generování energie používají většinou pouze při stavebních pracích. Pro záložní generátory si například podnikatelské subjekty (firmy, instituce) najímají externí firmy, které mají svá uzavřená řešení.

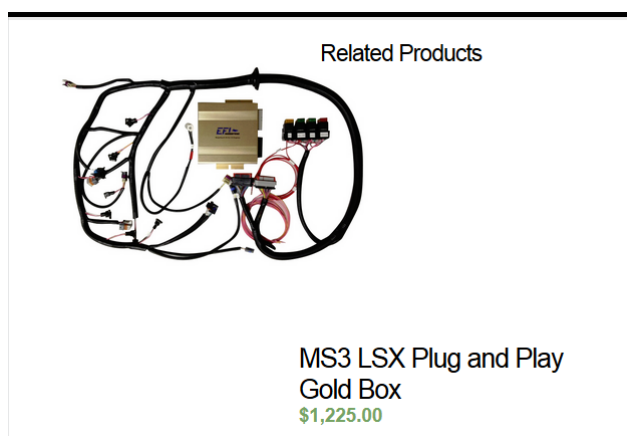
Pokud potřebujeme řídit malý spalovací motor elektronicky, nezbyvá nám nic jiného, než koupit řešení pro velké automobily. V tomto případě může ale cena tohoto zařízení převyšovat cenu samotného motoru. Na českém trhu lze pořídit řešení zvané ECUMaster za téměř 16 tisíc korun, se kterým nemám osobní zkušenost a nepovedlo se mi najít na tohle řešení mnoho recenzí (obr. 3).

EMU ECUMaster



Obr. 3: Řídicí jednotka ECUMaster (Zdroj : <http://shop.ecumaster.cz/>)

Mezi nejznámější elektronická řešení patří Megasquirt (obr. 4), na který lze nalézt na internetu velice kladné ohlasy. Problémem ale zůstává vysoká cena, která se při kompletním setu pohybuje kolem tisíce dolarů. Výhodou tohoto produktu je velká komunita uživatelů, která se podílela na vytvoření kalibračních nástrojů, takže implementace tohoto řešení je jednodušší než u konkurence.



Obr. 4: Řídicí jednotka MegaSquirt (Zdroj : <http://megasquirt.info/>)

Po průzkumu našeho trhu, se dostávám k závěru, že i v případě, že máme zájem o elektronické řízení malého motoru, nabízejí se pouze dvě možnosti:

- Zakoupit celé řešení generátoru jako celek
- Pokud jsme nuceni brát ohled na pořizovací cenu, nezbyvá nic jiného, než si jej vyrobit sám

2.3 Problematika spalovacích motorů

2.3.1 Základy spalovacích motorů a jejich dělení

Vnitřní spalovací motor je mechanický tepelný stroj, který vnitřním nebo vnějším spálením paliva přeměňuje jeho energii na energii tepelnou a z ní na energii mechanickou. Tento stroj tedy můžeme namodelovat jako systém s více vstupy a výstupy. Na vstupu máme vzduch a palivo stlačované a vzněcované ve správném okamžiku. Výstupem z tohoto systému je teplo, mechanická energie a výfukové spodiny (Branko 2012).

V základu vnitřní spalovací motory rozdělujeme podle pohybu pístu na:

- Motory s vnitřním spalováním s přímočarým vratným pohybem pístu
- Motory s vnitřním spalováním s rotačním pohybem pístu

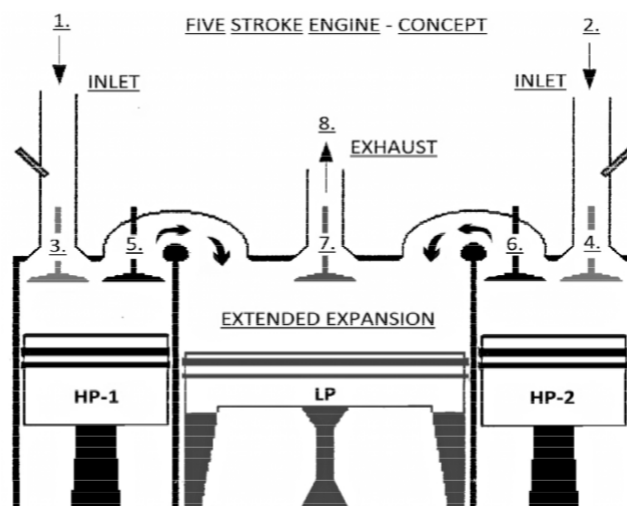
Příkladem motoru s rotačním pohybem pístu je například Wankelův motor, ale tyto typy motorů se v generátorech nevyskytují. Proto se jimi v této práci nebudu zabývat. Pístové spalovací motory poté rozdělujeme podle počtu zdvihů na:

- Motory čtyřdobé - kde pracovní cyklus proběhne během čtyř zdvihů/pohybů pístů a zároveň kliková hřídel vykoná dvě otáčky.
- Motory dvoudobé - kde pracovní cyklus proběhne během dvou zdvihů pístů, přičemž kliková hřídel vykoná pohyb pouze jednu.
- Motory více-cyklové nebo-li více-dobé

Zajímavostí jsou právě více-dobé motory. Největší limitace současných čtyřdobých motorů je kompresní poměr, který přímo omezuje tepelnou efektivitu. Kompresní poměr je rozdíl mezi objemem válce v hraničních polohách, co nám vyjadřuje, jak silně je směs stlačovaná před zapálením. Právě z kompresního poměru přímo počítáme tepelnou efektivitu, což jak název napovídá, je množství tepelné energie převedené na pohybovou energii. V ideálním případě, neboli při stoprocentní tepelné efektivitě motoru, by teplota směsi před a po zapálení byla stejná. V praxi se to ale logicky nestává, a právě tady se snaží situaci zlepšit více-cyklové motory, které zavádí další cykly/takty, které se tuto nevyužitou tepelnou energii snaží využít (obr. 5).

Například pěti-dobý motor podle návrhu Gerharda Schmitze z roku 2003 (Schmitz 2003), využívá dalšího válce pro rozšířenou expanzi. Výhodou použití dalšího válce je možnost mít dva kompresní poměry a tím využít větší část energie.

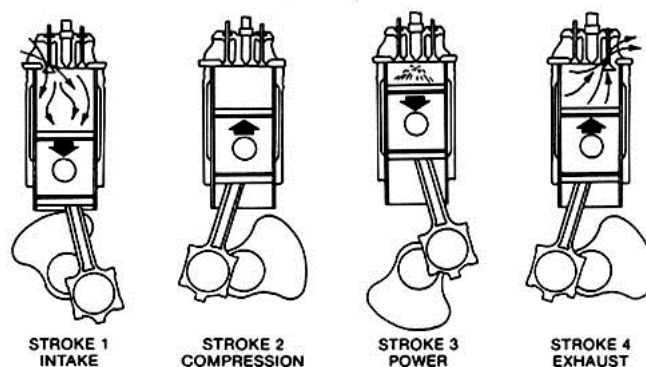
U navrhovaného řešení vysokotlakové válce mají poměr 7:1 a pak společný nízkotlakový válec 17,7:1.



Obr. 5: Ukázka principu pěti-dobého motoru

V tomto roce vyšlo několik studií na tento pěti-dobý návrh, (“Five Stroke Internal Combustion Engine”) (Li, Wang, and Zheng 2016) které potvrzují že toto řešení má tepelnou efektivitu vyšší až o 30 procent. Otázkou ale je, zda v budoucnu budou použity. Tento návrh bohužel zavádí do již složitého systému další pohyblivé díly, což znamená snížení spolehlivosti a nárůst ceny.

Každý pracovní cyklus se skládá ze čtyřech fází u čtyřdobého motoru (obr. 6):



Obr. 6: Náčrt pracovního cyklu spalovacího motoru, (Zdroj : http://www.globalspec.com/learnmore/motion_controls/)

- Sání - Do válce se nasává směs paliva a vzduchu. Sací ventil je otevřen a výfukový ventil uzavřen

- Komprese - Nasátou směs stlačujeme, oba ventily jsou zavřené. Při stlačování roste tlak a teplota. Krátce před horní maximální pozicí se směs vzněcuje.
- Expanze - Stlačená směs hoří a tím tlačí píst dolů. Toto je jediná fáze, která koná práci.
- Výfuk - Otvírá se výfukový ventil a veškeré zbytky po spalování jsou vytlačeny ven.

Dále motory třídíme podle způsobu zapálení směsi na:

- Zážehové motory - Do válce je nasáta směs vzduch a paliva, která je stlačována a vzněcuje se elektrickou jiskrou. Tento jev vznícení můžeme přesně řídit
- Vznětové motory - Vznícení je výsledkem stlačení a vysoké teploty. Toto řešení je mnohem náročnější na automatizaci. Příkladem je dieselový motor, kde palivo vstříkujeme do horkého stlačeného vzduchu, kde teplota vzduchu je nad zápalnou teplotou paliv

Podle druhu paliva na:

- Motory na paliva plynná
- Motory na paliva kapalná lehká (Benzíny)
- Motory na paliva kapalná těžká (Nafty, bionafty a oleje)

Podle způsobu plnění válce:

- Motory plněné podtlakem - Pohybem pístu se vytváří podtlak, který nasává směs paliva a vzduchu
- Motory plněné přetlakem, neboli přeplňované - motor plní kompresor nebo dmýchadlo

Máme i další dělení fyzikálních vlastností, jako podle počtu válců a uspořádání válců, směru otáčení klikové hřídele a použitého rozvodu.

Současně pokud hledáme nejlepší vnitřní spalovací motor, tak za "state of art" jsou momentálně považovány HCCI motory (Thring 1989). Zkratka HCCI znamená "Homogeneous Charge Compression Ignition", a tyto motory mají ekologické vlastnosti benzínových motorů a ekonomické vlastnosti motorů dieselových. Dle posledních výzkumů jsou tyto motory vhodné i pro biopaliva a ekologické elektrické generátory (Kumar and Rehman 2016). Na rozdíl od dieselových motorů je palivo stlačováno spolu se vzduchem, takže k zachování přesného časování musíme přesně regulovat teplotu ve válci. Tím, že se směs vzněcuje okamžitě a samovolně, je teplota hoření nižší, efektivita motoru je tím mnohem vyšší a nevznikají dusíkaté emise.

2.3.2 Řízení spalovacího motoru

Při modelování řízení a optimalizování narážíme na několik problémů:

- Stav tohoto systému se mění dynamicky. Normálně dosahují spalovací motory 3000 a více otáček za minutu, což znamená 50 vznětových cyklů za vteřinu. Každý z cyklů se navíc skládá z několika událostí, které musí být přesně načasované
- Dynamika motoru není lineární. Malá změna na vstupu systému může znamenat velikou změnu na jeho výstupu. Samotné řízení musí být schopné rychle a přesně reagovat na změny
- Jak motor samotný, tak jeho řízení musí splňovat vysoké legislativní nároky současného trhu. Legislativa tlačí na tuto technologii aby vytvářela co nejméně emisí a uživatelé chtějí zároveň co možná nejnižší cenu a maximální spolehlivost
- Spalovací motor se těžko modeluje. V procesu je dost nejistot a výsledný model je součtem termodynamických, mechanických a chemických pod modelů
- V praxi je neekonomické měřit všechny vstupní veličiny, přesto ale očekáváme bezchybný chod motoru

2.3.3 Měření spalovacího procesu v praxi

Ve spalovacích motorech můžeme využít různé typy čidel a měření, které v základu rozdělujeme dle:

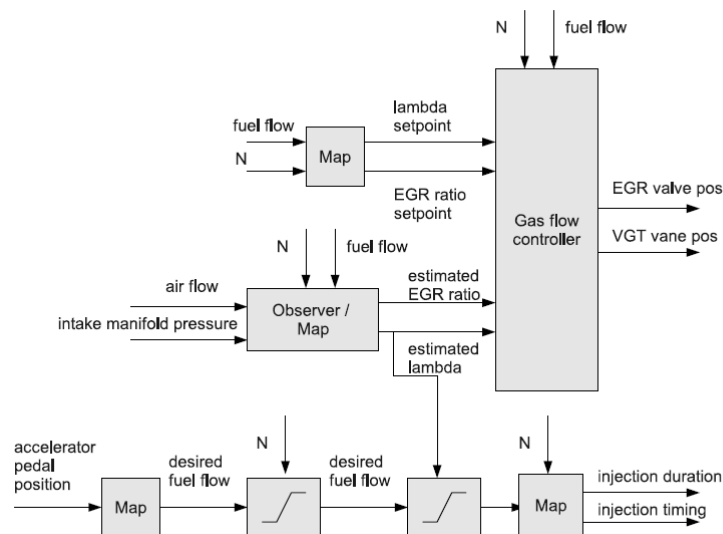
- Fyzických jevů které měří
- Časového okna kdy operují
- Podle využití v motoru

Na obrázku (obr. 7) můžeme vidět základní blokové schéma standardního spalovacího motoru

2.3.4 Mechanické senzory polohy

Senzory polohy jsou vhodné pro měření například polohy pístu, ventilu, klikové hřídele nebo třeba plynového pedálu. Měřením polohy například hřídele, můžeme přesně synchronizovat vystřikování a vzněcování směsi. Tyto senzory mohou být na mechanické, optické nebo elektromagnetické bázi.

Některé pokročilejší motory obsahují více sofistikované "Knock back" senzory. Tyto senzory měří akustické vlnění, čímž rozpoznají kdy přesně a jak nastala detonace směsi. Každé palivo má jinou rychlost hoření, proto se snažíme načasovat tento děj co nejpřesněji, a to při nejvyšší kompresi paliva, které již hoří a tím převede



Obr. 7: Blokové schéma spalovacího motoru

co nejvíce energie v pohyb. Opožděná detonace může znamenat snížení výkonu a naopak, pokud zapalování proběhne o takt dříve, může se trvale poškodit motor.

2.3.5 Měření teploty, tlaku a objemu

Termodynamické veličiny jako například vstupní teplota, tlak a objem vzduchu do motoru, mohou změnit chování motoru a v dokonalém návrhu tyto veličiny musí být měřeny. Sensory pro měření tlaku paliva nemusí mít nízkou odezvu, ale musí být předimenzovány vůči tlaku paliva, které plánujeme používat. Teplotní senzory jsou postaveny buď na technologii termistorů nebo termočlátku, termistory se ale doporučují používat pouze do 300 stupňů Celsia.

2.3.6 Chemické složení výfukových plynů

Výfukové plyny mohou obsahovat velké množství různých sloučenin. Můžeme tam měřit obsah: Sloučeniny dusíku, kyslíku, oxidu uhličitého a uhelnatého, sražené vody, nedohořené karbohydráty a pod.

V praktickém systému potřebujeme k řízení informaci o přebytku kyslíku ve směsi, který měříme lambda sondou. Jakékoliv hlubší rozbor výfukových plynů musí být prováděny na přístrojích mimo mé finanční možnosti. Jsem domluven s jednou Brněnskou STK stanicí, že se tam můžu po vánocích zastavit na rozbor.

2.3.7 Přímé měření spalování

V případě výroby prototypu motorových bloků se mohou používat senzory měřící přímo situaci uvnitř pístu. Toto vybavení musí být odolné vůči vysokému tlaku,

teplotě a pod., díky čemuž je jejich cena vysoká. Narazil jsem ale na technologii zvanou "Ion current sensing". Při jiskrovém vzněcování je používaná zapalovací svíčka zároveň jako proudový sensor. Tento stejnosměrný proud by měl přímo záviset na spalovacím procesu. Celkový koncept je zajímavý, protože jde levně provést na jakémkoliv zážehovém motoru a není k němu zapotřebí příliš drahé vybavení. Zde je ale potřeba mnohem hlouběji nastudovat problematiku a pak se zamyslet, kde je tato informace použitelná v navrhovaném algoritmu, a zdali to v tomto projektu bude použitelné nebo ne. Toto řešení nebude možno obsáhnout v rámci této práce, ale v budoucnu je to jedna z alternativ, jak lze navrhovanou platformu rozšířit (Murata and Ikeuchi 1993).

2.3.8 Řízení vstupní směsi paliva a vzduchu

Jedním z hlavních faktorů, od kterých se odvíjí výkon a efektivita motoru, je množství a poměr směsi vzduchu a paliva které do válce vstříkujeme. Je nutno aby ve válci bylo správné množství vzduchu k danému druhu paliva. Toto se nazývá Stechiometrický poměr.

Každé palivo má svůj vlastní Stechiometrický poměr ke vzduchu, pro benzin je to 14.6, 14.5 je pro zemní plyn a 34.3 je pro vodík. V případě, že ve válci je více paliva než je dáno Stechiometrickým poměrem, jedná se o směs přesycenou. Následkem je nespálené palivo ve výfukových plynech a navíc nebezpečný oxid uhelnatý. Naopak pokud je ve směsi paliva málo, vysoké teploty v kombinaci s přebytkem vzduchu mohou tvořit oxidy dusíků. Nevýhodou dokonalého Stechoimetrickeho spalování je naopak nižší výkon motoru. Pro dosažení nejvyšší efektivity necháváme přebytek kyslíku v rámci několika procent (Cengel 2014) V této práci budeme používat zemní plyn, pro nějž je to cca 5-10 procent, podle kvality plynu.

Z pohledu řídicí jednotky, množství paliva vstříkované v daném momentu závisí na těchto faktorech:

- na očekávaných otáčkách za vteřinu
- na aktuálních otáčkách
- množství vzduchu vstupujícím do systému
- teplotě motoru
- informace z lambda sondy

2.4 Dostupné algoritmy strojového učení pro spalovací motor

Dnešní elektronické řídicí jednotky mohou zvýšit účinnost, výkon a zároveň snížit emise motoru. Nejpoužívanější druh řízení motoru je pomocí použití vícerozměrových map. Tyto systémy jsou ale obvykle přesně nastaveny na jeden typ paliva.

Změna paliva u těchto systémů v motoru vyžadují přeprogramování staré elektronické řídicí jednotky, nebo změnou vstupních parametrů jdoucích do ní dalším Chipem. Dobrým příkladem je přestavba automobilů na LPG. Vzhledem k cenám a nejisté budoucnosti trhu s ropou, vidíme rostoucí zájem pro vícepalivové nebo hybridní řešení. Bohužel výrobci automobilů používají jejich vlastní, většinou patentované řídicí jednotky. Přeprogramování tohoto řešení vyžaduje odborný servis.

Na druhou stranu máme nyní k dispozici mnoho levných a výkonných vývojových platform. Položme si tedy otázku: Bylo by možné jednu takovou desku proměnit v řídicí jednotku pro spalovací motor? Malé interní spalovací motory nemají žádné elektronické řízení, protože cena specializovaných elektronik je příliš vysoká. Pokud se rozhodneme jít cestou výstavby vlastního řešení, potřebujeme dobrý učící algoritmus, který se může adaptovat na různé druhy paliv podle jejich charakteristiky.

Cílem této kapitoly je zodpovědět tyto otázky:

- Jak může být strojové učení použito ve spalovacím motoru?
- Je možné řídit motor bez multidimenzionálních výkonových map?
- Které metody jsou pro tento účel použitelné a jakým způsobem?
- Jaký vliv na spalovací proces můžeme s použitím učících algoritmů očekávat?

2.4.1 Využití multidimenzionálních map v multipalivových systémech

Nejjednodušší a nejpraktičtější řešení je ovládaní pomocí palivových map (Weiss and Burk 2001) (Morén 2008) a Speed-density algoritmu (Harold, Norman, and Straight 1952) (Stevens 2013). V multidimenzionální palivové mapě je pro každou kombinaci vstupních hodnot hodnota výstupní. S vzrůstajícím množstvím vstupních hodnot tím pádem i vzrůstá velikost této multi-dimenzionální tabulky.

Výhodou je, že nepotřebujeme výkonný mikroprocesor, lze použít již odzkoušené starší integrované obvody s vysokou spolehlivostí. Dále celkový systém je stabilní, jednoduchý a výkonný na daném palivu. Nevýhodou je naopak čas nutný k naučení / vytvoření této tabulky a její neflexibilita. Původně bylo toto řešení vyvinuto pro jedno-palivové systémy. Každá tato mapa bude vždy odpovídat jednomu druhu paliva a jednomu motoru v daném stavu. V případě změny paliva musíme změnit vstupní veličiny do řídicí jednotky, (Vrubel and Vrubel 1995) nebo hodnoty v tabulkách. V případě, že se nejedná o hybridní motor od výroby, můžeme postřehnout zajímavá řešení jako například zdvojení řídicí jednotky (Bailey and Bethurem 2010).

V případě návrhu jakéhokoliv řídicího systému pro spalovací motor je nutné zajistit podporu řešení pomocí mnohodimenzionálních map. Veliké množství těchto map je již vytvořeno a automechanici jsou již naučení je používat. Naštěstí se implementací tohoto řešení nemusíme zabývat, protože již bylo vytvořeno množstvím různých knihoven.

Nechci implementovat řešení, kde by bylo nutné měnit vstupní veličiny do systému jen proto, aby jedna palivová mapa odpovídá jinému palivu. Podle mého názoru to zavádí jen další chyby a nepřesnosti do systému. Jako za mnohem lepší řešení považuji, když jednotka bude obsahovat různé profily palivových map. V případě, že se pak bude jednat o open-source řešení, je možné někde mít databázi map pro jednotlivá paliva a motory, a drobné změny by se pak mohly přeučit nějakým učícím algoritmem.

2.4.2 Využití neuronových sítí

Co se týče historie využití neuronových sítí ve spalovacích motorech, je to jeden z starších a oblíbených témat sahajíc zpět až do roku 1995, kdy byly vytvořeny první modely (Majors, Stori, and Cho 1994) (Leonhardt, Ludwig, and Schwarz 1995).

Se vzrůstající vypočtení schopností elektronických obvodů pomalu vzrůstal i zájem o neuronové sítě ve spalovacích motorech. V roce 2002 Sulatisky a Hill (Sulatisky and Hill 2002) vytvořily neuronovou síť, k ovládaní směsi paliva při přestavbě dodávky z benzínu na zemní plyn (o dva roky později patentováno (Sulatisky et al. 2004)). V tom samém roce Zhenzhong prezentoval simulaci fuzzy-neuronové sítě pro časování jak momentu vstřikování a zapalování, tak pro kontrolu směsi samotné. Navrhované řešení bylo testováno na motoru poháněném vodíkem (Zhenzhong et al. 2002). O rok později (Beltrami et al. 2003) byla prezentovaná studie s použitím "recurrent" neuronové sítě pro míchání směsi paliva. Tento typ se většinou používá pro rozeznávání řeči nebo písma. Jednalo se o offline natrénovanou síť se 14 neurony ve skryté vrstvě. V roce 2006 byla použita neuronová síť ve vícepalivovém systému (Gnanam et al. 2006). Toto bylo provedeno právě formou nádstavby nad současný řídicí systém, který byl nastaven na běžně používaný benzín. Tím bylo dokázáno experimentem, že neuronová síť může být použita pro nízko-nákladové přestavby motoru z benzínu na stlačený zemní plyn. Nejzajímavější práce je z mého pohledu od Travis Kent Wiense (Wiens 2008). Ten prezentoval v rámci své dizertační práce neuronovou síť na řízení spalovacího motoru specificky pro plynná paliva. Hlavním cílem této práce bylo snížení ceny a zkrácení celkové délky vývojového cyklu řídicích jednotek pro spalovací motory. Jeho algoritmus byl schopen generovat spalovací model motoru díky čemuž pak tento proces lze rychleji optimalizovat. V jeho práci je podrobně popsán celý proces tvoření řídicí jednotky. Na základě jeho práce dostaneme všeobecný přehled o tom jak jednotlivé procesy fungují od návrhu až po implementaci.

2.4.3 Fuzzy řízení směřování směsi

Fuzzy řízení, jak název napovídá je založeno na modelu fuzzy logiky. Fuzzy logika je matematický systém, který převádí analogové hodnoty na jednoduché logické hodnoty.

V základu fuzzy logiku rozdělujeme na tři fáze :

- Fuzzifikace
- Rozhodování
- Defuzzifikace

Fuzzifikace nám převádí podle daného předpisu analogové vstupní veličiny na logické hodnoty. Podle těchto logických veličin pak v rozhodovací části určíme, jak se systém bude chovat. V defuzzifikaci toto rozhodnutí zase převedeme na nějaký analogový výstup. Jak se celkový systém bude chovat záleží samozřejmě hlavně na tom, jak jsou jednotlivé fáze nastaveny. V případě zájmu zde čtenář může nalézt zdroje, které popisují proces fuzzifikace a defuzzifikace, tak i to, jak by rozhodování podle nich mělo vypadat (Lee 1990) (Thrift 1991) (Piltan et al. 2011).

Fuzzy rozhodování je intuitivní způsob jak řídit poměr směsi u jednodušších spalovacích systémů. První implementace začínají od roku 1996 (Kong and Miyeon 1996). Například Ghaffari prezentoval metodu přímého řízení pomocí adaptivní fuzzy logiky (Ghaffari et al. 2008). V roce 2012 byla prezentována metoda pro řízení komplexního nelineárního modelu s takzvaným "korekčním učením" kde uživatel za chodu upravuje chování modelu (Morelos and Marín 2012).

2.4.4 Kombinace Fuzzy řízení a Neuronové sítě

Jak neuronové sítě, tak i fuzzy logika má své nedostatky. Jedním z hlavních problémů neuronové sítě je zpětná propagace při její trénování. Naopak u řízení fuzzy logikou se můžeme potkávat s nespolehlivou generalizací. Lze najít i několik publikací, kde díky kombinaci těchto dvou způsobů řízení bylo dosaženo slibných výsledků. Například Liu a Zou dosáhli určitého úspěchu se svou prací, kde právě systém s fuzzy neuronovou sítí byl použit na řízení spalovacího motoru (Liu and Zhou 2010). Podobný systém byl aplikován i na motor s CNG. Publikace o tom je napsaná výzkumníkem jménem Weige (Weige et al. 2002).

2.4.5 Využití sparse Bayesian učícího algoritmu

Jeden ze způsobů jak zkrátit dobu nutnou k vytvoření palivové mapy, je prezentován v této práci s názvem "Sparse Bayesian extreme learning machine" (SBELM). V této práci jsou popsány požadavky na matematický model pro tento učící algoritmus. Díky němu lze predikovat chování motoru a tím provést rychlou online recalibraci řídicí jednotky. V této práci je i provedeno porovnání s jinými učícími algoritmy. Navrhovaný SBELM si vedl stejně nebo lépe, co se týče přesnosti, než standardní ELM, Baesian EML nebo neuronová síť se zpětnou propagací (Wong et al. 2015).

2.4.6 Kalibrace palivové mapy s least squares support vector machine and genetic algorithm

V této práci z roku 2008 (“Automotive engine idle speed control optimization using least squares support vector machine and genetic algorithm”) je prezentován algoritmus nejmenších čtverců zabudovaný do rozhraní, které se přizpůsobuje vlastnostem vytvořeného modelu spalovacího motoru a tím vytváří nejlepší kombinaci parametru pro palivovou mapu.

2.4.7 Rekonstrukce točivého momentu z úhlu klikové hřídele

V roce 2004 byl proveden výzkum, kde s pomocí Support Vector Machines (SVMs) byl vytvořen systém pro rekonstrukci točivého momentu z úhlu klikové hřídele. Točivý moment je jeden z parametrů, který se obtížně přímo měří.

SVM přístup ale toto dokáže podle slov autorů rekonstruovat pouze podle otáček motoru v reálném čase. (Gani and Manzie 2004) Tento systém je možné aplikovat na jakýkoli motor a tím obohatit systém o další vstup informací, v případě že máme k dispozici nevyužitý výpočetní výkon.

2.4.8 Síťování v Návrhu řídicí jednotky

Většina řídicích jednotek je postavena na mikrokontroléru a ne na procesoru, jak jej známe z klasických osobních počítačů. Důvodem je nutnost rychlé odezvy reagující na rychle se měnící stav motoru. Ani procesorové architektury s omezeným setem instrukcí (RISC) nedokáží poskytnout dostatečnou odezvu v porovnání s obyčejným mikrokontrolérem. Na druhou stranu ne každý mikrokontrolér má dostatek výpočetní síly pro provoz výpočetně složitějších algoritmů. Jedno z možných řešení je jednoduché síťování. Výsledný produkt může obsahovat jak standardní procesor tak mikrokontrolér. Všechny náročné výpočetní úkony, které není potřeba provádět v reálném čase, budou tím pádem přeposlány na procesor, a samotný mikrokontrolér pouze řídí motor podle daného předpisu.

Tento přístup ale vytváří tyto překážky:

- Celková komunikace v síti musí být zabezpečena vůči výpadkům a chybám v přenosu. Prostředí motoru obsahuje silné zdroje elektromagnetického rušení které toto komunikaci může ovlivnit
- Je nutné zajistit komunikaci mezi pomalým a rychlým modulem

Například v této práci (Ellims, Parker, and Zurlo 2002) je ukázáno, jak se lze s těmito překážkami vypořádat. Místo jedné centrální řídicí jednotky bylo použito více jednoduchých modulů s omezeným výpočetním výkonem a tím byla ke konci omezena výsledná cena. Komunikace mezi těmito moduly byla řešena pomocí CAN2.0B (controller area network) protokolu.

3 Metodika řešení

Dle literárního přehledu jsem zvolil řízení fuzzy logikou, protože je implementačně nejefektivnější a lze přizpůsobit každému jednoduchému motoru. Tuto logiku chceme implementovat na malý spalovací generátor který tím bude přestavěn na plyn, jako zdroj paliva. Spalovací motor není lehké namodelovat, s ohledem na dostupné zdroje, je v dostupných podmínkách levnější a rychlejší ověřit navržené řešení experimentem. V první fázi bude zvolená řídicí elektronika a ostatní moduly, potřebné k implementaci. Poté, až víme na kterou platformu se chystáme řešení implementovat, bude navržena základní logika. Samotný generátor je potřeba nejdříve na přestavbu připravit, a před tím poznamenat jeho výchozí stav k porovnání. Poté je nutné začít postupně přestavovat jednotlivé části a testovat jejich funkčnost samostatně. Až se dostaneme do fáze že jednotlivé části fungují podle našich představ, můžeme implementovat zvolenou logiku na navrženou platformu. V závěru chci porovnat vlastnosti generátoru před a po přestavě, zhodnotit ekonomickou efektivitu zvoleného řešení, zjistit zdali řešení jde minimalizovat pro komerční prodej, navrhnout možné rozšíření a zamyslet se nad využitím této práce budoucnosti. Ke konci bude navržené řešení celkově zhodnoceno s ohledem na možné praktické využití v rámci osobních projektů.

4 Výběr nebo návrh platformy

Návrh vlastní vývojové desky popřípadě integrace všech prvků do jednoho plošného spoje je technicky nejlepší řešení. Toto řešení je cenově výhodné pouze v případě, že ho plánujeme distribuovat masivně za účelem profitu, což ale není cílem této práce. Pro otevřené řešení je lepší použít volně dostupné vývojové desky.

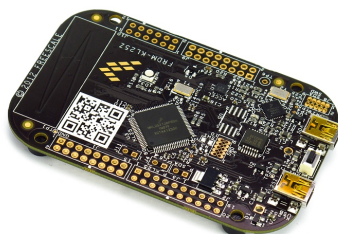
4.1 Vývojové desky

Na českém trhu jsou dostupné téměř všechny desky od velikých výrobců. Naštěstí z větší části tato řešení používají programovací jazyk C++ takže přechod mezi nimi není programaticky neřešitelný. Jmenovitě jsou nejpožívanější desky od těchto výrobců:

- Arduino a jeho clony
- Rapsberry PI a clony
- Freescale
- Beaglebone
- STMicroelectronics
- Atmel

Výběr platformy je očividně spíše věcí vkusu, nejde jednoznačně říci, že by jedna platforma byla výrazně lepší, ve všech směrech. Arduino a jeho klony jsou na trhu nejlevnější, ale jejich stabilita je diskutabilní a pro projekt, který může doslova explodovat není nejvhodnější.

Rapsberi Pi nebo méně známý Beaglebone jsou řešení vhodné pro distribuované systémy. Tento projekt v budoucnu do automatizovaného distribuovaného systému zařadit půjde, ale do té doby není potřeba plnohodnotný ARM procesor. Freescalem, STM a Atmel nabízí velké množství řešení pro domácí a průmyslovou automatizaci. V tomto projektu jsem zvolil KLM-25z od výrobce Freescale, hlavně díky kompatibilitě s Arduinem a kvůli výhodám Mbed platformy.



Obr. 8: Vývojová deska FRDM-KL25Z

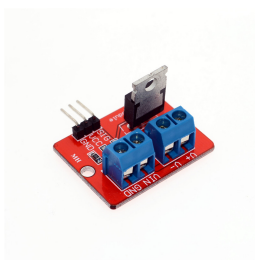
Tato vývojová deska s výrobním označením "Freescale Freedom FRDM-KL25Z" (obr. 8) je jednoduchou programátorskou sadou s mikroprocesorem Kinetis řady L, založenou na jádru ARM Cortex-M0+. Dokumentaci s popisem této desky lze nalézt na stránkách výrobce (<https://developer.mbed.org/platforms/KL25Z/>).

4.2 Moduly a měřené veličiny

Díky platformě Arduino máme k dispozici velké množství modulů za minimální cenu, díky čemuž můžeme měřit levně více veličin. Myšlenkou mého projektu je právě maximální využití, již prodávaných modulů. Jmenovitě tyto moduly se podle parametru hodí pro tento projekt.

4.2.1 Spínací moduly

V mém projektu je potřeba ovládat vstřikování, zapalování a popřípadě i různá relé, podle potřeby. Není nutno zde spínat vysoké výkony, nebo vytvářet subnanosekundové impulzy, takže jakýkoliv spínací modul na bázi technologie mosfet, který je možno ovládat 3v3 logikou, by měl být více než dostatečný. Pro to byly vybrány nejlevnější moduly na trhu (obr. 9), cena jednoho je kolem 0,6 USD.



Obr. 9: Nejednodušší dostupný spínací modul

V praxi se ale tato volba se neukázala jako vhodná, více info níže.

4.2.2 Vstřikování

Jednou z nejdůležitější funkcí mnou navrhovaného systému je právě vstřikování. U takto malého systému výběr vstřikovače není zásadní, protože veškeré komerčně prodávané vstřikovače navržené pro motocykly a automobily hravě překonávají požadavky našeho malého spalovacího motoru. Jediným požadavkem je dodržení správného druhu vstřikovače. Není doporučováno používat vstřikovače určené pro kapalná paliva v kombinaci plynnými palivy a naopak. Pro tento projekt byl vybrán jeden z nejlevnějších tuzemský vyráběných vstřikovačů "Magic Jet" od firmy HL propan. Parametry viz tabulka 1.

Tab. 1: Sumarizace Parametrů Vstřikovače:

Druh paliva:	LPG / CNG
Maximální propustnost:	52 ccm (Vzduch 1 Bar při délce pulzu 24 ms) cca 60 HP/cyl., 1,5 Bar rel.
Očekávaná životnost:	250 000 000 cyklů, 200 000 km (2500 RPM, 60km/h)
Maximální provozní frekvence:	300 Hz
Typová odezva:	(+12V DC ON) 2,2ms ± 0,2 ms (Při tlaku 1Bar)
Odezva na uzavření :	1ms ± 0,2 ms (1Bar rel. air)
Provozní teplota:	-20°C ÷ 120°C
Filtrační požadavky na plyn:	80 microns
Provozní tlak:	0,5 ÷ 4,5 Bar
Elektrické Parametry:	
Operační napětí:	10V DC
Odezva na vzestupnou hranu:	4 ms
Otvírací (Nárazový) proud:	1,8 A / 3,6V (Při tlaku 1Bar)
Proud při otevření:	1,0 A
Spotřeba při otevření:	12W (12V)
Elektrický odpor:	2 Ohm (20°C)
IP třída ochrany:	IP65

4.2.3 Ovládací prvky

Vzhledem k tomu, že tento projekt je určen pro osobní použití a testování, je od něj vyžadováno určité základní uživatelské rozhraní. Z praktického hlediska toto není něco, co má smysl mít na komerčním generátoru, ale pro mé testování je to velice pohodlné, máme-li možnosti vidět základní parametry na displeji a můžeme je upravovat.

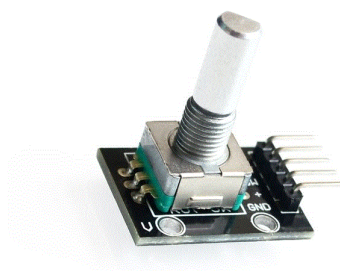
Vzhledem k ceně jsem použil rotační enkodér se středovým tlačítkem (obr. 11) a malý QVGA display (obr. 10). Výhodou tohoto modulu displeje je, že obsahuje i čtečku na SD karty, takže máme možnost externího úložiště v případě, že se rozhodneme implementovat v budoucnu nějaké složitější řízení.

4.2.4 Plynové Příslušenství

Jako zdroj paliva byla použita dvou-kilová propan-butanová plynová láhev. Na ni byl v první fázi napojen ventil a za něj jako ochrana zpětná klapka proti záslehu. Později se tohle neukázalo jako spolehlivé řešení a bylo nutno nahradit tuto klapku regulátorem tlaku (obr. 12).



Obr. 10: Obrázek použitého vstřikovače



Obr. 11: Použitý rotační enkodér



Obr. 12: Modul displeje



Obr. 13: Použité plynové příslušenství

5 Návrh otevřené platformy pro řízení a monitorování 4-taktního spalovacího motoru, se zaměřením na plynná paliva

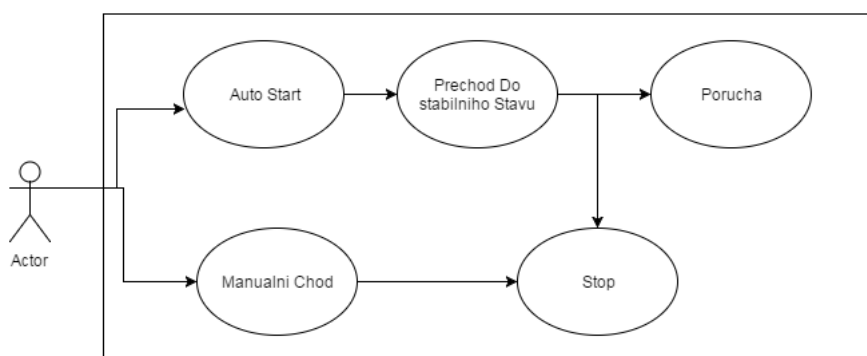
Cílem mého návrhu je vytvořit co nejjednodušší funkční systém, který se pak bude upravovat na míru jednotlivým generátorům.

5.1 Základní funkce systému

- Studený start
- Chod se zpětnou vazbou
- Chod bez zpětné vazby
- Zobrazení základních veličin
- Rozeznání poruchového stavu
- Zaznamenávání všech událostí po USB portu

5.2 Formální zápis / Návrh Systému

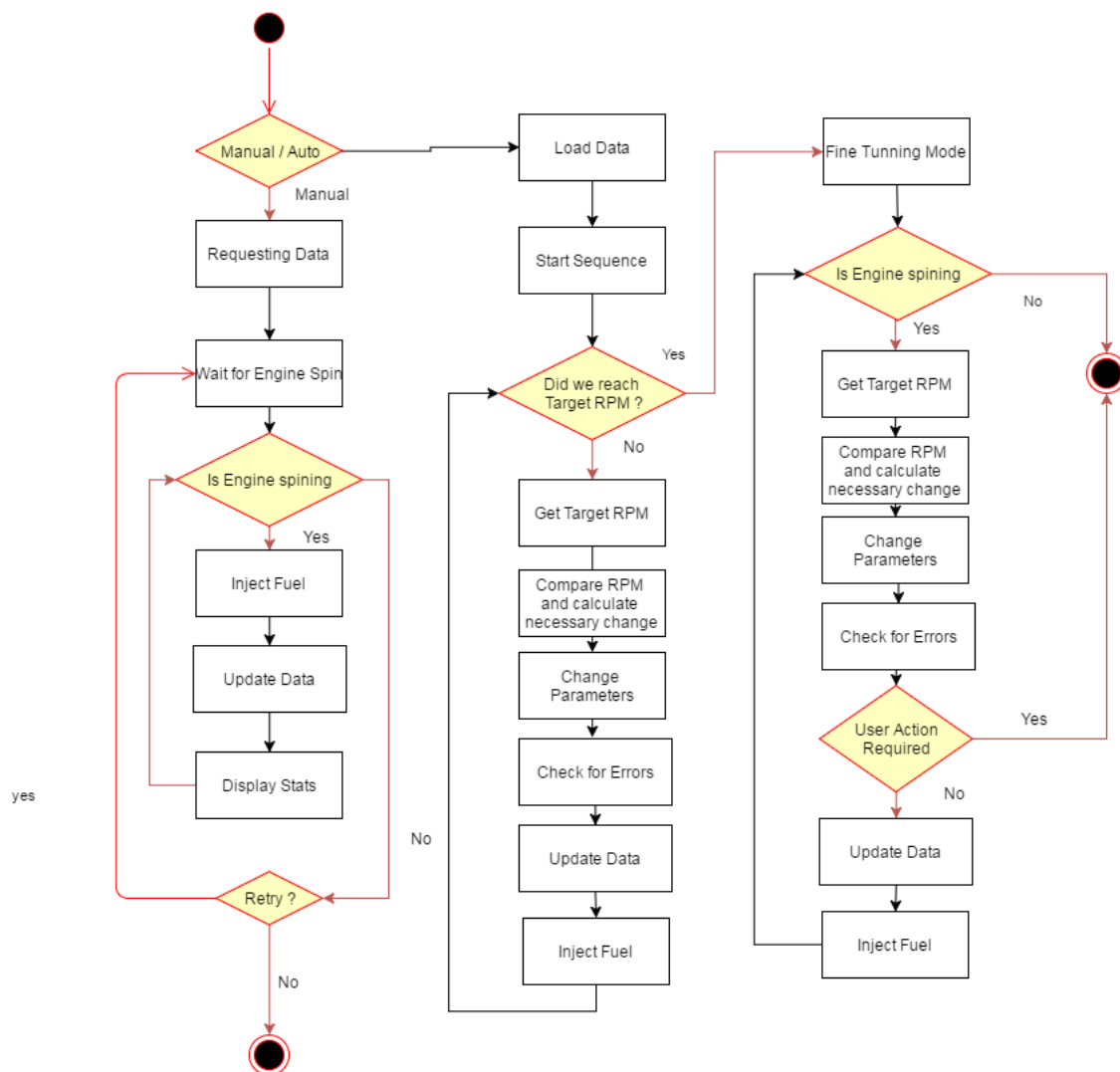
Veškeré diagramy jsou v angličtině, aby mohly být pochopeny i nečesky mluvící komunitou. Z pohledu uživatele bude možné zvolit dvě různá nastavení/mody systému. Při manuálním modu uživatel kontroluje množství vstřikovaného paliva a čas vznícení manuálně. Zde žádná automatizace není očekávaná, právě naopak tento stav je určen pro manuální testování. Automatický chod je určen pro normální automatizovaný provoz. Uživatel prostě centrálu nastartuje a používá. V tomto chodu se centrála snaží dosáhnout určitých otáček (obr. 14).



Obr. 14: Use Case diagram

Z pohledu systému (Obr.15) se stavy nemění, jen pro automatický chod přibudou dva podstavy: start (Start Sequence) and provoz (Fine Tuning). V praxi

startování spalovacího motoru je problematické a není možné pro něj použít stejné rozhodování jako pro motor v chodu. Samotný diagram se může jevit složitý, ale jednotlivé funkce se opakují.



Obr. 15: Vnitřní chování

5.2.1 Popis manuálního chodu

Jak bylo zmíněno a již vyplývá z názvu, manuální chod je plně řízen uživatelem. S řídicí jednotkou lze komunikovat přímo pomocí displeje a rotačního enkodéru anebo nepřímo, přes sériové připojení k počítači. Jako první krok si jednotka musí vyžádat vstupní parametry (Request data) jmenovitě moment vstřikování a dobu otevření vstřikovače. Pak se čeká na roztočení motoru (Wait for Engine Spin). Z bezpečnostních důvodů si nepřejme, aby palivo bylo vstřikováno pokud motor stojí.

Ve chvíli kdy se motor točí, můžeme vstříkovat zvolené množství paliva (Inject Fuel), aktualizovat a počítat měrné veličiny (Update Data) a zobrazit vše uživateli aby se mohl rozhodnout, zdali chce měnit vstupní parametry do systému. Toto se opakuje tak dlouho, dokud je systém v chodu. V případě že se motor zastaví, je potřeba manuálně proces restartovat.

5.2.2 Popis automatického chodu

V automatickém modu má systém tyto hlavní úkoly:

- Roztočit motor na požadované otáčky
- Udržovat otáčky a regulovat co nejpřesněji vstupní veličiny podle měřených veličin
- Zajistit a kontrolovat jestli systém je v chodu a neohrožuje okolí

Systém potřebuje nejdříve načíst výchozí vstupní parametry (Load Data) a roztočit motor. Vstupní výchozí parametry se budou lišit podle typu motoru a paliva. V startovací sekvenci (Start Sequence) se snažíme dosáhnout požadovaných otáček. V každém cyklu porovnáváme naměřené otáčky s našim cílem (Compare RPM and Calculate Change), a podle toho můžeme rozhodnout, zdali je potřeba změna vstupních veličin do systému (Change Parameters). Než dojde k samotnému vstříkování (Inject Fuel), kontrolujeme zdali nenastala chyba (Check for Errors) a měříme/počítáme měřené veličiny.

Toto se opakuje tak dlouho, dokud nedosáhneme požadovaných otáček nebo se motor nezastaví (bráno systémem jako chyba). V tomto stavu je potřeba aby motor nebyl zatížen - toho lze dosáhnout výstrahou anebo odpojením výstupního generátoru. V případě, že dosáhneme požadovaných otáček, můžeme je udržovat podle zátěže na motoru (Fine Tuning). Zde jsou stejné bloky a princip jako při startování, ale vstupní veličiny se mění jinak. Dalším rozdílem je, že v tomto stavu systém už nemusí být pod přímou kontrolou uživatele a musíme vyhodnocovat chyby podle jejich důležitosti, a v případě že vyžadují akci ze strany uživatele nebo ohrožují systém, lze systém zastavit.

5.2.3 Popis vnitřní logiky

Z podstaty spalovacího motoru se nám opakují 4 cykly. Výstupní frekvence se řídí rovnicí: $f = (N * P) / 120$

Kde:

- f je frekvence generátoru
- N je počet otáček
- P je počet magnetických pólů

Z toho můžeme dopočítat, že naše dvoupólová centrála má běžet na 3000 otáčkách za minutu. Takže za vteřinu máme 50 těchto cyklů, čímž na jeden cyklus připadá 20 milisekund. A to navíc očekáváme od mikrokontroléru, že mimo rozhodování o tom, kolik paliva vstříknout v daný moment, bude obsluhovat display, hlídat senzory a posílat informace po sériové lince. Tím se dostávám k závěru, že zde nemáme prostor na složité výpočty a proto je potřeba veškerou logiku co nejvíce zjednodušit.

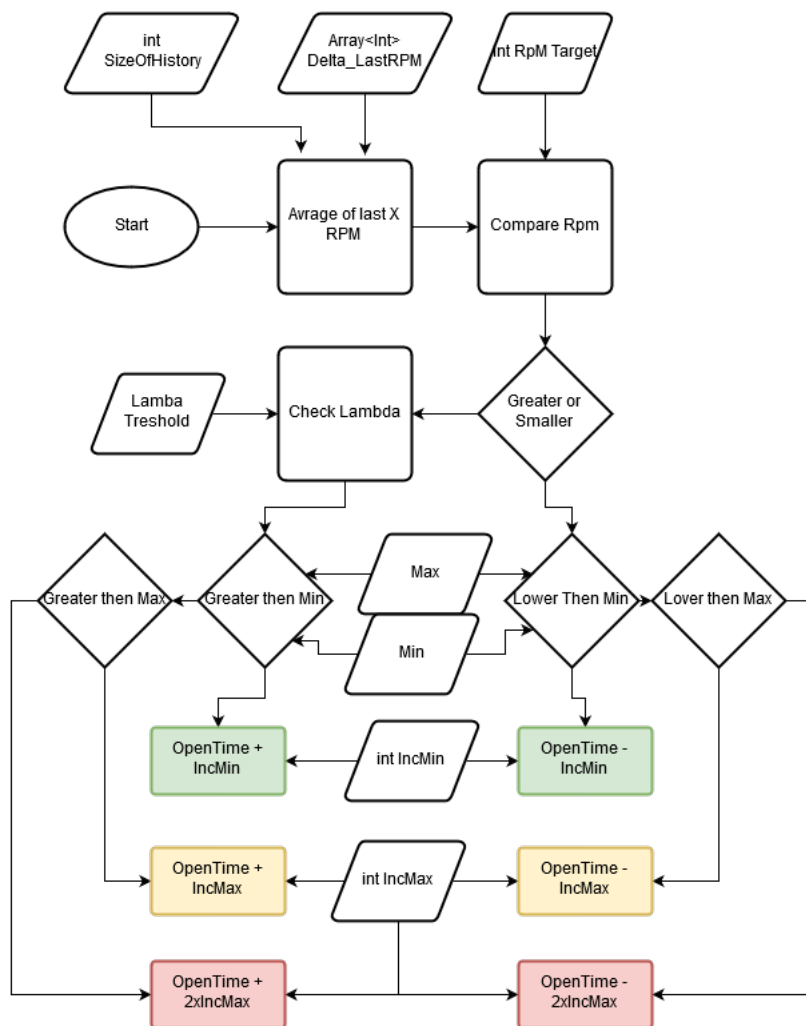
Tento návrh je experimentální a není zaručeno že bude fungovat bezchybně. Byla by sice možnost celý systém nasimulovat, ale simulace systému by zabrala podobou dobu, jako jeho fyzické vytvoření a neposkytla by mé osobě až tak moc zkušeností.

I v případě, že samotná logika bude po vyladění fungovat správně na tomto motoru, je možné očekávat, že bude fungovat jinak na jiných motorech a jiných vývojových deskách. Pokud chceme mít "nadstandardní" funkce jako display a "Real time monitoring" tyto funkce budou vytěžovat mikrokontrolér taky. V případě, že na tento problém narazíme, bude nejjednodušší, když omezíme množství výpočtů tím, že rozhodovací část nebudeme spouštět každou otáčku, ale jednou za několik otáček. Jádrem kl25z je čip Cortex M0, který zvládá multi-vláknové operace a finální verze projektu určitě multivláknová bude. Vzhledem k tomu, že se v multivláknových programech hůře hledají chyby v domácím prostředí, veškeré betaverze a návrh je na jednom vlákně.

Celé rozhodování je postaveno na fuzzy logice (obr. 16), takže veškeré vstupní veličiny do systému musí být upraveny pomoci určité míry abstrakce. Hlavním parametrem jsou samotné otáčky. V případě, že bychom se rozhodovali pouze na základě samotných otáček, systém by byl nestabilní. Proto se veškeré naměřené otáčky ukládají do fronty, která tvoří takovou krátkou historii otáček za X cyklů. Velikost této fronty určuje pravé proměna "SizeOfHistory". Z této historie pak můžeme rychle vypočítat průměr, který se pak porovnává s cílovou hodnotou otáček. Cílem toho úkonu je získat informaci o tom, zdali otáčky klesají nebo stoupají a jak rychle.

Samozřejmě, veškerá rozhodovací logika je aktivní pouze v případě, že otáčky neodpovídají danému intervalu. V našem případě chceme simulovat Evropskou elektrickou rozvodnou síť, takže 50 Hz +/- 5 procent, což odpovídá 2850 - 3150 otáčkám za minutu. Logika pracuje ze 6-ti intervaly, které jsou dané pouze dvěma konstantami Min a Max. V první kroku rozhodujeme pouze o tom, zdali otáčky klesají nebo stoupají. A pak situaci vyhodnotíme jako následující možnosti.

- Otáčky klesají Málo, rozdíl mezi aktuálním průměrem a cílem je menší než "Min"
- Otáčky klesají Středně, rozdíl mezi aktuálním průměrem a cílem je větší než "Min", ale menší než "Max"

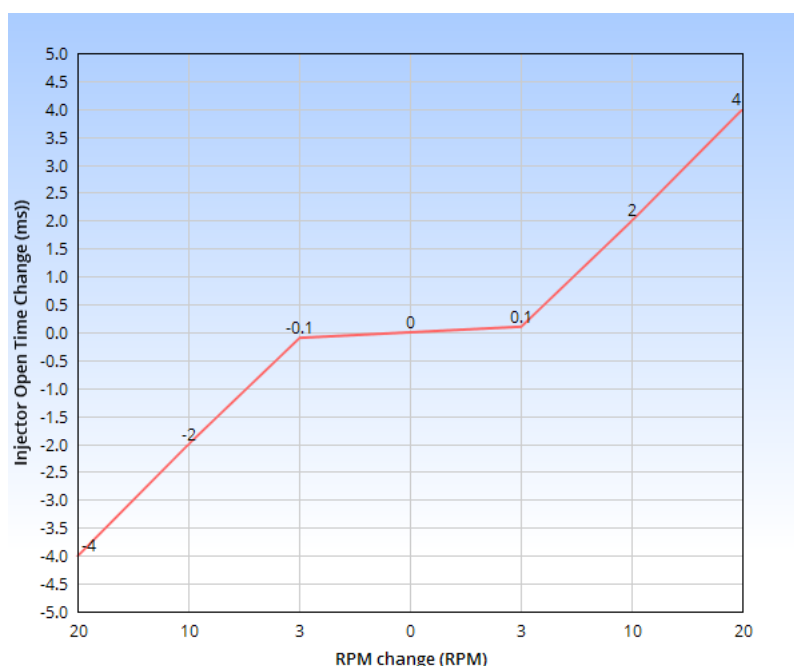


Obr. 16: Závislost změny doby otevření vstřikovače na změně otáček

- Otáčky klesají Hodně, rozdíl mezi aktuálním průměrem a cílem je větší než "Max"
- Otáčky stoupají Málo, rozdíl mezi aktuálním průměrem a cílem je menší než "Min"
- Otáčky stoupají Středně, rozdíl mezi aktuálním průměrem a cílem je větší než "Min", ale menší než "Max"
- Otáčky stoupají Hodně, rozdíl mezi aktuálním průměrem a cílem je větší než "Max"

Díky tomu se pak rozhodujeme o kolik paliva v příštím kroku máme vstříknout, a v programu pak máme odpovídající konstanty "IncMin" a "IncMax". Dobu vstřikování vyjadřujeme v programu v milisekundách, k této hodnotě pak

připočítáváme tyto dané konstanty(obr. 17).



Obr. 17: Závislost změny doby otevření vstřikovače na změně otáček

V praxi to pak bude vypadat jako na obrázku (opening injector). Malá změna nebo rozdíl v otáčkách bude mít za následek v jednom cyklu malou změnu ve velikosti vstřikovaného paliva. Veliká změna v otáčkách bude naopak mít za následek velikou změnu v množství vstřikovaného paliva. Dostáváme se k výhodě tohoto přístupu, kdy typ nebo kvalita paliva by neměla ovlivnit chování systému, protože celý systém je řízen rozdílem otáček a vždy by se měl v určitém intervalu otáček. Pomocí výstupu z lambda sondy naopak můžeme omezit nejvyšší možný čas otevření vstřikovače, díky čemuž se nestane, že vstřikujeme více paliva než je možné spálit, a tím i zamezit vytváření emisí. Mimoto tento limit musí být dán i programaticky pro případ, že se rozhodneme neměřit přebytek kyslíku nebo tato sonda bude nefunkční. V diagramu je to vyjádřeno jako "Lambda treshold". Oproti klasickému diagramu systém nastavujeme podle motoru díky 7 konstantám, což je mnohem jednodušší, než ladění výkonových map se stovkami hodnot. Zde je popisovaná hlavní funkce zapsaná kódem :

```
float getNewOpenTime(int Min, int Max, int Target, int TresholdL, int
IncMin, int IncMax){
    int avrLastRPM = CalcRpm(); // dopocitavame prumerne otacky z historie
    int idledif = 150 ; // +- 5 procent
    int RPM = getRPM();
    if( (RPM < (Target - idledif )) or (RPM > (Target + idledif)) ){ //
        porovnavame
        if ((RPM < (Target - idledif ))){
            if (( Target - (idledif - RPM)) < Max){return IncMax*2;}
            if (( Target - (idledif - RPM)) > Min){return IncMax;}
            if (( Target - (idledif - RPM)) < Min){return IncMin;}
        }

    }

    if (RPM > (Target + idledif))){
        if(GetLambda() > TresholdL){SendWarning("lambda treshold");
            break;}
        //pro logovani at vidime proc se hodnot a nemeni
        if (( (idledif + RPM) - Target) < Max){return IncMax*2;}
        if (( (idledif + RPM) - Target) > Min){return IncMax;}
        if (( (idledif + RPM) - Target) < Min){return IncMin;}
    }

}
}
```

6 Návrh bezpečnostních prvků, analýza rizik

Spalovací motor nepatří k nejbezpečnějším zařízením, proto je třeba při jeho provozu a manipulaci s ním dbát určitých bezpečnostních pravidel. Úplný popis rizik vyplývajících z návrhu generátoru lze nalézt v bezpečnostním listu od výrobce.

- Samotný spalovací motor se může přehřát a způsobit požár, nebo díky přehřátí poškodit sám sebe. Veškeré spalovací motory mají doporučenou provozní teplotu, kterou můžeme levně měřit jakýmkoliv termočlánkem a v případě přehřívání motor zastavit.
- Co se týče výfukových plynů, na malých motorech, dle naší legislativy není nutno měřit přebytek kyslíku. V případě, že tento systém plánujeme používat v uzavřené místnosti, výfukové plyny musí být vyvedeny mimo ni. V rámci tohoto specifického požití je plánováno použít lambda sondu nebo alespoň náhradu ve formě levného kyslíkového nebo plynového senzoru. Paradoxně senzor plynu a senzor kyslíku je téměř ve stejné cenové relaci. Problém je pouze s tím, že tyto senzory nejsou určeny pro vysoké teploty a nejdou umístit přímo za motor. Je však možné část výfukové směsi chladit a měřit. Otázkou ale je, jak je toto řešení v konečném důsledku efektivní a cenově výhodné. Nepodařilo se mi o tom najít moc informací "proč ne", ale předpokládám že důvodem bude životnost řešení.
- Zde se jedná konkrétně o motor, který je připojen přímo ke generátoru a hrozí nebezpečí úrazu elektrickým proudem. V ideálním případě je doporučováno použít proudový chránič, ale při normálním používání by měl dostatečně jistič k zajištění základní ochrany vůči nadproudům a zkratům.
- Veškeré plynové vybavení je doporučeno kontrolovat před použitím a je doporučeno aby byl uživatel proškolen ohledně bezpečnosti práce s plynovým zařízením a tlakovými nádobami.
- Vzhledem k tomu, že v mém návrhu jsou využity prvky určené pro domácí a nikoli průmyslovou automatizaci, musíme minimalizovat riziko jejich selhání. Nízkonapěťové vstupy je potřeba oddělit a stínit vůči rušení.
- U dražších elektrocentrál se výrobce snaží udržet všechny pohyblivé části motoru a generátoru zakrytované což zároveň slouží jako stínění. U mého finálního řešení je plánováno to udělat taktéž. Celkové řešení musí mít alespoň IP55.

Teplotu motoru v mém případě stačí měřit obyčejným NTC termistorem (100k), se kterým je velmi jednoduchá práce, protože teplota tohoto malého motoru v mých testech nepřesáhla 100 stupňů Celsia. V případě poruchy je vhodné oddělit tlak z tlakové nádoby, vůči tlaku v rozvodném vedení, například reduktorem. Tím zajistíme, že ve všech přívodních hadicích je nižší stabilní tlak (menší opotřebení - nižší šance na poruchu), a navíc v případě, že se nám zapálí směs před nasátím do

válce, nezávisí naše bezpečnost pouze na správné funkci vstřikovače. Programaticky nechceme otvírat vstřikovač v případě, že se generátor netočí. V případě, že otáčky nejsou v normálním intervalu, motor stojí anebo informace o otáčkách není dostupná, je to vyhodnoceno jako chyba.

6.1 Start a roztáčení motoru

Samotný motor, který je v této práci používán nemá elektrický startér (roztáčí se ručně). Pro testování je toto řešení silně nepraktické, proto generátor roztáčím jednoduše akumulátorovou vrtačkou. Prvním problémem je, že tato logika řízení začíná od nulové doby otevření vstřikovače, takže potřebuje i několika vteřinové roztáčení. Toto by šlo upravit nastavením tohoto počátečního bodu na vyšší hodnotu, ale pak nesmíme použít hořlavější palivo. Dalším problémem je, že v době startování se motor může zastavit, což v tomto případě nemá být vyhodnoceno jako chyba. Proto samotné startování je vlastně samotný stav kde bezpečnostní prvky nejsou aktivní.

7 Přestavba elektrocentrály z mechanického řízení na elektronické

Návrh je aplikován na Elektrocentrálu "Unitedpower GG 1300" zakoupenou v roce 2013 (obr. 18). Byla zakoupena jako poškozená, díky tomu že při prezentaci na prodejně praskla pružina vracející startovací provaz zpět do výchozí pozice. Díky tomu její prodejní cena byla snížena o polovinu.



Obr. 18: Elektrocentrála Unitedpower GG 1300

7.1 Přestavovaný motor a jeho chování

První pohled na parametry elektrocentrály vzbuzuje dojem dobře investovaných peněz. Podle slov jednoho z prodejců. "GG 1300 je malý, tichý a stabilní benzínový generátor elektřiny, poháněný čtyřtákním motorem o výkonu 2,4 HP o objemu 87 cm³" (zdroj : <https://cz.hecht.cz/hecht-gg-1300-benzinovy-generator/>). Jedná se o jeden ze starších standardních návrhů spalovacích motorů čínské výroby který jednotlivý výrobci používají ve svých elektrocentrálách. Oficiální parametry tohoto výrobku jsou zmíněny v tabulce.

Bohužel moje osobní zkušenost s tímto produktem je silně negativní a myslím si, že je nevhodný pro jakékoliv použití, ve stavu v jakém je prodáván (pochopitelně zde ignoruji závadu startéru, díky které byla snížena cena výrobku). Prvním problémem je hluk. Tato elektrocentrála je prodávána jako tichá, což rozhodně není, ani podle umělecké nadsázky ve formě 93 dB v parametrech. Prakticky při provozu jsem naměřil 105 db jednoduchou android aplikací na telefonu, co může znít jako

Tab. 2: Parametry

Hmotnost	28 kg
Motor	Hecht 4-taktní
Obsah motoru	87 cm ³
Výkon	2,4 HP
Typ pohonu	Spalovací benzínový motor
Hladina hluku	93 dB
Trvalý výkon	900 W
Maximální výkon	1100 W
Výstupní napětí	1 x ~230 V / 50 Hz, 1 x =12 V

absolutně nevhodný způsob měření, ale studie ukazují, že výsledky měření hluku pomocí mobilních telefonů jsou mnohem přesnější, než bych osobně očekával (Kardous, Shaw, and Murphy 2016). Tento problém vznikl díky tomu, že motor není dobře odizolován od konstrukce, přesněji "tlumicí bloky" obsahují šroub jdoucí skrz tento blok, což je určitě levné řešení, ale v praxi nedává moc smysl. Tím pádem se vibrace z motoru přenášejí (je tam kontakt kovu na kov) na konstrukci a i na okolí, což generuje nadměrný hluk. Mnohem závažnějším problémem byl ale kohout mezi karburátorem a benzinovou nádrží, který při otevření prosakoval mimo přívodní hadici, a díky tomu kapal benzín přímo na motor. Podle internetových diskusí je to častá závada - osobně ale považuji tuto závadu za velký problém, protože se může palivo dostat na rozžhavený motor. Pak se dostáváme k samotnému chodu generátoru: Po prvním spuštění jsem nastavil otáčky "na prázdno" aby frekvence odpovídala 50 Hz. Pak byl ke generátoru připojen obyčejný 900 W mixer, ale bohužel otáčky spadly rychle dolů a po pár vteřinách se generátor zastavil. Původní předpoklad byl, že je něco špatného s karburátorem, ale pak jsem našel v parametrech malým písmem napsáno: *"Údaje o výkonech motorů jsou měřené při 3600 ot/min-1. Tohoto výkonu stroj při běžném použití nedosáhne. Pro přesné porovnání výkonu motoru použijte údaje o obsahu a typu motoru"*. To znamená že tabulkové parametry platí pouze pro 60 hz systémy. V ideálním světě, kde otáčky přímo odpovídají výkonu by tedy podle oficiálních parametrů motoru měl dotahovat 750 W stabilního výkonu při 50 hz. V dalším testu s regulovatelnou zátěží jsem se dostal na stabilních cca 670 W bez ztráty otáček, což mi subjektivně přijde velmi málo na motor s výkonem 2,4 HP. Měření bylo prováděno pomocí digitálního wattmetru, který podle manuálu má přesnost +- 1 procento. Jak jsem už zmínil výše, celkově tento produkt hodnotím jako nevhodný pro praktické použití. Očekávám, že po přestavbě se zvedne množství generované energie alespoň na 70 procent uvedeného hrubého výkonu samotného spalovacího motoru.



Obr. 19: Výkon generátoru před přestavbou

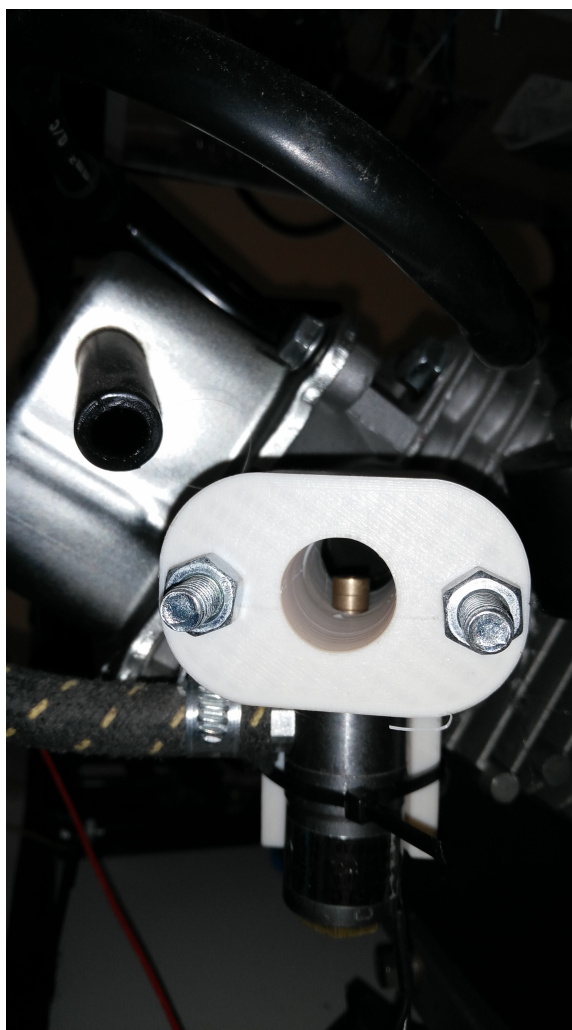
8 Implementace návrhu

V první fázi bylo nutno odstranit veškeré nepotřebné části, veškeré mechanické řízení bylo odstraněno spolu s benzinovou nádrží a filtry. Zde jsem se dopustil jedné z prvních chyb a to že jsem dostatečně nezdokumentoval, kde přesně byla původní vzněcovací cívka uchycena. Začal jsem se vstřikováním a uchycením vstřikovače (obr. 20), kde se vytvořil jednoduchý model pro úchyt vstřikovače tak aby seděl přesně vůči danému motoru. Pak se daný díl vytiskl na 3D tiskárně a po třech iteracích jsem se dostal na použitelný produkt. V této práci je použito více plastových dílů i na místech, kde plast z dlouhodobého hlediska není vhodný, ale je v plánu veškeré části, které jsou v přímém kontaktu s motorem, nechat vyrobit na zakázku až bude projekt hotov. Pro tisk byl použit Acrylonitril/Styren/Alkylakrylát (ASA) a Polykarbonát, což jsou plasty s dobrou tepelnou odolností. Naštěstí motor nedosahuje po dobu našich krátkých testů vysokých teplot a zatím nebyla překročena teplota tání těchto plastů. Pro jistotu je právě mezi vstřikovačem a motorem navíc použita izolační podložka z bakelitu takže přenos tepla není přímý.

K samotnému vstřikovači byla dokoupena odpovídající hadička a pro mé testy používám dvoukilovou plynovou nádobu. Podle parametrů vstřikovače je jeho maximální tlak čtyři bary. Tyto malé plynové nádoby mají mít tlak pod dva bary podle parametru prodejce, takže pro 90 procent spotřebičů není potřeba reduktor (redukční ventil). Zde nastal jeden z prvních problémů. Nejsem si úplně jistý proč tomu tak je, ale zvolený vstřikovač nepracuje správně s tlakem větším než 1,3 bar. Projevovalo se to tím, že se vstřikovač několikrát otevřel ale po neurčité době se bezdůvodně zasekl. Nezbyvalo nic jiného než si pořídit regulovatelný reduktor a po snížení tlaku na jeden bar vše funguje v pořádku. Odhaduji to na výrobní vadu, protože jsem například na internetových diskusích nenašel nikoho s podobným problémem.

Další z problémů, na které jsem narazil, byla nespolehlivost spínacího modulu. Teoreticky na této elektronické součástce není co pokazit a IRF520 je jeden z mála mosfetů, který lze spínat pomocí 3,3V logiky. Několik jsem jich použil při stavbě 3D tiskáren. Bohužel čínský výrobce nezvolil správně odporový dělič k LED diodě, a díky tomu vznikala spousta náhodných situací, nad kterými bylo nutno strávit velké množství času. Rozhodně jsem neočekával, že takto jednoduchá součástka může představovat tolik problémů. Řešením bylo přerušení vodivé cesty k tomuto odporovému děliči.

Osa motoru je spojená s ventilátorem a ze spodní strany je magnet který patří k zapalovací cívce. Pozici toho samého magnetu snímá halová sonda. Zde, tím že nebylo poznamenáno, kde přesně původní cívka byla, tak první pokusy nebyly úspěšné. Nakonec nezbyvalo nic jiného než sundat vrchní kryt válce a poznačit, kde se nachází vrchní poloha válce. V odborné literatuře je to označováno jako "top dead centre (TDC)" a každý typ motoru má svoji optimální hodnotu o kolik dříve se daná směs paliva zapaluje, neboli "Before top dead center" (BTDC). Ve velkých motorech, které jsou řízeny elektronicky, je časovací mapa, protože samotné časování



Obr. 20: Vytištěný úchyt vstřikování

je závislé na otáčkách. Vzhledem k tomu, že účelem tohoto motoru je dosáhnout určité přesné hladiny otáček. V této fázi tedy není zapotřebí řešit variabilní časování. Může nastat několik situací (Kakaee, Shojaeefard, and Zareei 2011) :

- V případě že směs zapálíme příliš pozdě, veliký podíl hoření probíhá, když už se píst pohybuje dolů a tím klesá tepelná efektivita motoru
- V opačném případě pokud směs zapálíme příliš brzy, veliký podíl hoření probíhá ve fázi, kdy se píst pohybuje nahoru a efektivita spalování opět klesá.

Cílem snažení je tedy najít bod, ve kterém hoření začne před dosažením vrchního bodu, a největší část hoření probíhá ve vrchní pozici a tlačí píst dolů. Zde byla zvolena metoda pokus-omyl, kdy jsem okamžik zapalování posunul o 20 stupňů před TDC. Poté jsem motor prostě roztočil a pomalu posouval Hallouvu sondu na místo

kde jsou otáčky nejvyšší. Poté stačilo nakreslit a vytisknout uchyty halové sondy tak aby držely senzor ve správné poloze.

Nad samotným generátorem, v místě kde se původně nacházela nádrž, se z plexiskla vytvořila deska, sloužící jako pracovní testovací plocha pro elektroniku a napájecí zdroj. Ke všem prvkům/modulům, byly vymodelovány odpovídající držáky a opět vše bylo vytištěno na 3D tiskárně. Samotný kód aplikace není zajímavý. Celá logika řízení, je několik podmínek podle výše zmíněného diagramu. Jeden z problémů které jsem řešil, byl spojen s dobou otvírání vstřikovače, kde jsem si neuvědomil, že otevírací impuls se nerovná době otevření vstřikovače, takže začínat při nastavování logiky na nule nemá smysl. Jednou z výhod používání těchto známých modulů je to, že veškeré potřebné knihovny jsou volně dostupné. Milým překvapením bylo, že jsem nenarazil na žádný problém s elektromagnetickým rušením. Původně jsem očekával, že pod elektronikou bude muset být nějaké odstínění. V budoucnu ale bude nutno počítat s tím, že všechny moduly bude nutno posouvat blíže k motoru, a s tím bude stoupat i rušení.

9 Validace návrhu experimentem

První testy byly prováděny v manuálním chodu, kdy jsem vše reguloval manuálně, pomocí displaye a rotačního enkodéru. Startování bylo pokaždé prováděno akumulátorovou vrtačkou. Manuální chod je v podstatě bezchybný, poté co byly odstraněny výše zmíněné závady. Display zobrazuje aktuální otáčky a díky tomu se dá (v případě že máme stabilní zátěž) pěkně doladit výška otáček. Umím si představit, že by takto, pomocí jednoduchého algoritmu a variabilní PWM zátěže, by bylo možné vyplnit nějakou jednodušší palivovou mapu.

V praxi jsem si ověřil, že elektronické řízení lze na rozdíl od mechanického, mnohem lépe vyladit a tím i zvýšit výkon generátoru. Můj pokusný generátor má po přestavbě mnohem vyšší výkon. Už nyní (zatím pouze v manuálním chodu), je schopen utáhnout například varnou konvici anebo vysavač co před přestavbou nebylo možné (obr. 21).



Obr. 21: Naměřený výkon po přestavě

Zkoušky mého generátoru při automatickém chodu však zatím nejsou bezchybné. Vše funguje absolutně správně při malých zátěžích anebo při připojení spotřebičů, které nemají velký nárazový proud. V případě, že se ale při automatickém chodu zapojí například varná konvice s příkonem 1,5 kW, tak to generátor okamžitě zastaví. Pokud ale tu samou varnou konvici zapojím ke generátoru pomocí PWM modulace a zvedám zátěž v rozmezí 2-3 vteřin, tak k tomuto problému nedochází. Při manuálním chodu, tím, že tuto zátěž očekáváme, můžeme centrálu roztočit na více otáček a tento skok kompenzovat. Jinými slovy, navržené řízení reaguje správně na pomalé změny, ale ne na změny rychlé.

Navržená fuzzy logika reaguje přímo podle hodnot `intMin` a `intMax`. Postupně bylo vyzkoušeno několik variací, ale nepovedlo se mi najít dokonalé nastavení. V případě, že tyto hodnoty nechám na nízké úrovni (například 0,4 ms), tak samotné rozhodování reaguje pomalu a přesně. Zvednutím těchto hodnot se zvedá doba kterou přičítáme nebo odečítáme v každém cyklu k otevírací době vstřikovače v případě že je změna nutná. Naopak pokud tyto hodnoty jsou v řádek jednotek milisekund celý systém reaguje na změny rychle ale má problém se ustálit na dané hodnotě otáček přesně a otáčky oscilují.

9.1 Testování příměsi vody

Jednou ze zajímavých teorií kterou jsem chtěl potvrdit nebo vyvrátit je vliv vody na spalovací proces. Několik jednotlivců tvrdí, že malé množství vody (v rámci několika málo procent oproti palivu) přidané do spalovací směsi, může mít velice pozitivní vliv na spalovací proces. Někteří dokonce tvrdí, že pomocí malé příměsi vody, lze motor vyčistit. Dokonce i několik důvěryhodných zdrojů publikovaly podobné informace (Lee 2003) (Dryer 1977) (Bari and Esmaeil 2010), z čeho jde vyvodit závěr že tato teorie nemusí být úplně mylná. Z teoretického hlediska umí voda absorbovat velké množství energie, díky čemuž by taková příměs mohla změnit tepelnou efektivitu celku. Na druhou stranu tohle téma nemá v komerční sféře příliš veliký úspěch. Pro vnitřní spalovací motory jsem narazil na praktické využití u vznětových motorů, kde bylo provedeno pár úspěšných testů (Bari and Esmaeil 2010). U zážehových motorů je problém s hořlavostí, kdy příměs vody v benzínu snižuje vznětlivost. Bohužel, nenašel jsem ani jednu studii popisující efekt příměsi vody na plynná paliva.

Právě k testování teorií jako je například tato, se toto navržené řešení v této práci výborně hodí. Provedl jsem jednoduchý test, kdy do sání bylo přivedeno malé množství vodní mlhy. Sání k motoru bylo propojeno k nádobce s ultrazvukovým transducerem a vodou, kde ultrazvukové vibrace vytváří mlhu. Tím pádem, změnou vstupního proudu do našeho transduceru můžeme přímo ovlivnit míru vlhkosti nasávaného vzduchu.

Provedl jsem dva 5ti minutové testy, jeden normální bez příměsi vody a jeden se s příměsí vody ve vstřikování. Pro test byla samozřejmě použita destilovaná a demineralizovaná voda, aby se na stěnách válce netvořily nánosy nečistot. Bylo upozorováno že studený motor ani nenastartuje v případě že nasává takto zvlhčený

vzduch. Tím pádem je nejdříve nutné motor nastartovat až teprve cokoliv přimíchávat. Další poznatek z testování je, že moment vzněcování je potřeba posunout o pár stupňů dopředu co dává smysl díky tomu že směs hoří pomaleji. Co se týče výkonu při stejné době otevření vstřikovače v obou testech byly otáčky podobné. Test s příměsí dosahl o 115 otáček více (zvednutí o 3,8 procent) ale to může být způsobeno nějakou nepřesností v systému. Co se změnilo rapidně je teplota motoru po testu. Před každým testem motor začínal na pokojové teplotě (23 stupňů celsia) a bez příměsí se za daných 5 minut motor dostal na 78 stupňů. S silně zvlhčeným vzduchem teplota motoru dosáhla 62 stupňů za daných 5 minut. Vzhledem k tomu že výkon se rapidně nezměnil lze očekávat změnu v tepelné efektivitě nebo alespoň ve teplotě spalování. Bohužel bez analýzy výfukových plynů nejde vyvodit z tohoto měření jednoznačný závěr zdali problémy s implementací vstřikování příměsí vody stojí za naměřený výsledek nebo ne.

10 Vize využití práce do budoucna

10.1 Minimalizace návrhu pro zajištění cenové efektivity

V předchozích kapitolách je zmíněno několik druhů měření a různých modulu pro měření elektrických a neelektrických veličin. Docela dost modulu které jsem byl schopen vyzkoušet neposkytly informace které by změnily chování motoru. Samozřejmě pro testování čím více informací, tím lépe pro nás ale pro praktické použití nepotřebujeme až tak moc informací pro vytvoření funkčního systému. Například v případě, že chceme vytvořit ekonomicky zajímavý produkt, potřebujeme zjistit co je minimální funkční konfigurace při které náš systém funguje dobře v určených mezích.

Jsou věci na kterých rozhodně nešetříme, pro nějaké porovnání budeme předpokládat že chceme převést 5 kW elektrocentrálu z mechanického řízení na elektronické vstřikování plynu, podobně jako v této práci. Vstřikovač je u elektronického řízení nutnost, ale tím že se jedná pořád o malý motor v porovnání s automobilem, můžeme zvolit nejlevnější řešení. Veškeré plynové příslušenství nejde redukovat, a jeho kvalita přímo ovlivňuje naši bezpečnost, takže nedoporučuji na něm šetřit. Jediný požadavek, je aby tlak výstupu z reduktoru odpovídal pracovnímu tlaku vstřikovače. V tomto projektu používám regulovatelný reduktor s manometrem, co pro normálního uživatele je zbytečné, neregulovatelné modely jsou o polovinu levnější. Z pohledu elektroniky, použita vývojová deska je jedna z nejlevnějších a nenarazil jsem zatím na žádný důvod proč ji měnit, za cokoliv jiného. Je levná, stabilní, spolehlivá a programovací prostředí je více než dostačující. V případě že chceme prostorově menší řešení, jde na našem trhu koupit řešení jako "LPC1769 LPCXpresso Board" ale jeho cena je vyšší, a nemyslím si že úspora místa nestojí za příplatek, u projektu jako je tento. Jako poslední absolutně nutné moduly považuji stabilizátor napájecího napětí a modul Hallové sondy.

Naopak jsem zjistil, že dost věcí které byly původně plánovány a implementovány nejsou až tak důležité jako jsem si myslel. Například měření teploty motoru je není nutné, motory komerčně prodávané se nemůžou přehřát ani na benzín a změnou paliva na plyn naopak pracovní teplota klesá. V případě že se motor přehřeje tak se s největší pravděpodobností poškodí pístní kroužek a motor se zasekne. Přímé měření teploty motoru termočlánkem není podstatné, ale vzhledem zanedbatelné ceně termistorů bych doporučil alespoň měřit teplotu okolní z hlediska bezpečnosti. V případě že teplota okolí překročí požadovanou mez, například požár, motor by se má zastavit. Veliké elektrocentrály obsahují vestavěný startér s baterií a tím nemusíme řešit zdroj napájení. Lambda sonda není u malých motorů důležitá, její přínos je spíš ekologický než ekonomický. Programaticky jdou nastavit meze, podle objemu válce, ať motor není přepřehříván a tím dosáhnout lepších ekologických parametrů než u mechanického řízení. Vibrační a zvukové senzory jsem nevyužil ani pro moji testovací implementaci. Co se týče vzněcování, elektronicky ovládané vzněcování je výborná věc pro mé testy, protože můžu ovládat přesně kdy se směs

Tab. 3: Náčrt cenové náročnosti minimálního a optimálního řešení

Varianta :	Minimální	Optimální
Termistor (50 Kč)	x	x
Termčlánek + deska (200 Kč)		x
Display (350 Kč)		x
Rotační Enkoder (100 Kč)		x
Vstřikovač (500 Kč)	x	x
Hall sensor(100 Kč)	x	x
Vznecovací modul CDI DC (400 Kč)		x
Stabilizační okruh (50 Kč)	x	x
Reduktor (400 Kč)	x	x
Ventyl + redukce (350 Kč)	x	x
Spojovací material (300 Kč)	x	x
Lambda Senzor (450 Kč)		x
Spínací modul (50 Kč)	x	x
Vývojová deska (400 Kč)	x	x
Modul na měření AC prudu(150 Kč)		x
Cena v Kč	2200	3850

vznítí a posouvat tento děj v čase, ale pro normální obyčejné uživatele je to absolutně zbytečná věc. Dovolím si tvrdit že do výkonu 10 kW si průměrný uživatel vystačí s již vestavěným systémem vzněcování. Zároveň tím rapidně snížíme komplexnost implementace. Vizualně tohle jde vidět v tabulce (tab. 3)

Samozřejmě nabízet jakýkoliv produkt za nákupní cenu jednotlivých dílů by neprodukovalo žádný profit. Musíme počítat že veškeré plastové díly musíme být nahradit odlitky, kde cena bude záviset na objednaném množství těchto odlitků. V případě že nákupní cena dílu je kolem 2200 Kč teoreticky cena celkového kitu by mohla být kolem 5000 Kč i s naším ziskem, a to odpovídá ceně kitu mechanického. Dovolím si tvrdit, že za stejné peníze jsme schopni nabídnout komunitě chytřejší, bezpečnější a výkonnější produkt. Otázkou ale je poptávka po těchto řešení, v budoucnu je potřeba provést průzkum trhu, a zjistit zdali je o tohle komerční zájem.

10.2 Možné rozšíření do budoucna a další proveditelné testy

Jedná z věcí co bych chtěl v následujících měsících bych chtěl rozšířit logiku rozhodování o měření proudu tekoucím generátorem. V současném stavu i přesto, že máme více úrovní fuzzy logiku pořád generátor nereaguje dokonale na nárazy proudu. Nemyslím si, že ještě víc úrovní v logice by tento problém vyřešilo ale v případě že tuto situaci jsme schopni dostatečně rychle rozpoznat(právě pro to měření proudu generátorem) tak můžeme generátor přepnout do modu maximálního výkonu na pár vteřin a tím vnitřní logice pomoci. Další rozšíření které chci provést co nejdříve je automatizovaná regulace ultrazvukového transduceru, čím bych mohl do

současného plynového systému přidávat jakékoliv kapalné palivo. Rozptýlena studená mlha pak jde velice lehce nasávat se vzduchem a zároveň již nemusíme řešit míchání kapalného paliva se vzduchem. Dokonalé promíchaní paliva se vzduchem je jedna z podmínek efektivního spalování a pro to je tohle již probádaná oblast, původní patent lze najít z roku 1987 (Koike, Katada, and Yoneda 1987) a podle této práce (Jónsson et al. 2015) z roku 2015 plánuji rozšířit svůj projekt. Díky tomu bych mohl otestovat různé plynné a kapalné paliva a přímo jich navzájem porovnat. Například bylo by zajímavé porovnat různé benzíny a jejich hořlavost vůči jejich ceně a stejně tak vzít paliva plynné a porovnat jejich parametry vůči jejich kapalným protějškům. Jeden z dalších zajímavým rozšíření, na které jsem v průběhu studia problematiky spalovacích motorů narazil, je rekombinace uhlíkových-vodíkových paliv na téměř čistě vodíkové paliva. Tím se teoreticky má zvednout efektivita a snížit emise. Bohužel tohle je možné pouze v extrémních podmínkách za pomoci plazmového okruhu a proto se těmto aparátům říká plasmatron. Jedná se opět o starší technologii kterou v posledních letech zdokonalujeme pro praktické použití. První zmínky jsem našel z roku 1995 (Rabinovich, Cohn, and Bromberg 1995) a našel jsem i velké množství aktuálních výzkumů jako například tyto (Saidur et al. 2012) (Fuen et al. 2016) (“Syngas Production from Propane-Butane Mixtures using a High-Voltage Atmospheric Pressure Discharge Plasma”) (Pyun et al. 2016). I přesto že tato technologie může znít komplexně, postavit samotný plasmatron není těžké, náročná je optimalizace efektivitu celkového systému. Samotný plasmatron vyžaduje výkoný zdroj a z principu se jedná o poruchové zařízení, protože spoléhá na materiál elektrod že vydrží plazmový okruh. I tak si ale myslím že se jedná o nápad který stojí za vyzkoušení.

10.2.1 Využití v jiných systémech

Popisované řešení bylo v této práci prakticky implementováno na vnitřní zážehový motor. Stejná platforma jde s malou úpravou implementovat na motory vznětové, protože princip míchání správného poměru paliva se vzduchem je velice podobný. Vnitřní spalovací motory jsou ideální pro stacionární systémy jako záložní zdroje. V případě, že potřebujeme zdroj energie mobilní, musíme brát v potaz váhu celkového systému. Jeden z dalších projektů naplánovaných na rok 2017 je přestavba komerčně prodáváného automobilu na hybridní elektromobil. Dojezd na baterie jde reálně vyřešit se současnou technologií baterii ekonomicky do 100 km. Pro cokoliv nad tuhle hranici potřebujeme extrémně drahé baterie nebo přídavný spalovací motor. Tento spalovací motor musí být co nejlehčí, protože zvýšením váhy snižujeme automaticky dojezd na baterie, ale přesto vyžadujeme at výkon spalovacího motoru je co nejvyšší. Tento problém je téměř nemožné vyřešit pomocí technologie vnitřních spalovacích motorů. Alternativní řešení se nabízí pomocí spalovacích motorů vnějších. Díky pokroku v oblasti miniaturizace turbin a ložisek jsme již schopní postavit efektivní malý vnější spalovací motor. První studie zabíhající se tímto tématem lze najít již z roku 2002 (Pilavachi 2002) a 2003 (Peirs, Reynaerts, and Verplaetsen 2003). Tyto

vysoko-otáčkové spalovací systémy předtím vyžadovaly vysokotlakové mazání, a tím nešlo minimalizovat jejich velikost a cenu. Tato technologie začala být zajímavá díky zlevňování vzducho-foliových ložisek, více o této technologii zde (DellaCorte et al. 2000). Dnes díky tomu již umíme postavit systém vnějšího spalování na těchto technologiích, který obsahuje minimum pohyblivých částí a je spolehlivější, lehčí a výkonnější než jakýkoliv vnitřní spalovací motor. I z pohledů emise si tyto turbínové motory vedou mnohem lépe, a jsou palivově univerzální. V současné době považuji tuto technologii jako budoucnost hybridních elektromobilů a proto bych se chtěl zabývat její automatizací v příštích projektech. V případě že čtenáři tato technologie přijde zajímavá taky doporučuji projít tyto práce z roku 2016 které obsahují aktuální informace (Gautam 2016) (Fikri, Ridzuan, and Salleh 2016) .

11 Zhodnocení práce, publikace výsledků a zveřejnění návrhu

V této mé práci se mi podařilo předvést v praxi, že malé spalovací motory je možno řídit i jednoduchou levnou elektronikou. V porovnání s mechanickým řízením dosahuje moje zkušební elektrocentrála vyššího výkonu a lepších parametrů, než před přestavbou. Při tom se navíc podařilo v praxi předvést jaké výzvy i úskalí představuje řízení fuzzy logikou v praxi. Řízení fuzzy logikou je použitelné, ale zvolená implementace nedosáhla spolehlivosti vyžadované pro toto specifické použití. Právě u záložních zdrojů je nutné ať řízení reaguje bezchybně na nárazy proudu, a to bohužel implementovaná logika v současném stavu není bezchybná. Výhodou zde navrhovaného řešení je jeho otevřenost. I přesto, že zvolený algoritmicke přístup nesplnil všechna očekávání, nám nic nebrání, aplikovat jiné učící algoritmy nebo prostě centrálu řídit pomocí osvědčených palivových map. V teoretické části je zmíněno několik algoritmů, které by bylo možné v budoucnu v případě zájmu aplikovat. Navržené řešení v současném stavu bude sloužit k testování různých paliv. Na internetu lze nalézt různé množství pseudo-vědeckých výroků o tom, co lze do spalovacího procesu přidat, jako například sloučeniny vody, vodíků nebo alkohol. Podle těchto tvrzení nám to má zvednout výkon systému anebo ušetřit palivo (hlavně při zaměření na velké automobily). Tato zkušební platforma nám nabízí možnost tyto výroky otestovat v praxi v malém měřítku, a tyto teorie vyvrátit anebo potvrdit. Pomocí této platformy můžeme přesně měřit, zdali jakékoli aditivum má pozitivní anebo negativní vliv na spalovací motor. Co se týče spotřeby paliva, je možné přesně měřit dobu otevření vstřikovače, aktuální otáčky, nebo upravovat čas vznícení a tím porovnat zdali použité aditivum je prospěšné anebo ne. Při mém zkušebním provozu byly odhaleny i slabá místa. Například použití nízkorozpočtových modulů zní velice lákavě, ale skrývá značné množství potencionálních problémů, které se v podmínkách amatérského dílenského prostředí, jen velice těžko řeší a celkové úsilí nutné k zprovoznění tohoto systému, pak nemusí stát za ušetřené peníze. Specificky spínací moduly a snímače polohy doporučuji navrhnout podle použité vývojové desky, jinak hrozí spousta náhodných situací, které je obtížné předvídat. V případě, že k tomu nejsou nadstandardní finanční prostředky, doporučuji zvolit moduly určené pro malé CNC stroje. Paradoxně drtivá většina problémů, které jsem v tomto projektu řešil, jsou mechanického nebo elektronického rázu. Samotné moduly nejsou špatně navrženy. Problém byl u výrobce z Číny, který nedbal na specifikace jednotlivých součástek. Pravděpodobně zvolil nejlevnější řešení na svém trhu bez ohledu na jeho konečný efekt. V mé práci jsou proto popsány i tyto nástrahy. Celá má diplomová práce včetně praktických zkoušek ukázala, že mechanický princip řízení spalovacích motorů, lze úspěšně nahradit ekonomičtějším elektronickým řízením. Stinnou stránkou je ale čas nutný k implementaci takového řešení a nechávám na úsudku čtenáře, zdali právě toto je cesta, která je pro něj zajímavá nebo ne, pro jeho praktické použití. Po několika diskuzích na internetových fórech jsem si

uvědomil, že mnou navržená platforma není pro širokou veřejnost zajímavá. Současnou komunitu naopak zajímají samotné testy a jejich výsledky ve formě videii, než praktický návod jak se těmto výsledkům dostat. Pro to mám v plánu provést výše zmíněné testy a vytvořit sérii youtube videií. Existuje několik směrů kam se tento projekt může vyvíjet. V ideálním případě bych rád vnitřní spalovací motory opustil a přešel na spalovací motory vnější, které dosahují lepších parametru. V případě, že by se povedlo založit malé skupinové financování, rad bych zkusil postavit generátor na bázi mikro-turbin podobně jako například nabízí firma Blandon Jet nebo Capstone .

12 Literatura

Literatura

- Alenazey, Feraih et al. “Syngas Production from Propane-Butane Mixtures using a High-Voltage Atmospheric Pressure Discharge Plasma”. In: *Heat Transfer Research*.
- Bailey, K.S. and G. Bethurem (2010). *Dual ECU for aftermarket conversions of vehicles and boats to oxy-hydrogen or hybrid fuels*. US Patent App. 12/583,181. URL: <https://www.google.com/patents/US20100049417>.
- Bari, Saiful and M Mohammad Esmaeil (2010). “Effect of H₂/O₂ addition in increasing the thermal efficiency of a diesel engine”. In: *Fuel* 89.2, pp. 378–383.
- BECKY BEETZ (2015). “Li-ion battery costs to fall 50% in next 5 years, driven by renewables”. In: URL: http://www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/li-ion-battery-costs-to-fall-50-in-next-5-years--driven-by-renewables_100022051#axzz4R8ENk059.
- Beltrami, C et al. (2003). “AFR control in SI engine with neural prediction of cylinder air mass”. In: *American Control Conference, 2003. Proceedings of the 2003*. Vol. 2. IEEE, pp. 1404–1409.
- Branko, R. (2012). *Automobil a spalovací motor: Historický vývoj*. ISBN: 9788024776941. URL: <https://books.google.cz/books?id=iiBgAgAAQBAJ>.
- Cengel (2014). *Thermodynamics: An Engineering Approach*. SEM. URL: <https://www.amazon.com/Thermodynamics-Engineering-Approach-Cengel-ebook/dp/B00HZ3B9A0%3FSubscriptionId%3D0JYN1NVW651KCA56C102%26tag%3Dtechkie-20%26linkCode%3Dxm2%26camp%3D2025%26creative%3D165953%26creativeASIN%3DB00HZ3B9A0>.
- DellaCorte, Christopher et al. (2000). “Performance and durability of high temperature foil air bearings for oil-free turbomachinery”. In: *Tribology transactions* 43.4, pp. 774–780.
- Dillon, Colleen et al. (1994). “The ecological impact of batteries”. In:
- Dryer, FL (1977). “Water addition to practical combustion systems—concepts and applications”. In: *Symposium (international) on combustion*. Vol. 16. 1. Elsevier, pp. 279–295.
- Ellims, Michael, Stephen Parker, and James Zurlo (2002). “Design and analysis of a robust real-time engine control network”. In: *IEEE Micro* 22.4, pp. 20–27.
- Fikri, M, M Ridzuan, and Hamidon Salleh (2016). “Preliminary study of Low-Cost Micro Gas Turbine”. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 160. 1. IOP Publishing, p. 012036.

- Fuen, Chen et al. (2016). "Test bed for farm vehicle onboard hydrogen production system with microwave plasma." In: *International Journal of Agricultural & Biological Engineering* 9.6.
- Gani, Elton and Chris Manzie (2004). "Intelligent computing methods for indicated torque reconstruction". In: *Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing Conference, 2004. Proceedings of the 2004*. IEEE, pp. 259–264.
- Gautam, Raju (2016). "Micro co-generation of heat and power hybrid with renewables: State of the art". In:
- Ghaffari, Ali et al. (2008). "Adaptive fuzzy control for air-fuel ratio of automobile spark ignition engine". In: *World Academy of Science, Engineering and Technology* 48, pp. 284–292.
- Gnanam, Gnanaprakash et al. (2006). "Neural network control of air-to-fuel ratio in a bi-fuel engine". In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)* 36.5, pp. 656–667.
- Harold, G., M. Norman, and D.M. Straight (1952). *Speed-density type of fuel-metering control*. US Patent 2,623,509. URL: <https://www.google.com/patents/US2623509>.
- Jónsson, Bergþór Lár et al. (2015). "Ultrasonic Gasoline Evaporation Transducer-Reduction of Internal Combustion Engine Fuel Consumption using Axiomatic Design". In: *Procedia CIRP* 34, pp. 168–173.
- Kakaee, AH, MH Shojaeefard, and J Zareei (2011). "Sensitivity and effect of ignition timing on the performance of a spark ignition engine: an experimental and modeling study". In: *Journal of Combustion* 2011.
- Kardous, Chucri A, Peter B Shaw, and William J Murphy (2016). "Evaluation of smartphone sound measurement applications using external microphones—A follow-up study". In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 139.4, pp. 2036–2036.
- Koike, H., H. Katada, and H. Yoneda (1987). *Ultrasonic wave type fuel atomizing apparatus for internal combustion engine*. US Patent 4,715,353. URL: <https://www.google.com/patents/US4715353>.
- Kong, Hakchul H, Kong administratrix Miyeon, et al. (1996). *Fuzzy logic air/fuel controller*. US Patent 5,524,599.
- Kumar, Pravin and A Rehman (2016). "Bio-diesel in homogeneous charge compression ignition (HCCI) combustion". In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 56, pp. 536–550.
- Lee, Chuen-Chien (1990). "Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller. II". In: *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics* 20.2, pp. 419–435.
- Lee, T.F. (2003). *System and process for water injection control of internal combustion engine*. US Patent 6,505,579. URL: <https://www.google.com/patents/US6505579>.

- Leonhardt, S, C Ludwig, and R Schwarz (1995). “Real-time supervision for diesel engine injection”. In: *Control Engineering Practice* 3.7, pp. 1003–1010.
- Li, Tie, Bin Wang, and Bin Zheng (2016). “A comparison between Miller and five-stroke cycles for enabling deeply downsized, highly boosted, spark-ignition engines with ultra expansion”. In: *Energy Conversion and Management* 123, pp. 140–152.
- Liu, Zhi-qiang and Yu-cai Zhou (2010). “A fuzzy neural network and application to air-fuel ratio control under Gasoline Engine Transient Condition”. In: *Intelligent System Design and Engineering Application (ISDEA), 2010 International Conference on*. Vol. 1. IEEE, pp. 24–26.
- Majors, Michael, James Stori, and Dong-il Cho (1994). “Neural network control of automotive fuel-injection systems”. In: *IEEE Control Systems* 14.3, pp. 31–36.
- Morelos, Miguel Angel Mancilla and Juan Anzures Marín (2012). “Fuzzy control strategy for stoichiometric air-fuel mixture in automotive systems.” In: *World Automation Congress (WAC), 2012*. IEEE, pp. 1–6.
- Morén, M. (2008). *An internal combustion engine system, and a method in such an engine system*. EP Patent App. EP20,070,111,267. URL: <https://www.google.com/patents/EP2009277A1?cl=en>.
- Murata, S. and M. Ikeuchi (1993). *Ion current sensing device for an internal combustion engine with spurious voltage preventing filter*. US Patent 5,180,984. URL: <https://www.google.com/patents/US5180984>.
- Palanivendhan¹, M, Hitesh Modi, and Garvit Bansal. “Five Stroke Internal Combustion Engine”. In:
- Peirs, Jan, Dominiek Reynaerts, and Filip Verplaetsen (2003). “Development of an axial microturbine for a portable gas turbine generator”. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 13.4, S190.
- Pilavachi, PA (2002). “Mini-and micro-gas turbines for combined heat and power”. In: *Applied Thermal Engineering* 22.18, pp. 2003–2014.
- Piltan, Farzin et al. (2011). “Design model free fuzzy sliding mode control: Applied to internal combustion engine”. In: *International Journal of Engineering* 5.4, pp. 302–312.
- Platform, European Biofuel Technology (2013). “Starch crops for production of biofuels”. In: URL: [\url{http://biofuelstp.eu/starch_crops.html}](http://biofuelstp.eu/starch_crops.html).
- Pyun, Sung Hyun et al. (2016). “Application of Plasma Fuel Reformer to an On-Board Diesel Burner”. In: *Plasma Chemistry and Plasma Processing* 36.1, pp. 329–340.
- Rabinovich, A., D.R. Cohn, and L. Bromberg (1995). *Plasmatron-internal combustion engine system*. US Patent 5,425,332. URL: <https://www.google.com/patents/US5425332>.

- Saidur, R et al. (2012). "Technologies to recover exhaust heat from internal combustion engines". In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16.8, pp. 5649–5659.
- Schmitz, G. (2003). *Five-stroke internal combustion engine*. US Patent 6,553,977. URL: <https://www.google.com/patents/US6553977>.
- Shakhashiri, Prof. Bassam Z. (2012). "ETHANOL, General Chemistry". In: URL: [\url{http://scifun.chem.wisc.edu/chemweek/pdf/ethanol.pdf}](http://scifun.chem.wisc.edu/chemweek/pdf/ethanol.pdf).
- Stevens, D. (2013). *Engine control unit using speed density conversion*. US Patent App. 13/489,134. URL: <https://www.google.com/patents/US20130319377>.
- Strandh, Sigvard (1981). *A History of the Machine*. Book Sales. ISBN: 0894790250. URL: [https://www.amazon.com/History - Machine - Sigvard - Strandh / dp / 0894790250 % 3FSubscriptionId % 3D0JYN1NVW651KCA56C102 % 26tag % 3Dtechie - 20 % 26linkCode % 3Dxm2 % 26camp % 3D2025 % 26creative % 3D165953 % 26creativeASIN % 3D0894790250](https://www.amazon.com/History-Machine-Sigvard-Strandh/dp/0894790250%3FSubscriptionId%3D0JYN1NVW651KCA56C102%26tag%3Dtechie-20%26linkCode%3Dxm2%26camp%3D2025%26creative%3D165953%26creativeASIN%3D0894790250).
- Sulatsky, M. and S. Hill (2002). "The application of neural control systems to natural gas vehicles". In: *Technical Report SRC Pub No 11120-1E02*.
- Sulatsky, Michael Theodore et al. (2004). *Neural control system and method for alternatively fueled engines*. US Patent 6,687,597.
- Thrift, Philip R (1991). "Fuzzy Logic Synthesis with Genetic Algorithms." In: *ICGA*, pp. 509–513.
- Thring, Robert H (1989). *Homogeneous-charge compression-ignition (HCCI) engines*. Tech. rep. SAE Technical paper.
- Vrubel, V. and D. Vrubel (1995). *Petrol to gas engine conversion*. WO Patent App. PCT/AU1994/000,451. URL: <https://www.google.com/patents/WO1995004876A1?cl=en>.
- Wang, Huanlei et al. (2013). "Interconnected carbon nanosheets derived from hemp for ultrafast supercapacitors with high energy". In: *ACS nano* 7.6, pp. 5131–5141.
- Weige, Zhang et al. (2002). "CNG engine air-fuel ratio control using fuzzy neural networks". In: *Autonomous Decentralized System, 2002. The 2nd International Workshop on*. IEEE, pp. 156–161.
- Weiss, H. and R.F. Burk (2001). *Control system for internal combustion engines*. US Patent 6,199,006. URL: <https://www.google.com/patents/US6199006>.
- Wiens, Travis Kent (2008). *Online learning of a neural fuel control system for gaseous fueled si engines*. University of Saskatchewan.
- Wong, Ka In et al. (2015). "Sparse Bayesian extreme learning machine and its application to biofuel engine performance prediction". In: *Neurocomputing* 149, pp. 397–404.

- Wong, PK et al. "Automotive engine idle speed control optimization using least squares support vector machine and genetic algorithm". In:
Zhenzhong, Yang et al. (2002). "An investigation of optimum control of ignition timing and injection system in an in-cylinder injection type hydrogen fueled engine". In: *International journal of hydrogen energy* 27.2, pp. 213–217.