

**Univerzita Pardubice  
Dopravní fakulta Jana Pernera**

**Ovládání přívěry výfuku pro optimální řízení spalovacího dvoudobého motoru**

**Jiří Marek**

**Bakalářská práce  
2010**

Univerzita Pardubice  
Dopravní fakulta Jana Pernera  
Akademický rok: 2009/2010

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jiří MAREK**  
Osobní číslo: **D06054**  
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**  
Studijní obor: **Dopravní infrastruktura-Elektrotechnická zařízení v dopravě**  
Název tématu: **Ovládání přívěry výfuku pro optimální řízení spalovacího dvoudobého motoru.**  
Zadávatel katedra: **Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

- 1) Rozbor spalovacího procesu dvoudobého motoru a analýza funkce variabilního řízení výfukového kanálu.
- 2) Návrh variant mechanického řízení vlastní přívěry.
- 3) Návrh softwaru variabilního řízení  $v=f(n)$ .
- 4) Technické řešení - odzkoušení motoru na dynamometru - vytvoření mapy.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

**Gregora, S., Mašek, Z.: Elektronické a mechatronické systémy v konstrukci silničních vozidel, Univerzita Pardubice, Pardubice 2008**

**Kožoušek, J.: Výpočet a konstrukce spalovacích motorů II, SNTL, Praha 1983**

**Skalický, P.: Mikroprocesory řady 8051, BEN, Praha 2005**

Vedoucí bakalářské práce:

**doc. Ing. Stanislav Gregora, Ph.D.**

Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě

Datum zadání bakalářské práce: **9. prosince 2009**

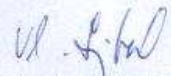
Termín odevzdání bakalářské práce: **31. května 2010**



prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.

děkan

L.S.



prof. Ing. Vladimír Schejbal, CSc.

vedoucí katedry

V Pardubicích dne 8. března 2010

## Čestné prohlášení

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury. Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 24. 5. 2010

Jiří Marek

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu práce panu doc. Ing. Stanislavu Gregorovi, Ph.D. za jeho odborné vedení a cenné rady. Zároveň děkuji také panu Ing. Zdeňku Maškovi za jeho ochotu a poskytnutí potřebných komponent pro vypracování práce. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat i své rodině a přátelům za jejich podporu.

## **Anotace**

Cílem této práce je navrhnout a prakticky zrealizovat programově řízené ovládání výfukové přívěry dvoudobého motoru pro zlepšení momentové charakteristiky a účinnosti motoru.

Práce se nejprve zabývá teoretickým rozбором spalovacího procesu dvoudobého motoru a analýzou funkce variabilního řízení výfukové přívěry. Následně jsou rozebrány možné varianty pohonu na ovládání přívěry a jejich vhodnost pro konkrétní aplikaci. Druhá část práce se zabývá praktickým zapojením obvodu pro ovládání přívěry a následně je uveden návrh software pro mikroprocesor vyhodnocující správné nastavení polohy výfukové přívěry v závislosti na aktuálních otáčkách motoru.

## **Klíčová slova**

Dvoudobý motor, spalovací proces, výfukový kanál, výfuková přívěra, kroutící moment, krokový motor.

## **Annotation**

The goal of the thesis is to design and implement two-stroke engine exhaust throttle programme to improve torque engine characterization and efficiency.

At first the work deals with theoretical analysis of two-stroke engine combustion process and analyses variable timing function of exhaust throttle. Then the possible variants for throttle control and their suitability for specific application are analysed. The practical part of the work deals with printed design of throttle control circuit board and necessary software for microprocessor which controls correct throttle set position depending on relevant engine speed.

## **Keywords**

Two-stroke engine, combustion process, exhaust duct, moment of torsion exhaust throttle, stepper motor.

## Obsah

Úvod.....	10
1. Obecný rozbor spalovacího dvoudobého motoru.....	12
1.1. Obecný popis .....	12
1.2. Princip funkce .....	12
1.3. Konkrétní aplikace .....	13
2. Rozbor výplachu a výfukového systému dvoudobého motoru .....	15
2.1. Výplach .....	15
2.2. Analýza funkce variabilního řízení výfukového kanálu.....	17
2.2.1. Obecný popis výfukového systému .....	17
2.2.2. Výpočet výfukového rezonátoru.....	19
2.2.3. Určení rezonanční délky výfukového potrubí .....	21
2.3. Regulační prvky.....	30
3. Varianty mechanického řízení přívěry.....	31
3.1. Pohon s elektromotorem.....	31
3.1.1. Stejnosměrný motorek.....	32
3.1.2. Krokový motorek.....	32
3.1.2.1. Princip funkce .....	32
3.1.2.2. Řízení s polovičním krokem .....	33
3.1.2.3. Řízení pomocí mikrokrokování .....	34
3.1.2.4. Momentová charakteristika.....	34
3.2. Lineární elektromagnet.....	36
3.2.1. Princip funkce.....	36
3.2.2. Výpočet rozměrů stejnosměrného elektromagnetu .....	37
4. Řešení mechanického ovládání výfukové přívěry pro danou aplikaci.....	40
4.1. Zvolení převodu .....	40
4.2. Konstrukční řešení.....	41
5. Ovládání krokového motorku a návrh softwaru .....	42
5.1. Ovládací panel.....	42
5.1.1. Použité integrované obvody .....	42
5.1.1.1. Dvojitý H-můstek L298 .....	42
5.1.1.2. Obvod pro řízení krokového motorku L297.....	43
5.2. Procesor .....	45
5.2.1. Software .....	46
5.2.1.1. Vyhodnocení otáček .....	46
Závěr .....	48
Seznam literatury .....	49

<b>Seznam tabulek.....</b>	<b>50</b>
<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>51</b>
<b>Seznam příloh .....</b>	<b>52</b>

## Úvod

Pístový spalovací motor prošel prakticky stoletým vývojem a za tuto doby byl konstrukčně dopracován k vysoké dokonalosti, jak z hlediska výkonových parametrů, tak účinnosti a emisí. Zvláštní skupinu pak představují dvoudobé motory, které vynikají jednoduchostí, malými rozměry a nižší výrobní cenou a ve srovnání se čtyřdobým motorem teoreticky s dvojnásobným výkonem. Jejich negativní stránkou je méně dokonalý proces spalování, vyšší spotřeba a vyšší emise. Dvoudobé motory se vyznačují tím, že průběh momentu při větším otevření výfukového kanálu v oblasti nízkých otáček má nepříznivý průběh.

Z tohoto pohledu byla navržena řada úprav pro zlepšení momentové charakteristiky těchto motorů. Zejména sportovní a závodní motory, kde je požadován vysoký výkon, je nutné velké otevření výfukového kanálu, čímž se ovšem dostáváme do nežádoucího stavu průběhu momentu. Při ohlédnutí na počátky používání výfukové přívěry<sup>1</sup> se pak dostaneme do osmdesátých let, kde se zprvu vyvíjela a testovala na závodních motorech. Postupem času se však začala objevovat i na motocyklech vyráběných sériově (motory DKW). V současnosti se s ní můžeme setkat již prakticky na početné skupině vyráběných motocyklů s dvoudobým motorem. Danou problematikou se zabývá i tato práce, která je zaměřena na problematiku vlastního spalovacího procesu, kde chceme dosáhnout lepšího využití vyvíjeného tlaku a tím i zlepšení průběhu momentu motoru. Především nástup elektroniky nám dnes umožňuje v reálném čase vstupovat do těchto procesů a optimálně je řídit.

V případě řešeném zde, byla tato problematika v době, kdy nebyla k dispozici potřebná mikroelektronika, řešena pomocí pneumaticky ovládané přívěry, která pracovala na principu zvýšeného tlaku ve výfukovém potrubí. Průběh charakteristiky bylo možno měnit tvrdostí pružiny, což nebylo optimální. Úkolem bylo přepracovat toto pneumatické ovládání na programovatelně řízené ovládání, umožňující optimální nastavení průběhu momentu. Tento úkol je tedy prioritní. V práci je řešeno hardwarové i softwarové provedení daného problému - úhlu otevření výfukového kanálu pomocí elektronicky řízené přívěry výfuku.

---

<sup>1</sup> Dále v práci se vyskytuje pouze pojem přívěra, je tím myšlena výfuková přívěra.

Je zde provedena analýza alternativ řešení ovládní této přívěry. Byly navrženy tři alternativy řešení pohonu pro ovládní přívěry, kde byly analyzovány přednosti a nedostatky jednotlivých variant. Po výběru dané alternativy byl řešen konkrétní návrh vlastního řízení, což je hlavní úkol této práce.

## **1. Obecný rozbor spalovacího dvoudobého motoru**

### **1.1. Obecný popis**

Historický vývoj jednostopých vozidel je od počátku spojen s konstrukcí robustních čtyřdobých motorů. Jejich princip činnosti byl lépe pochopitelnější, než u motoru dvoudobého. Prvé konstrukce čtyřdobých motorů jsou spojovány s jedno či dvouválcovými motory robustních rozměrů, o zdvihových objemech mezi 350 až 1200 ccm. Až objev dvoudobého motoru znamenal průlom v konstrukci jednostopých vozidel. Dvoudobý motor oproti jeho předchůdci (čtyřtaktímu motoru) byl konstrukčně jednodušší a jeho hmotný výkon byl velký. To se pozitivně odrazilo na menších výrobních nákladech. Uvedené výhody prosazovaly motor nejen jako pohon pro jednostopá vozidla, ale i do automobilů. Zejména se pak jedná o období po druhé světové válce. Jednalo se o obsahy motocyklů v rozmezí 50 až 350ccm. Z našich výrobců to byli například Jawa či Aero. V oblasti automobilů mezi nejznámější patří německá vozidla s označením Trabant nebo Wartburg. V oblasti automobilů se bylo možné ještě setkat s automobily značky SAAB, které byli rovněž vybaveny dvoudobými motory.

Všechny výše uvedené jsou motory benzínové. Vznětové motory dvoudobé byly používány jako lodní či lokomotivní. S postupem času nachází uplatnění dvoudobý motor zejména v konstrukci jednostopých vozidel, kde prošel složitým vývojem až po současné vyspělé motory.

Jeho využití je v současnosti převážně v lehkých a hlavně benzínových motorech. Budeme-li mluvit o vozidlech, pak se jedná hlavně o motocykly nižších zdvihových objemů nebo například sněžné skútry. Ohlédneme-li se ale do jiných oblastí než jsou dopravní prostředky je využití dvoudobého motoru značné. Jedná se o motorové pily, sekačky na trávu, křovinořezy a ostatní podobnou techniku.

### **1.2. Princip funkce**

U tohoto motoru dochází k pracovnímu cyklu jednou za otočení klikové hřídele, což je oproti motoru čtyřdobému dvojnásobek. Je zde také absence ventilového rozvodu. Sací a výfukový kanál je zde zavírán a otevírán zakrytím nebo odkrytím kanálu na stěně válce pístem. Dalším rozdílem oproti motoru čtyřdobému je

v mazání motoru. Není zde klasická olejová lázeň, ale olej je přidáván přímo do benzínu.

Jak je z názvu patrné tento motor pracuje ve dvou dobách. V první fázi dochází k sání a kompresi a ve fázi druhé k expanzi a výfuku. Podíváme-li se na první fázi podrobněji, zjistíme, že píst se pohybuje směrem od dolní úvratě k horní a začíná stlačovat palivo. Jeho pohybem dochází k vytvoření podtlaku pod pístem, v klikové skříně. Tento podtlak je využit k nasátí čerstvé směsi do klikové skříně. Když píst dosáhne horní úvratě dochází k přeskočení jiskry na zapalovací svíčke a dochází k expanzi. K zapálení dochází s určitým náskokem, kterému se říká předstih. Jeho nastavení je pak také jedním z velmi důležitých faktorů pro správné spalování motoru.

Co se týče fáze druhé, do té přechází motor při zažehnutí čerstvé směsi. Tato fáze je také nazývána pracovní. Píst je tlačěn silou zpět do dolní úvratě a přes ojnici spojující píst s klikovým hřídelem dochází k přenosu výkonu. Při pohybu pístu směrem dolů dochází nejdříve k otevření výfukového kanálu, jehož horní hrana se nalézá nejnvýše. Začne se tedy otevírat a výfukové zplodiny začnou procházet do výfuku. Píst směřující k dolní úvratě pak stlačuje palivo nasáté v předchozí fázi do klikové skříně. Při dalším pohybu pístu dolů dojde k otevření přepouštěcího sacího kanálu, kterým je spojen prostor klikového hřídele a prostor nad pístem. Dochází k okamžitému přepuštění čerstvé směsi nad píst. Po dosažení spodní úvratě pak opět píst dostává do první fáze.

Zde je však nastíněn pouze velmi zjednodušený popis jak pracuje dvoudobý motor. V následující kapitole pak bude tato problematika řešena více do hloubky, zejména pak fáze výplachu a výfuku.

### **1.3. Konkrétní aplikace**

Jak bylo řečeno v úvodu, tato práce se zabývá motorem určený pro pohon motocyklu. Přesněji se pak jedná o motor o zdvihovém objemu 125 ccm. Na motoru, respektive na jeho výfukovém kanále již byla výfuková přívěra nainstalována, ale její řízení bylo pneumatické, což neumožňovalo variabilně doladovat její charakteristiku s ohledem na požadovaný průběh momentu. Principiálně funkce byla taková, že čím

většího tlaku bylo ve výfukovém otvoru dosahováno, tím více se výfuková přívěra otvírala. Tento princip je ve svém základu jednoduchý, ale případná změna závislosti otevření přívěry na otáčkách šla realizovat pouze pomocí výměny pružiny vracející přívěru do nulové polohy (nejmenší profil výfukového otvoru). Proto bylo nyní rozhodnuto pro realizaci pomocí elektricky ovládaného prvku. V porovnání s předchozím řešením, zde bude přesnější možnost nastavení horní hrany výfukového kanálu a tím zlepšení provozních podmínek. Dále pak tato možnost nabízí ještě další vylepšení oproti předchozímu spočívající v tom, že lze závislost otevření výfukové přívěry měnit bez nutnosti mechanického zásahu, ale pouze změnou mapy v navrženém softwaru. Následující dva body se zabývají detailnějším rozбором výplachu ve válci a výfukovým systémem, který je pro tuto práci stěžejní.

## 2. Rozbor výplachu a výfukového systému dvoudobého motoru

V této kapitole je podrobněji rozebráno jak probíhá výplach dvoudobého motoru a důležité parametry, které ho ovlivňují a vyvození předpokladů pro co nejlepší průběh výplachu. Další částí v této kapitole je rozbor výfuku a jeho vliv na celkový chod motoru a zdůvodnění použití výfukové přívěry.

### 2.1. Výplach

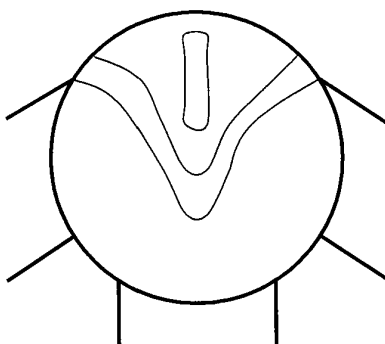
Důležitým faktorem, který nám ovlivňuje výkon motoru je samotný průběh výplachu. Snažíme se tedy o to, aby byl výplach co možná nejlepší. Abychom toho mohli dosáhnout musíme splnit určité požadavky. Těchto požadavků je pět a jsou uvedeny níže.

Jedná se o:

- maximální vzestupnou rychlost v blízkosti stěny válce
- vzestupný proud v oblasti minimálních vnějších vlivů
- rozhraní mezi vzestupným a sestupným proudem bez mikrovírů
- spojitý tvar vyplachovacího proudu během výplachu
- vhodné rozložení statického tlaku ve válci během výplachu

Výplach se popisuje pomocí rychlostního profilu (Obr. 1), což je v podstatě rozložení rychlosti axiálních proudů v rovině, která prochází středem válce. Proudové naváděné do spalovacího prostoru se střetnou v zadní části válce. Při jejich srážce dojde k poklesu rychlosti a expanze směřuje směrem k výfukovému otvoru, což způsobí vznik tzv. zkratového proudu. Tento jev je nechtěný a způsobuje snížení výkonu a zároveň se negativně projeví i na zvýšení obsahu nespálených uhlovodíků (HC) ve výfukových plynech.

Udržitelost proudového vlákna se vyjadřuje pomocí tzv. dopravního faktoru. Ten vyjadřuje pravděpodobnost, že se proudové vlákno udrží během výplachu. Tento parametr zahrnuje i vliv tvaru výfuku nebo jakým způsobem je daný výplach prováděn. Dalším parametrem je zachycovací účinnost, ta vyjadřuje poměr toku zachyceného k toku celkovému vzestupného proudu a lze pomocí ní vyjádřit průběh výplachu.



Obr. 1 Rychlostní profil [4]

Představíme-li si začátek při otvírání přepouštěcích kanálů. Nejdříve začíná čerstvá směs proudit do válce ve formě nahodilých stěnových proudů, dále se pak při dalším otevření kanálu skokově spojí jednotlivé proudy v proud jeden. Píst v takové poloze se nazývá, že je v bodě stabilizace. Úhel mezi otevřením přepouštěcích kanálů a právě bodem stabilizace bývá asi  $3^\circ$  až  $30^\circ$  (úhel natočení klikové hřídele). Usiluje se o to, aby tento úhel byl pokud možno co nejmenší. Nejlepší výplach totiž nastává v bodě stabilizace. Před bodem stabilizace je potřeba potlačit výtok čerstvé směsi. Toho je dosahováno především tvarem výfukového potrubí.

U válců, kde bylo používáno klasických dvou přepouštěcích kanálů se vyskytovaly výrazné nedostatky. Jedním z nich byla i značná labilita plnicího proudu. To znamenalo, že např. malým tlakovým rozruchem mohlo dojít ke změně plnicího proudu, jak jeho tvaru nebo polohy a to i po již předchozí stabilizaci.

Nastínění předcházejících problémů nás vede k tomu přijmout některá konstrukční opatření. Shrňme-li je, je tedy požadováno:

- rychlá stabilizace výplachu
- omezit či úplně potlačit náchylnosti ke změnám tvaru plnicího proudu po stabilizaci výplachu
- maximální hodnota střední zachycovací účinnosti
- přiměřená hodnota středního redukovaného průtokového činitele

Jak je již zmíněno výše, je snaha dosáhnout co nejrychlejší stabilizace plnicího proudu, což v podstatě znamená co nejmenší velikost úhlu stabilizace. Toho je dosahováno několika způsoby. Všechny tyto způsoby jsou však realizovatelné pouze mechanickým zásahem do parametrů válce. Tyto varianty jsou vypsány níže.

Možnosti zlepšení (minimalizace) úhlu stabilizace:

- Zúžení bočních pomocných přepouštěcích kanálů
- Tvar hlavního přepouštěcího kanálu
- Ostré hrany přepouštěcích kanálů
- Zmenšení vzdálenosti mezi přepouštěcími kanály
- Přidáním tzv. stabilizačních kanálů
- Zmenšením vrtání válce

## **2.2. Analýza funkce variabilního řízení výfukového kanálu**

Změnou horní hrany výfukového kanálu můžeme velmi dobře dosáhnout požadovaného průběhu tlaku ve výfuku, který ovlivňuje správné spalování. Přímou horní hranou však nemůže být hýbáno, protože začátek výfukového kanálu je v podstatě otvor ve stěně válce. Přívěra tedy musí být usazena až na začátek výfukového kanálu. Její hrana je však v největší blízkosti výřezu výfukového kanálu do válce. Můžeme ji tedy považovat, a její funkce je i taková, jako kdyby bylo hýbáno s přímo horní hranou výfukového kanálu. Přívěrou je třeba pohybovat (měnit profil výfukového otvoru) dle aktuálních otáček motoru. Takové ovládání je pak nazýváno variabilní.

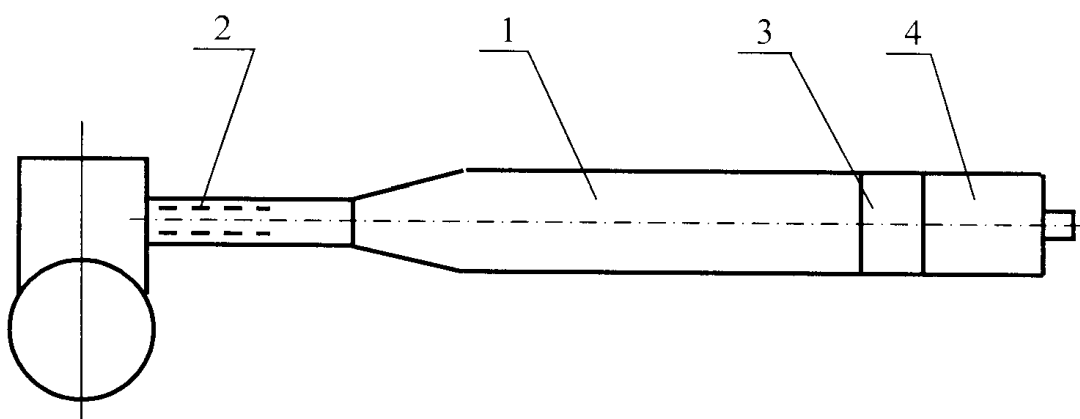
### **2.2.1. Obecný popis výfukového systému**

Jedná se o nedílnou součást každého spalovacího motoru. Jeho správná konstrukce totiž významnou měrou ovlivňuje chod a výkon celého motoru. Dříve byl kladen pouze požadavek z hlediska správného průběhu tlaku ve výfuku. Tyto výfuky pak byly konstrukčně jednodušší než v současné době. To je dáno tím, že dnes jsou do výfukového systému přidány prvky, které mají za úkol snížit podíl škodlivých látek ve výfukových plynech, pokud možno na co nejmenší hodnoty. Toho je dosahováno

pomocí katalyzátorů. Tato práce se ale tímto problémem nezabývá. Z hlediska konstrukce jsou na výfukový systém tedy kladeny požadavky uvedené níže.

Jedná se o:

- příznivě ovlivnit průběh točivého momentu a výkonu
- značné snížení hlučnosti výfuku
- snížení škodlivých látek ve spalínách – katalyzátor



Obr. 2 Výfuk dvoudobého motoru [4]

1. výfukový rezonátor, jak z názvu vyplývá je konstruován na rezonanční otáčky. Ty se volí dle toho na jaký účel máme v úmyslu daný motor použít. Ovlivňuje tlak ve výfukovém otvoru a tím je v okolí těchto rezonančních otáček zlepšeno plnění motoru a jsou zmenšeny ztráty čerstvé směsi
2. pomocný oxidační katalyzátor má hlavně za úkol co nejvíce urychlit zvýšení teploty spalín, aby mohl hlavní katalyzátor co nejdříve plnit správně svou funkci
3. hlavní katalyzátor, jeho poloha je volena tak, aby nebyla narušena činnost rezonátoru
4. tlumič hluku, jeho úkol je již patrný z názvu

Při požadavku na zvětšování výkonu, můžeme jít cestou zvětšování výfukového otvoru, tedy zvětšováním časování výfuku a při dalších úpravách je toho opravdu docíleno, ale objeví se nám tu značná nevýhoda a tou je zmenšení kroutícího momentu. Jako zlomový úhel je udáváno natočení nad  $160^\circ$  klikového hřídele, nad touto hranicí již dochází ke zdatelné ztrátě potřebného momentu. Například při časování výfuku na  $180^\circ$  je zvýšení momentu dosaženo v jedné třetině

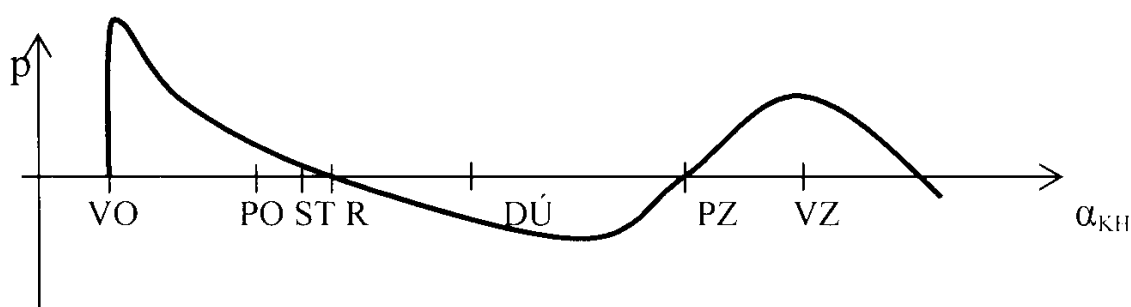
rozsahu otáček daného motoru, což nám umožní správné naladění výfukového systému na otáčky, kdy je dosaženo maximálního výkonu. Musí se samozřejmě rozlišovat, pro jaký účel je daný motor určen. U takového vysokootáčkového závodního motoru není tento jev nijak problematický, protože motor je zpravidla udržován v rezonačních otáčkách, což jsou tedy otáčky plného výkonu.

### 2.2.2. Výpočet výfukového rezonátoru

Rezonátor je velmi důležitá část výfukového systému. Tedy i samotný výpočet musí být proveden pečlivě, aby požadované výsledky, které jsou kladeny na rezonátor, odpovídaly těm reálným.

V rezonátoru se odehrávají děje, jako jsou hmotnostní pulsace v systému válec - rezonátor a také odraz tlakové vlny, která se šíří z výfukového otvoru po jeho otevření. Aby bylo dosaženo co největšího účinku, musí se docílit, aby periody obou těchto dějů byly pokud možno shodné nebo sobě velmi blízké. Jak tedy vyplývá, rozhodující parametry motoru jsou perioda a průběh odražené tlakové vlny.

Ideální případ průběhu tlaku nastává ve výfukovém otvoru při rezonančních otáčkách. Tedy v okamžiku největšího kroutícího momentu motoru.



Obr. 3 Průběh tlaku ve výfuku [4]

Na obrázku výše (Obr. 3) je na osách tlak ve výfukovém motoru a úhel natočení klikové hřídele. V počátku průběhu se nacházíme v bodě VO, to je bod otevření výfuku. Je vidět, že tlak strmě naroste. Po jeho otevření totiž vniká do výfuku tlaková vlna, její rychlost je rovna rychlosti zvuku. Jak se píst pohybuje dále, dochází k poklesu tlaku. Mezi požadavky na konstrukci výfukového otvoru je, aby svým tvarem zajistil, že i v bodě PO (přepouštěcí kanály otevřeny) bude ve válci určitý přetlak, který zabrání výplachu. Následuje bod ST (stabilizace), v tomto bodě jsou již splněny podmínky pro vytvoření spojitého plnicího proudu. V tomto bodě by teprve měl tlak ve válci klesnout pod hodnotu tlaku v klikové skříni. Výhodnější však je, když k vyrovnání tlaků dojde o něco později, zde označeného bodem R (rezerva). Mezi bodem rezervy a dolní úvratí je zapotřebí, aby ve válci došlo k poklesu tlaku a tím k dobrému výplachu. V této fázi závisí s průběhem tlaku průběh zachycovací účinnosti vyplachovacího systému.

K naplnění čerstvou směsí se musí využít doby, kdy jsou otevřeny přepouštěcí kanály, tedy mezi dolní úvratí a uzavřením přepouštěcích kanálů. Požaduje se, aby průběh tlaku nad pístem byl přibližně srovnatelný s polytropickou expanzí pod pístem, to umožní dobrý výtok z přepouštěcích kanálů do válce.

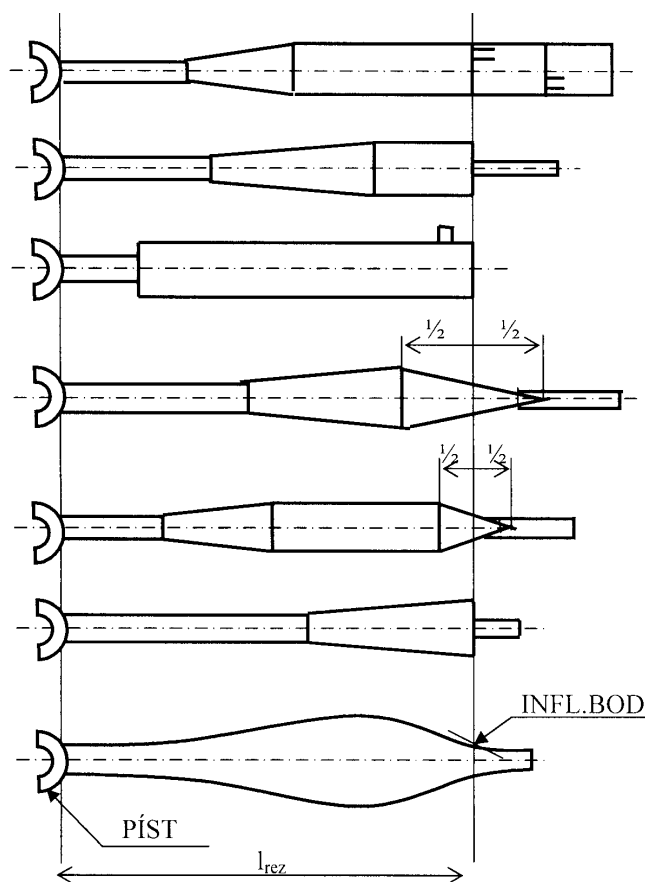
Jakmile je dosaženo tlakové minimum, přibližně mezi body DÚ (dolní úvratí) a PZ (přepouštěcí kanály uzavřeny) musí dojít ve válci k postupnému zvyšování tlaku. Je třeba, aby po uzavření přepouštěcích kanálů (bod PZ) byl tlak ve válci atmosférický. Po uzavření přepouštěcích kanálů se musí také zamezit úniku čerstvé směsi do výfukového potrubí vlivem stoupajícího tlaku ve válci. To se provádí pomocí pneumatického uzavření výfukového otvoru. V této fázi by měl průběh tlaku odpovídat polytropické kompresi ve válci. To znamená, že vzrůst tlaku by měl být ještě strmější, aby došlo k příznivému zpětnému pohybu té části čerstvé směsi, která se nachází ve výfukovém kanálu. V bodě značeném VZ (výfuk uzavřen) dochází k maximální hodnotě tlaku při uzavření výfukového otvoru.

Pokud se konstruuje výfukový rezonátor, měl by se jeho tvar volit tak, aby odrazem tlakové vlny došlo k průběhu tlaku, který je výše popsán. Při výpočtu rezonátoru se používá často zjednodušený postup, který je však zároveň dostatečně přesný. Tento postup je založen na lineární analogii mezi rozměry výfukového

rezonátoru a body v popsaném tlakovém průběhu, který si zakládá na předpokladech, že děj izotermický a v rezonátoru je konstantní rozložení spalin. Co se týče zjednodušujícího předpokladu, že děj je izotermický, tak skutečné rozložení teploty v rezonátoru za chodu motoru je velmi složité, například dochází k ochlazení části rezonátoru zapříčené uniklou čerstvou směsí během fáze výplachu a podobně. Jak bylo řečeno i za předpokladu stejné teploty, je pro účel návržení rezonátoru přesnost dostačující.

### 2.2.3. Určení rezonanční délky výfukového potrubí

Při návrhu rezonátoru je prvním bodem určení rezonanční délky potrubí, označované  $l_{rez}$ . Jedná se o vzdálenost měřenou v ose potrubí a to mezi středem výfukového otvoru a reflexním bodem. Reflexní bod se nachází v poloze rovné reflexní stěny potrubí. Jedná-li se o případ, kde dochází ke zužování reflexní části, je reflexní bod je smluvně ve středu této části. Na obrázku níže (Obr. 4) je uvedeno několik různých typů výfukových potrubí a názorně ukázáno jak se měří rezonanční délka.



Obr. 4 Způsoby určování rezonanční délky výfukového potrubí [4]

Pro výpočet rezonanční délky je vztah mezi rezonančními otáčky a rezonanční délkou následující:

$$l_{rez} = \frac{\alpha_v \cdot c_s}{12 \cdot n_{rez}} \quad (2-1)$$

$l_{rez}$  .....rezonanční délka  
 $\alpha_v$  .....úhel plného otevření výfukového otvoru  
 $c_s$  ..... střední rychlost zvuku ve spalínách  
 $n_{rez}$  .....rezonanční otáčky

Úhly objevující se ve vzorcích, jsou úhly natočení klikové hřídele.

Základní výfukový rezonátor se skládá ze tří částí. První část má válcovou délku  $l_1$ , druhá navazující část  $l_2$  má tvar rozšiřujícího se kužele (expanzivní část) a třetí část  $l_3$  má tvar zužujícího se kužele. Poslední část bývá nazývána také jako reflexní nebo kompresní. Pro lepší představu je obrázek níže (Obr. 5), který zároveň znázorňuje závislost mezi délkami jednotlivých částí a úhlovými hodnotami.

Délky dílčích částí rezonátoru lze pak dopočítat dle vztahů níže uvedených vztahů:

$$l_1 = \frac{\frac{\alpha_v - \alpha_p}{2} + \alpha_{ST} + \alpha_R}{\alpha_v} \cdot l_{rez} \quad (2-2)$$

$$l_2 = \frac{\alpha_p - \alpha_R}{\alpha_v} \cdot l_{rez} \quad (2-3)$$

$$l_3 = \frac{\alpha_v - \alpha_p}{\alpha_v} \cdot l_{rez} \quad (2-4)$$

$$l_{rez} = l_1 + l_2 + \frac{l_3}{2} \quad (2-5)$$

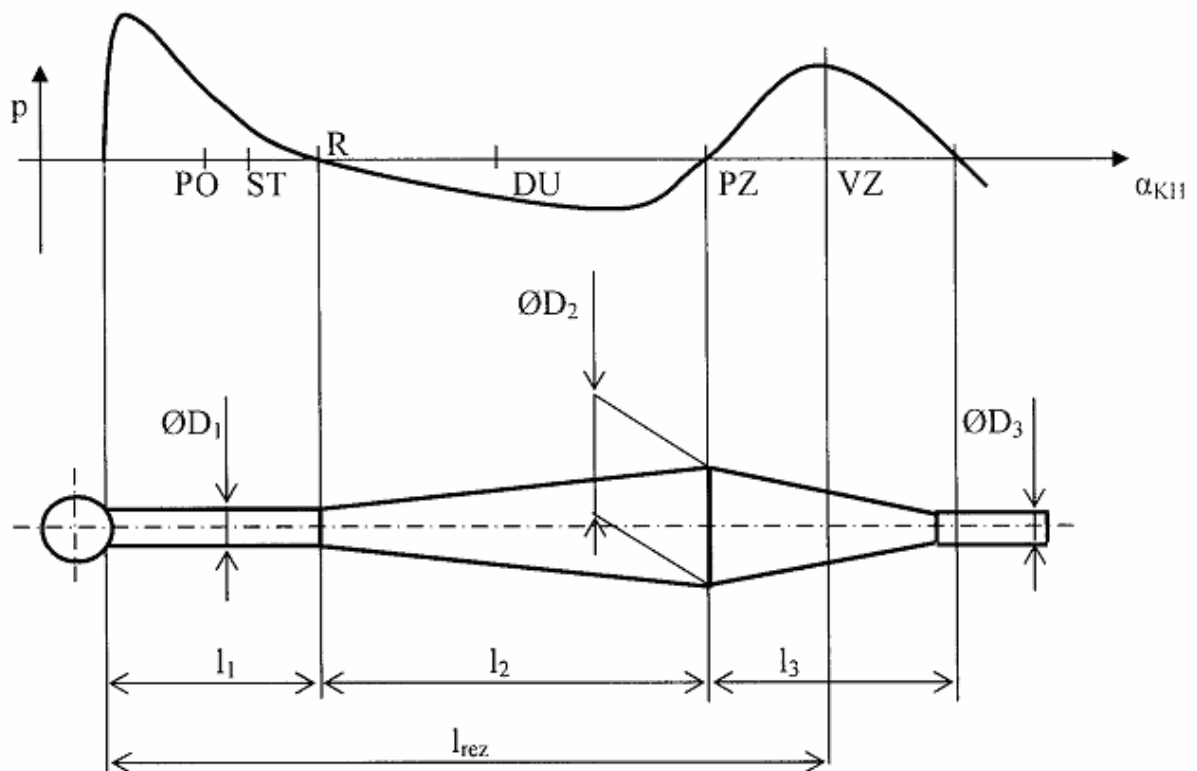
$\alpha_v$  .....úhel plného otevření výfukového otvoru  
 $\alpha_p$  .....úhel počátečního otevření výfukového otvoru  
 $\alpha_{ST}$  .....úhel stabilizace  
 $\alpha_R$  .....úhel rezervy, mezi body ST a R  
 $l_{rez}$  .....rezonanční délka

Přibližné vzorce pro výpočet průměrů:

$$D_1 = (0,5 - 0,7)D \quad (2-6)$$

$$D_2 = (2 - 3)D_1 \quad (2-7)$$

$$D_3 = (0,45 - 0,6)D_1 \quad (2-8)$$

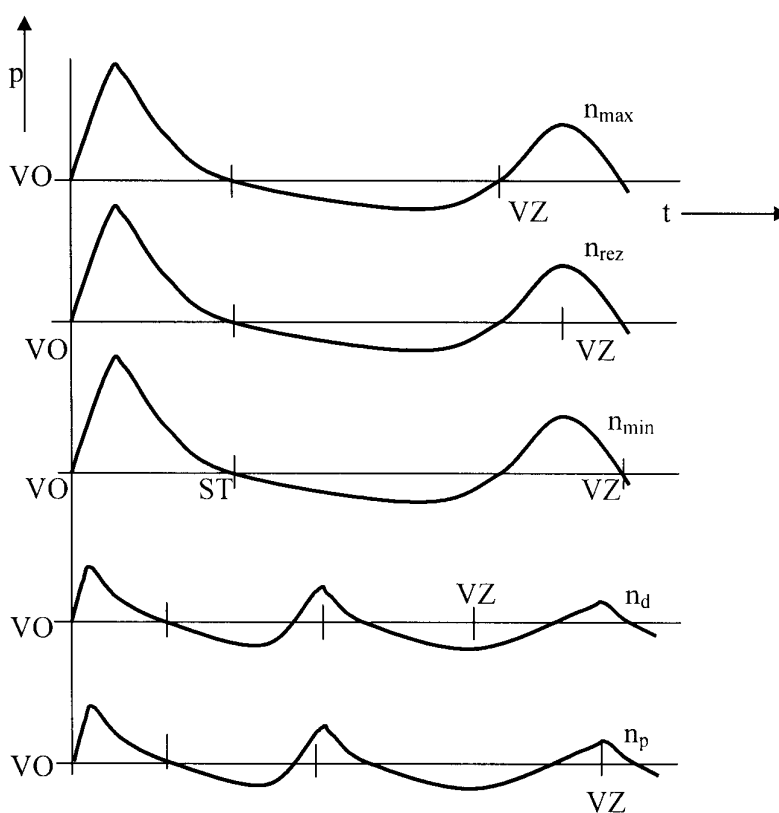


Obr. 5 Závislost mezi časováním a jednotlivými délkami částí výfukového potrubí

[4]

Na předcházejícím obrázku (Obr. 5), je znázorněn ideální rozložení tlakové vlny ve výfukovém potrubí. Tato situace však nastává pouze při rezonačních otáčkách motoru. Při změně otáček se zároveň mění i účinek tlakového průběhu ve výfukovém potrubí na chod motoru.

Můžeme se setkat s několika speciálními případy vzájemné souvislosti mezi frekvencí otáček motoru a průběhem tlaku ve výfukovém otvoru. Jak velký vliv má změna otáček na tlak ve výfukovém otvoru znázorňuje obrázek níže (Obr. 6).



Obr. 6 Průběh tlaku ve výfukovém otvoru při různých otáčkách [4]

Pokud otáčky motoru vzrůstají nad otáčky rezonanční, začne docházet opoždění příchodu přetlakové vlny do výfukového otvoru, což má za následek zvyšování ztrát vlivem vytlačování čerstvé směsi z válce po uzavření prepouštěcích kanálů a zároveň střední efektivní tlak klesá. Otáčky motoru, při nichž přetlaková vlna dorazí do výfukového otvoru právě při jeho zavření jsou otáčky maximální  $n_{max}$ .

Při hodnotě takových otáček dochází k velkému poklesu výkonu a to tak, že střední efektivní tlak dokáže pokrývat pouze mechanické ztráty motoru. Z toho

vyplývá, že z hlediska provozních stavů jsou tyto otáčky maximálně dosažitelné. Maximální otáčky lze zjistit ze vzájemné závislosti buď délky a rezonančních otáček nebo úhlového natočení klikové hřídele a rezonančních otáček.

$$n_{\max} = \frac{l_m}{l_1 + l_2} \cdot n_{\text{rez}} \quad (2-9)$$

$n_{\max}$  .....maximální otáčky  
 $n_{\text{rez}}$  .....rezonanční otáčky  
 $l_m$  .....celková délka výfuku  
 $l_1, l_2$  .....dílní délky rezonátoru

$$n_{\max} = \frac{\frac{\alpha_v + \alpha_p}{2} + \alpha_p}{\alpha_v} \cdot n_{\text{rez}} \quad (2-10)$$

$\alpha_v$  .....úhel plného otevření výfukového otvoru  
 $\alpha_p$  .....úhel počátečního otevření výfukového otvoru

Naopak budou-li otáčky motoru klesat pod otáčky rezonanční, tlaková vlna začne předcházet uzavírání výfukového otvoru a současně i podtlaková vlna se začne blížit do bodu stabilizace ST, který je důležitý pro správný výplach. Minimálními otáčkami  $n_{\min}$  se vyznačuje případ, kdy přetlaková vlna končí právě při zavření výfukového otvoru. Mezi otáčkami maximálními a minimálními lze hovořit přibližně o konstantní hodnotě středního efektivního tlaku. Minimální otáčky lze spočítat následovně:

$$n_{\min} = \frac{l_m}{l_1 + l_2 + l_3} \cdot n_{\text{rez}} \quad (2-11)$$

$$n_{\min} = \frac{\alpha_v}{\alpha_v + \frac{\alpha_v - \alpha_p}{2}} \cdot n_{\text{rez}} \quad (2-12)$$

Význam jednotlivých délek  $l$  a úhlů  $\alpha$  je stejný jako v předchozím případě.

Při konstrukci rezonátoru se minimální otáčky považují za nejmenší provozní otáčky motoru. Při dalším poklesu otáček pod otáčky minimální, lze proto připustit, že dojde ke zborcení výplachu tím, že podtlaková vlna předstihne bod stabilizace ST. Tento požadavek lze charakterizovat vztahem:

$$\frac{\frac{\alpha_v - \alpha_p}{2} + \alpha_{ST}}{\frac{\alpha_v - \alpha_p}{2} + \alpha_{ST} + \alpha_R} = \frac{\alpha_v}{\alpha_v + \frac{\alpha_v + \alpha_p}{2}} \quad (2-13)$$

Z tohoto vzorce pak lze vyjádřit úhel mezi body ST a R značený jako  $\alpha_R$ :

$$\alpha_R = \frac{\alpha_v - \alpha_p}{2\alpha_v} \cdot \left( \frac{\alpha_v - \alpha_p}{2} + \alpha_{ST} \right) \quad (2-14)$$

Další snižování otáček motoru by mělo za následek, že bod VZ (uzavření výfukového otvoru) se začne vůči přetlakové vlně posouvat více doprava (Obr. 6). Zvláštní případ nastává, pokud dojde k uzavření výfukového otvoru právě v okamžiku, kdy dochází k druhému tlakovému minimu. Takový tlakový průběh velmi výrazně zhoršuje činnost motoru. V podstatě dochází k tomu, že první podtlaková vlna je ve válci dříve, než dojde k otevření přepouštěcích kanálů. Jakmile dojde k jejich otevření, je okamžitě vysáta směs z klikové skříně do válce. Tento jev nechtěný z toho důvodu, že při malém otevření přepouštěcích kanálů není výplachovací systém schopen vytvořit spojitý plnicí proud. Čerstvá směs vniká do válce ve formě nahodilých turbulentních tvarů mísících se spaliny. Následně je výplach zabrzděn přetlakovou vlnou. Objevuje se i zpětný pohyb v přepouštěcích kanálech, což způsobí, že kliková skříň je plněna horkými spaliny.

Při uzavření přepouštěcích kanálů je potom druhou podtlakovou vlnou z části náplň odsáta do výfukového potrubí. Tento jev způsobí velmi špatné naplnění válce a značné ztráty čerstvě směsi ve fázi výplachu, což se negativně projeví na výrazném poklesu výkonu.

Na pokles výkonu má vliv i špatná činnost dmyhadla, kterou představuje kliková skříň. Následkem zpětného pohybu v přepouštěcích kanálech ve fázi výplachu, je kliková skříň částečně naplněna spaliny. Důsledkem je menší sací impuls, který doprovází zpětný pohyb sloupce čerstvé směsi v sacím potrubí, to vede dalšímu nechtěnému obohacování nasávané směsi.

Otáčky, při kterých dochází k tomuto jevu se značí  $n_d$  a přibližný vztah pro jejich určení je definován jako:

$$n_d = 0,6 \cdot n_{rez} \quad (2-15)$$

$n_{rez}$  .....rezonanční otáčky

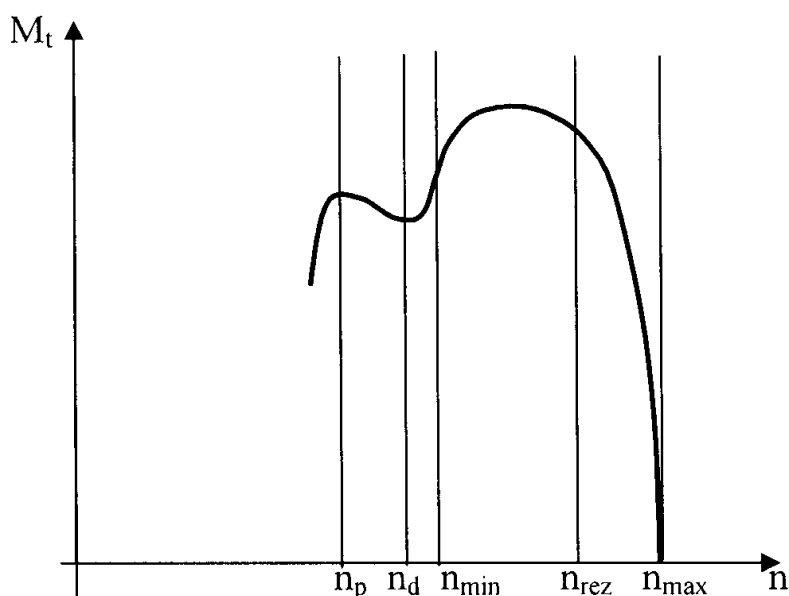
Tyto otáčky charakterizuje výrazný pokles kroutícího momentu. Velikost tohoto poklesu je úměrná úhlu otevření výfukového motoru. Například pro otevření výfuku  $160^\circ$  je pokles kroutícího momentu při otáčkách  $n_d$  oproti hodnotě při otáčkách rezonančních přibližně o 20%, pokud velikost otevření výfuku bude  $200^\circ$  dosahuje pokles kroutícího momentu až 65%.

Jsou-li otáčky stále nižší (klesající pod hodnotu  $n_d$ ), dochází k zavírání výfuku právě v okamžiku, kdy je dosahováno maximální hodnoty druhé odražené tlakové vlny (při otevření výfukového otvoru proběhnou ve výfukovém rezonátoru dva zákmity). Opět dochází ke zhoršení výplachu podtlakovou vlnou, bortícímu se plnicímu proudu před jeho stabilizací a nakonec i přetlaková vlna zamezuje úplnému vyprázdnění klikové skříň. Současně však dochází k pozitivně se projevujícímu zvýšení tlaku ve výfukovém otvoru při jeho zavírání, což způsobí mírné zvýšení kroutícího momentu ve srovnání předchozími otáčkami  $n_d$ . Tyto otáčky se značí  $n_p$  a platí pro ně vztah:

$$n_p = \frac{1}{2} \cdot n_{rez} \quad (2-16)$$

Při dalším snižování otáček pod otáčky  $n_p$  dochází zpravidla k prudkému poklesu kroutícího momentu a motor prakticky není schopen provozu při plně otevřeném přívodu paliva.

Výše uvedená fakta umožňují vymežit vnější momentovou charakteristiku dvoudobého motoru několika body, které charakterizují hodnoty výše uvedených otáček (Obr. 7). Tímto způsobem lze poměrně přesně odhadnout vlastnosti konstruovaného motoru.



Obr. 7 Průběh kroutícího momentu u dvoudobého motoru [4]

Z charakteristiky je vidět, že značný pokles kroutícího momentu je v otáčkách  $n_d$ . Tento jev je možno odstranit změnou periody kmitu ve výfukovém rezonátoru při poklesu otáček. Perioda kmitu závisí na střední rychlosti zvuku v rezonátoru, úhlu otevření výfukového otvoru a rezonanční délce. Pro změnu uvedených hodnot se používá regulačního zařízení výfukového potrubí. Nejčastěji používaným takovým regulačním zařízením, je zařízení, kterým je měněna výška výfukového otvoru. Princip spočívá v tom, aby otáčky minimální  $n_{min}$  byly při plně otevřeném výfukovém otvoru rovny otáčkám rezonančním u výfukového otvoru sníženého, značené  $n_{rez2}$ .

Vztah pro snížený výfukový otvor je následující:

$$\alpha_{v2} = \frac{n_{\min 1}}{n_{\text{rez1}}} \cdot \alpha_{v1} \quad (2-17)$$

$\alpha_{v2}$  .....snížený úhel otevření výfukového otvoru

$\alpha_{v1}$  .....úhel otevření výfukového otvoru (nesnížený)

$n_{\min 1}$  .....minimální otáčky

$n_{\text{rez1}}$  .....rezonanční otáčky

Vztah pro minimální otáčky při sníženém výfukovém otvoru:

$$n_{\min 2} = \frac{\alpha_{v2}}{\alpha_{v2} + \frac{\alpha_{v2} - \alpha_p}{2}} \cdot \frac{\alpha_{v1}}{\alpha_{v1} + \frac{\alpha_{v1} - \alpha_p}{2}} \quad (2-18)$$

$\alpha_p$  .....úhel počátečního otevření výfukového otvoru

Pro celkový otáčkový rozsah dvoudobého motoru s proměnou výškou výfukového otvoru je dán vztahem:

$$n = \frac{n_{\max 1} - n_{\min 2}}{n_{\max 1}} \cdot 100 \quad (2-19)$$

$n_{\max 1}$  .....maximální otáčky

Pro klasická rozmezí časování bývá celkový otáčkový rozsah u dvoudobého motoru bez regulace výfukového otvoru okolo 35%. V případech kde je regulace provedena je to přibližně 52-60%.

Při konstrukci rezonátoru lze vyjít ze dvou možností. Buď lze vyjít z časování při otevřeném výfukovém otvoru nebo při sníženém výfukovém otvoru. Rozborem a z praxe je dokázáno, že výhodnější variantou je výpočet pro otevřený výfukový otvor. Zároveň je třeba určit i kompresní poměr pro otevřený výfukový otvor a to i přesto, že při snížené horní hraně výfukového otvoru hodnota skutečného kompresního poměru překročí doporučené meze.

### 2.3. Regulační prvky

Možností jak regulovat se nabízí několik. Níže jsou vyjmenovány a nastíněny jejich principy.

- Změna úhlu otevření výfukového otvoru (popsáno výše)

- ploché posuvné šoupátko
- ploché výkyvné šoupátko
- válcové šoupátko
- pomocný výfukový otvor ovládaný šoupátkem

- Otáčková regulace předstihu

Jsou-li překročeny rezonanční otáčky začne předstih strmě klesat, což má za následek prodloužení doby hoření až do expanzivního zdvihu a vzrůstá teplota. Důsledkem je zvýšení teploty spalin a tedy vyšší rezonanční otáčky.

- Korekční prvky v karburátoru

Například při překročení rezonančních otáček dojde k postupnému ochuzování směsi, což má opět za následek zvýšení teploty a odezva je jako v předešlém případě.

- Změna rezonanční délky výfukového potrubí

- prodlužování výfukového potrubí
- pomocná klapka ve výfukovém potrubí
- přepínatelné výfukové potrubí, jedno pro nižší a druhé pro vyšší otáčky
- vřazení muzikusu do válcové části mezi válec a komoru rezonátoru

### 3. Varianty mechanického řízení přívěry

Jak již bylo řečeno v úvodu, dřívější řízení aktuální polohy přívěry bylo pomocí tlaku ve výfukovém otvoru. Tento princip je ve své podstatě jednoduchý a celkem spolehlivý. Nyní bylo rozhodnuto pro řízení pomocí elektronického ovládání. Nabízí se totiž lepší možnost ovládání v tom, že lze kdykoliv pouze pomocí přehrání softwaru změnit řídicí program v mikroprocesoru pro ovládání elektromotorku, tedy lehce změnit závislost otevření přívěry na aktuálních otáčkách. Softwarovým návrhem pro tuto aplikaci se pak zabývá poslední kapitola.

#### 3.1. Pohon s elektromotorem

Motorů na ovládání se nabízí hned několik. V této práci se uvažovalo nad dvěma možnostmi, buď použít stejnosměrný nebo krokový motorek. Protože přívěra vykonává pohyb posuvný, musí být vhodně zvolen i převod z otáčivého rotoru motorku. Správně zvolený převod je pak také velmi důležitý. U tohoto pohonu přicházely v úvahu převody tři:

- šnekový převod
- pákový převod
- šroubový převod

Jako nejvhodnější převod byl zvolen převod šroubový. Jednak kvůli jednoduchosti jeho realizace, tak pro jeho nejmenší rozměr z ostatních uvažovaných převodů.

I přesto, že v této práci bylo nakonec rozhodnuto pro ovládání pomocí krokového motorku, jsou dále uvedeny jiné možné varianty ovládání a jejich stručná charakteristika a vzájemné porovnání. Největší pozornost je pak věnována použitému řešení.

### **3.1.1. Stejnoseměrný motorek**

Z hlediska napájení a spolehlivosti přichází jako nejvhodnější stejnosměrný motor s permanentními magnety. Největší výhodou pro konkrétní aplikaci je dynamika tohoto pohonu. Ze všech zde srovnávaných má nejrychlejší reakci na požadovanou změnu. Dosáhne tedy požadované hodnoty natočení rotoru nejdříve. Dále se pak jedná o pohon, který je velmi dobře cenově dostupný.

Naopak mezi jeho nevýhody patří složitost potřebného regulátoru pro zajištění správného natočení rotoru do požadované hodnoty. Musí být použito snímače, který bude neustále kontrolovat polohu a v případě potřeby řídicí jednotka vyhodnotí nepřesnost a snaží se ji eliminovat. Musí zde být tedy prakticky realizován regulační obvod se zpětnou vazbou. Další nutností, je zde opatření dorazů přívěry a při zjištění polohy přívěry v místě dorazu zajistit rezervaci pro opačné otáčení rotoru.

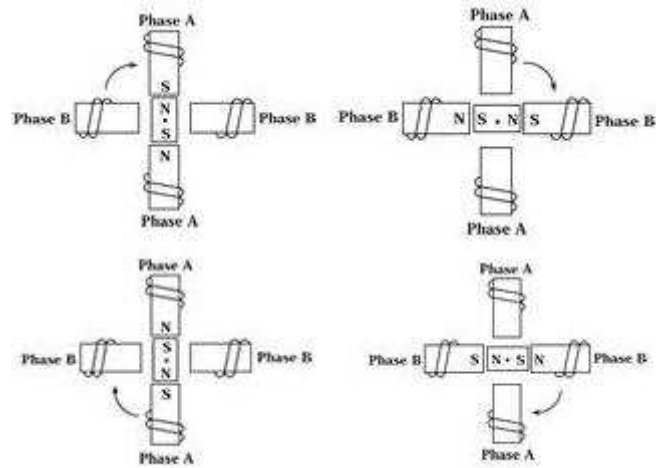
Realizace tohoto pohonu, by mohla být vhodná už jen kvůli dynamice. Avšak potřeba pro aktuální sledování polohy, která zde přináší potřebu realizovat poměrně složitější zapojení regulačního obvodu (oproti použitému řešení). Což by tento pohon zbytečně zkomplikovalo a tedy rozhodlo se, že daný pohon zde použit nebude.

### **3.1.2. Krokový motorek**

Tento druh pohonu patří mezi novější a je v současnosti hojně využíván pro své charakteristické vlastnosti, které rozhodly pro použití v této práci, pro ovládání přívěry.

#### **3.1.2.1. Princip funkce**

Jak již jeho název napovídá o funkci, rotor může být přesně otáčen po několika stupních (zaleží na konkrétním motorku o kolik). Jednomu takovému pootočení se pak říká krok (Obr. 8). Můžeme se setkat i s motorky které dokáží mít i stovky kroků na otáčku. Tento údaj bývá udáván jako počet kroků na stupeň či počet kroků na jednu otáčku rotoru. Otáčení rotoru u tohoto typu motorku není plynulé, ale po jednotlivých krocích.



**Obr. 8 Princip krokového motoru**

U tohoto pohonu je jednou z hlavních výhod, že pokaždé známe aktuální polohu rotoru. Není zde tedy třeba čidla polohy. Pro nastavení rotoru do požadované polohy stačí aplikovat správný počet kroků.

Řízení otáčení polohy rotoru však nemusí být jen po celých krocích. V aplikacích kde je vyžadováno jemnějšího úhlového natočení rotoru, než umožňuje řízení s celým krokem jsou možné varianty řízení s polovičním krokem nebo i řízení pomocí mikrokrokování. V práci je využito základní ovládání s celým krokem, protože jeho přesnost je pro danou aplikaci dostačující.

### **3.1.2.2. Řízení s polovičním krokem**

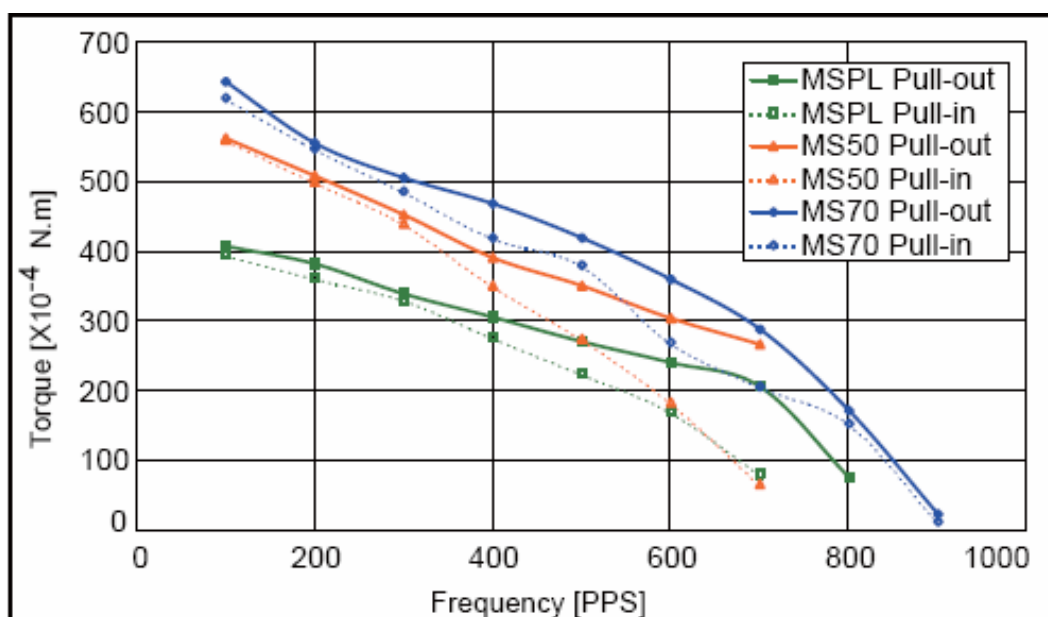
Podstata tohoto řízení spočívá v tom, že je nejdříve aktivní pouze jedna fáze a rotor je natočen ve směru působení magnetického pole. Při požadavku na otočení o půl kroku zůstává tato fáze stále aktivní, ale zároveň je aktivní i fáze sousední (dle orientace otáčení). Rotor se tedy natočí pouze o půl kroku. Při dalším pootočení je prvá fáze vypnuta a aktivní zůstává pouze druhá atd. Nevýhodou je, že moment není během otáčení rovnoměrný. V momentě kdy jsou aktivní obě fáze je totiž moment  $\sqrt{2x}$  větší než v případě, kdy je aktivní pouze jedna fáze.

### 3.1.2.3. Řízení pomocí mikrokrokování

Je-li zapotřebí ještě jemnějšího otáčení než nám může poskytnout řízení s polovičním krokem, je možnost využít tzv. mikrokrokování. Princip vychází z předchozího, kde byly využity současně obě fáze. Tedy jemnějšího nastavení je možno dosáhnout tím, že aktivní budou opět obě fáze, avšak protékající proud se v každé z nich bude lišit. Nevýhodou je, že se již zde oproti předchozím řešením vyskytuje určitá chyba v natočení rotoru. Další vyplývající potřebou je jednotlivá regulace proudu každého vinutí zvlášť. Je tedy vhodné zvážit, jestli není lepší zvolit dražší motorek s jemnějším krokováním než realizovat uvedené řešení.

### 3.1.2.4. Momentová charakteristika

Oproti předchozímu pohonu (stejnoseměrnému motorku) je zde nižší dynamika. S větší rychlostí otáčení rotoru (více kroků za sekundu) klesá moment motorku. Krokový motorek zpravidla charakterizují dvě křivky v momentové charakteristice. Jedná se o PULL-OUT a PULL-IN (Obr. 9). Prvá křivka PULL-OUT udává jaká maximální zátěž může být připojena, aby nedocházelo k vynechávání kroků (moment zvratu) při konstantní rychlosti otáčení. Křivka druhá PULL-IN určuje, jak velká může být připojena zátěž pro rozběh a doběh bez vypadnutí ze synchronizace.



Obr. 9 Momentová charakteristika krokového motorku

[9]

Pokud nastane případ, že dojde k vypadnutí ze synchronizace, dojde k jinému natočení rotoru než jaké je požadované. Je to způsobeno tím, že na rotor působí síla větší než jaký je jeho moment.

Jedním z hlavních hledisek při volbě správného krokového motorku je tedy to, aby jeho moment byl dostačující. Pro ovládání přívěry byla síla potřebná na zdvih do maximální polohy určena pomocí laboratorní váhy. Tím byl zjištěn hlavní údaj pro následný výpočet, zda bude moment motorku dostačující. Síla potřebná na zvedání přívěry je přenášena přes šroubový převod. V podstatě se pak jedná o nakloněnou rovinu.

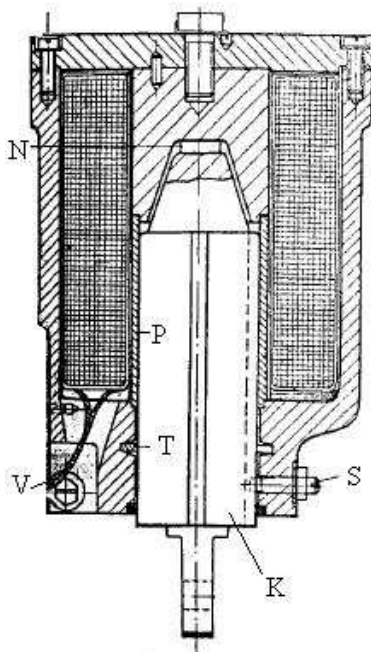
### 3.2. Lineární elektromagnet

Tato varianta mechanického řízení byla prvně uvažována jako nejvhodnější. Avšak na praktickou realizaci po dohodě nedošlo. Důvodem byla složitost tohoto řešení, což s sebou nese nároky na praktické řešení, které by obsahovalo další bloky na vyhodnocování a regulaci. Ovládání by bylo řešeno pomocí PWM regulace.

Všeobecně se těchto magnetů používá k otvírání ventilů, brzdění a podobných na dálku ovládaných mechanismů. Jejich síla uzvednout břemeno o určité váze se pak odvíjí od konstrukce. Lze jím zvedat závaží až řádově stovky kil. Omezením je dráha pohyblivé části, ta bývá nejčastěji několik centimetrů. Při konstrukci mechanismu se ale usiluje o to, aby zdvih byl co nejmenší. Jinak budou jeho rozměry příliš velké. Další faktorem, který si musíme určit je, jestli bude magnet zatěžován krátkodobě nebo trvale. V práci by se jednalo o zatížení trvalé.

#### 3.2.1. Princip funkce

Princip elektromagnetu je snadněji pochopitelný z obrázku níže (Obr. 10). Je zde uveden typický stejnosměrný elektromagnet s kuželovou mezerou.



Obr. 10 Stejnoseměrný elektromagnet [5]

Pevná část se skládá z válcového pláště dna a nástavce, v kterém je provedeno kuželové vybrání. V dutině pláště je těsně (kvůli odvodu tepla) vsazena budící cívka, která vtahuje ocelovou kotvu (K) do mosazného pouzdra (P). Na spodku kuželové mezery se nachází nemagnetická vložka (značena N), která má za úkol bránit přilepení kotvy vlivem remanentního magnetismu, což by mělo za následek zadření mezery. Na levé straně jsou přívodní vodiče (V). Těsnící kroužek (T) brání proti vniknutí nečistot. V případech, kdyby hrozilo nechtěné otočení kotvy, je k dispozici stavěcí šroub (S), který brání pootočení.

### 3.2.2. Výpočet rozměrů stejnosměrného elektromagnetu

Zde je návrh elektromagnetu, který byl navržen přímo pro danou aplikaci. Při návrhu elektromagnetu je nutné si určit základní požadavky, které od něj očekáváme. Pro pohyb s výfukovou přívěrou je zapotřebí síla v tahu  $F = 10N$  a požadovaný zdvih je  $\delta = 6mm$ . Napětí získané z baterie motocyklu je  $U = 12V$ .

Konkrétní hodnoty pro elektromagnet již lze dopočítat dle níže uvedených vztahů.

Průměr jádra pro trvalé zatížení:

$$d = 0,18\sqrt[5]{F\delta^2} = 0,0233m \quad (3-1)$$

Činitel rozšíření vzduchové mezery:

$$\varepsilon = 1 + \frac{\delta}{d} - 0,5\left(\frac{\delta}{d}\right)^2 = 1,224 \quad (3-2)$$

Efektivní plocha pólu:

$$S_\delta = \frac{\pi}{4}d^2\varepsilon^2 = 0,00064m^2 \quad (3-3)$$

Indukce ve vzduchové mezeře:

$$B_\delta = \sqrt{\frac{F}{40000S_\delta}} = 0,1976T \quad (3-4)$$

Magnetické napětí pro vzduchovou mezeru:

$$U_{\delta} = 0,8 \cdot 10^6 B_{\delta} \delta = 948,48A \quad (3-5)$$

Magnetomotorická síla:

$$F_m = 1,3U_{\delta} = 1233,024A \quad (3-6)$$

Střední délka závitů:

$$l_z = 2\pi d = 0,14m \quad (3-7)$$

Průřez drátu cívky:

$$S = \frac{\rho F_m l_z}{U} = 0,287 \cdot 10^{-6} m^2 \quad (3-8)$$

Zvolený drát by byl průměru 0,6 mm.

Budící proud:

$$I = \frac{d^2}{U} \cdot 10^4 = 0,45A \quad (3-9)$$

Počet závitů cívky:

$$N = \frac{F_m}{I} = 2740 \quad (3-10)$$

Délka cívky zvolena:

$$l = 2,5d = 0,058m \quad (3-11)$$

Na tuto délku se vejde závitů:

$$n = \frac{58}{0,6} = 97 \quad (3-12)$$

Tudíž počet poloh bude:

$$p = \frac{2740}{98} = 28 \quad (3-13)$$

Pro daný počet poloh bude tloušťka cívky prokládaných papírem 0,1mm:

$$b = 97 \cdot 0,6 + 96 \cdot 0,1 = 67,8mm \quad (3-14)$$

V železném jádře bývá průměrně o 20% větší indukce než na kraji pólu:

$$B_{Fc} = 1,2\varepsilon^2 B_{\delta} = 0,355T \quad (3-15)$$

Výsledná indukce vychází velmi malá, tudíž můžeme magnetické napětí pro železo zanedbat. Dokonce je zde možnost ještě zeslabit magnetický obvod.

Nakonec trvalé ztráty v magnetové cívce:

$$P_z = UI = 5,4W \quad (3-16)$$

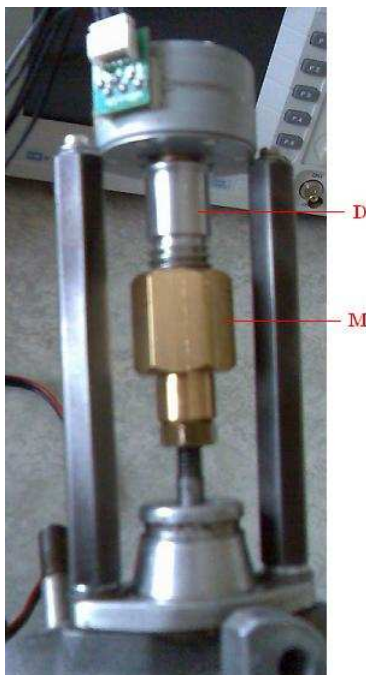
Nyní jsou již známy konkrétní hodnoty a základní rozměry elektromagnetu, lze ho tedy již prakticky zkonstruovat.

## 4. Řešení mechanického ovládní výfukové přívěry pro danou aplikaci

### 4.1. Zvolení převodu

Z uvažovaných variant, uvedených výše, bylo v této práci rozhodnuto pro spojení motorku a jím ovládané přívěry pomocí šroubového převodu. Hlavním hlediskem byla jednoduchost převodu a neméně podstatný rozměr samotného šroubovému převodu narozdíl od ostatních uvažovaných variant.

U tohoto typu převodu byly pak hlavní nároky kladeny na materiály, které o sebe třou a přenášejí požadovaný moment. V podstatě se zde jedná o přenos síly z rotačního pohybu motorku na pohyb vertikální, který zdvihá přívěru. K tomuto přenosu síly dochází pomocí nakloněné roviny. Jako vhodné materiály, u kterých bude dosaženo co nejmenšího tření, byly zvoleny dural (D) a mosaz (M). Z duralu je vytvořen závit připevněný k rotoru motorku, který se otáčí v mosazné matce, která je spojena s přívěrou a zvedá ji do požadované polohy. Vhodnost těchto materiálů byla vyvozena z praxe. Praktické provedení šroubového převodu je zobrazeno níže (Obr. 11).



Obr. 11 Šroubový převod

## 4.2. Konstrukční řešení

Nevýhodou krokových motorků je omezená rychlost otáčení rotoru. To zapříčiňuje to, že rotor vždy musí mít dostatečný čas (řádově jednotky milisekund) na to, aby se mohl ustálit v každém kroku a správně tak nastavit žádanou polohu. Pokud by čas na ustálení byl příliš krátký, motorek by mohl začít vypadávat ze synchronizmu (vynechávat kroky).

Rychlost otáčení krokového motoru závisí úměrně na připojené zátěži a její hmotnosti, která přímo ovlivňuje moment setrvačnosti. Jak tedy vyplývá, čím větší hmotou bude rotor otáčet, tak tím bude větší její setrvačný moment a tedy potřebný čas na vykonání každého kroku bude delší, než při menší zátěži.

Konkrétně u této aplikace je kladen důraz na rychlost odezvy, tedy rychlost otevření přívěry v závislosti na otáčkách. Pro ještě rychlejší otevírání přívěry při dosažení maximálního otáčení rotoru bez vypadávání ze synchronizace, se docílilo pomocí většího stoupání závitu. Konkrétně se pak jedná o závit s 2 mm stoupáním.

Použití motorek má 48 kroků na otáčku. Což znamená, že otočení rotoru o 360° vykoná posuvný pohyb 2 mm. Maximální zdvih přívěry je 6 mm, tedy jsou potřeba tři otočení rotoru. Například pro vykonání posuvného pohybu 1 mm je třeba, aby motorek vykonal 24 kroků. Je vidět, že při menším stoupání by se muselo vykonat více otáček motoru, což by prodloužilo čas pro nastavení přívěry do požadované polohy.

## **5. Ovládání krokového motorku a návrh softwaru**

### **5.1. Ovládací panel**

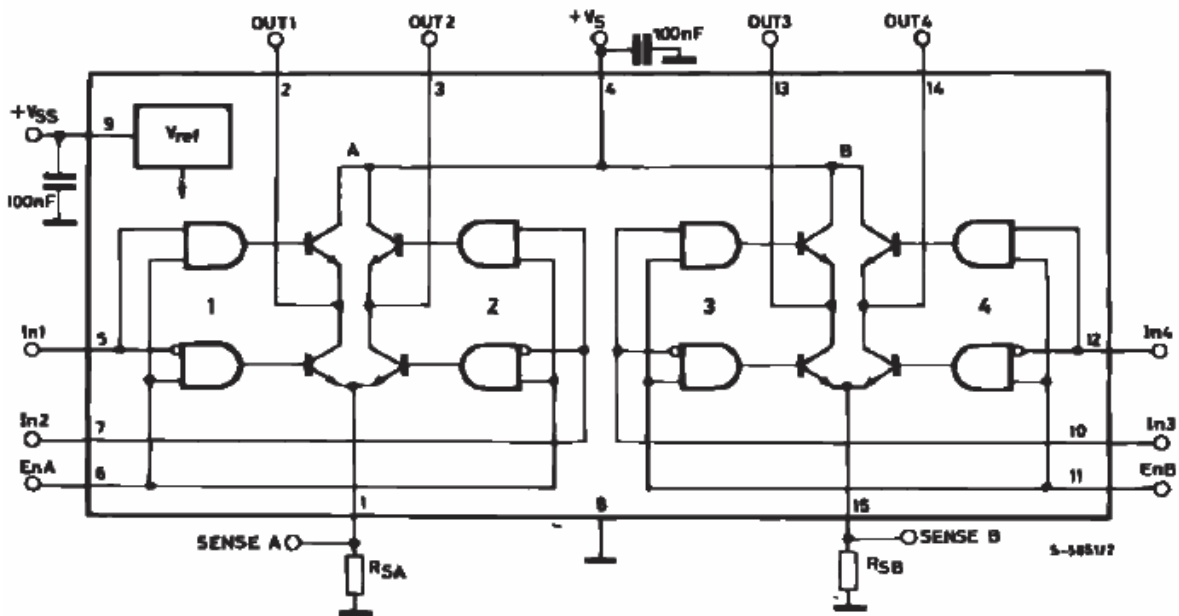
V této části je rozebráno konkrétní zapojení obvodu pro ovládání přívěry a jeho nejdůležitější komponenty. Následně je uveden návrh programu pro mikroprocesor.

#### **5.1.1. Použité integrované obvody**

Na ovládacím panelu přívěry jsou osazeny dva integrované obvody, které tvoří základ ovládacího panelu. Jedná se o obvody firmy Thomson. Prvý z obvodů s označením L297 je řídicí obvod určený pro ovládání obvodu podřízeného L298. Pro použití integrovaných obvodů bylo rozhodnuto jak z rozměrových důvodů, kde realizace pomocí diskretních součástek by zabrala podstatně větší plochu plošného spoje, tak pro jejich jednoduchost na ovládání.

##### **5.1.1.1. Dvojitý H-můstek L298**

Jak je z názvu patrné, tento integrovaný obvod v sobě obsahuje požadované dva H-můstky (Obr. 12). Použitý krokový motorek má totiž dvě vinutí a tedy pro každé je třeba zapotřebí jednoho H-můstku. Jedná se obvod, který již v sobě má ovládací logiku, která dokáže přímo pracovat s předřazeným ovládacím obvodem L297 (TTL kompatibilní). Na základě příchozích ovládacích signálů jsou spínány jednotlivé tranzistory v můstku, které určují směr průchodu proudu vinutím motorku a tedy směr otáčení rotoru. Signály přejímanými jsou In1, In2, In3, In4 (na výstupu z L297 značeny A,B,C,D) a signály povolujícími činnosti každého z můstků, označené jako EnA a EnB (na výstupu L297 značeny INH1, INH2). Povolovací vstupy jsou aktivní log 1. Pokud je tato podmínka splněna záleží už jen na jednotlivých spínacích kombinacích přicházejících od L297.

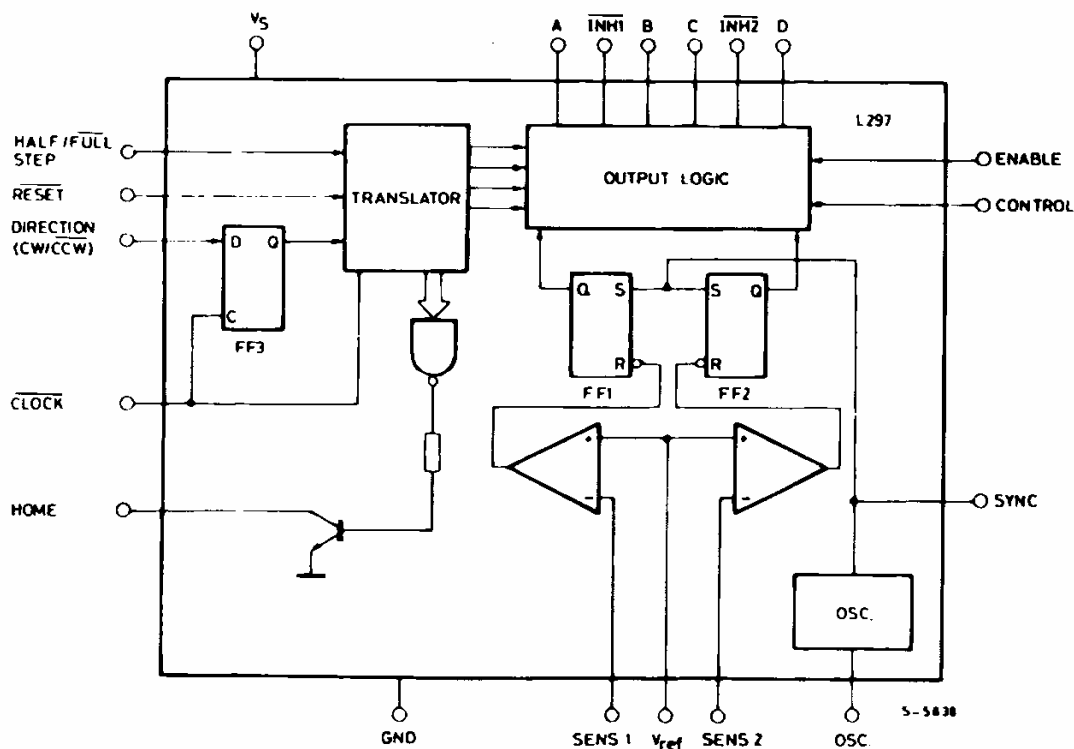


Obr. 12 Vnitřní blokové zapojení dvojitého H-můstku L298 [7]

### 5.1.1.2. Obvod pro řízení krokového motorku L297

Jedná se o obvod určený přímo pro řízení krokových motorků. Tento obvod přejímá od řídicího mikroprocesoru potřebné řídicí signály, kterými jsou údaje o počtu kroků, typu kroku (celý nebo poloviční), směru otáčení, resetování, povolení ovládaní a funkce choppru (na kterých vývodech má pracovat).

Tento obvod je pak schopen vygenerovat spínací kombinace pro logiku obsaženou v L298. Zároveň podává i informaci i tom, pokud se rotor vrátí do výchozího postavení. Hlavní výhodou tohoto obvodu je odlehčení výpočetní zátěže mikroprocesoru.



Obr. 13 Vnitřní blokové zapojení integrovaného obvodu L297 [8]

Obvod pro správnou funkci potřebuje základní signály přijímané od nadřazeného mikroprocesoru. Přehled a jejich aktivní režimy jsou uvedeny v tabulce níže (Tab. 1). Pokud je proveden reset a je povoleno řízení signálem ENABLE, obvod pak reaguje na každou nástupnou hranu na hodinovém vstupu CLOCK. Každý pulz pak způsobí, že motorek se pootočí o jeden krok (samozřejmě záleží na zvolení plného nebo polovičního kroku a směru otáčení).

Jak je zmíněno výše, obvod obsahuje chopper. Pro požadovanou hodnotu proudu na výstupu můstků jsou vyvedeny snímací vstupy, které porovnávají aktuální hodnotu proudu s požadovanou. V podstatě se jedná o komparátory, které mají definovanou napěťovou úroveň, při které překlápí, pomocí referenčního napětí. Porovnává se úbytek napětí na odporech  $R_S$  na snímacích vstupech SENS a velikosti referenčního napětí, které reprezentuje žádanou hodnotu proudu na výstupu.

Vstup značený OSC slouží k synchronizaci v případě, že by bylo zapotřebí řízení pomocí více obvodů L297. V této práci se však s tímto problémem nesetkáváme.

ENABLE	Aktivuje (v log. 1) H-můstky obsažené v L298. V log. 0 jsou můstky deaktivovány a tedy nepracují.
RESET	Resetuje L297. Aktivní je v log. 0.
CONTROL	Určuje jak má chopper pracovat. V log. 0 pracuje chopper na vývodech INH1 a INH2. V log. 1 pracuje na vývodech ABCD.
HALF/FULL	Rozhoduje o řízení s polovičním krokem nebo celým. V log. 0 se jedná o řízení s celým krokem. V log. 1 se jedná o poloviční krokování.
DIRECTION	Určuje směr otáčení.
CLOCK	Přivedením vzestupné hrany na tento vstup způsobí pootočení o jeden krok.
HOME	Výstupní informace z L297, že rotor se otočil o celou otáčku (360°).

**Tab. 1** Funkce jednotlivých vstupů/výstupů L297

## 5.2. Processor

Hlavním řídicím prvkem je mikroprocesor z řady x51, který vypočítává správné nastavení přívěry v závislosti na aktuálních otáčkách. Zde se jedná o 8-bitový mikroprocesor s označením AT89S8253 od firmy Atmel. Je využito portu P2, kde funkce jednotlivých pinů jsou uvedeny v tabulce (Tab. 2). Přes port je ovládán podřízený systém pro řízení motorku L297, ten je kompatibilní s TTL logikou a není tedy potřeba žádného přizpůsobení. Práce je odzkoušena na laboratorní desce osazené tímto procesorem.

Port P2	Signál
P2.0	DIRECTION
P2.1	CLOCK
P2.2	HALF/FULL
P2.3	RESET
P2.4	ENABLE
P2.5	nezapojen
P2.6	KONTROL
P2.7	HOME

**Tab. 2** Funkce pinů portu P2

### **5.2.1. Software**

Celý ovládací software byl psán v assembleru (jazyk symbolických adres). Základní úlohou programu obsaženého v mikroprocesoru je vypočítávat aktuální otáčky motoru (bráno ze zapalování) a vysílat příslušný počet kroků na hodinový vstup (CLOCK) do obvodu pro řízení krokového motorku a docílit tak správného nastavení otevření výfukové přívěry.

Použití krokového motorku nám podstatně usnadňuje i tu možnost, že pomocí změny software si lze libovolně měnit rychlost otevření přívěry. Řečeno jinak, lze si libovolně navolit, jak rychlá bude odezva změny nastavení přívěry v závislosti na otáčkách. Toho se snadno docílí pomocí změny doby časovače, který v mikroprocesoru obstarává, aby jednotlivé kroky měly dostatečný čas na ustálení. Tedy nastavením delší doby (prodloužení doby přetečení časovače) se prodlouží doba jednoho kroku a tedy zároveň se prodlouží celá doba potřebná k nastavení do požadované polohy.

#### **5.2.1.1. Vyhodnocení otáček**

Vyhodnocování otáček je prováděno pomocí časovače T1 a externího přerušení přivedeného na příslušný pin mikroprocesoru (P3.3). Otáčky jsou v mikroprocesoru zjišťovány tak, že se vyhodnotí doba mezi přicházejícími externími přerušeními. Je tedy známa perioda jedné otáčky klikové hřídele a z té následně vypočtena hodnota aktuálních otáček motoru.

Při realizaci této práce bylo rozhodnuto, že přívěra bude posunována po 500 ot/min a to s posunutím vždy o 0,5 mm. Základní nastavení je provedeno podle tabulky uvedené níže (Tab. 3). Otevřením je zde myšleno, o kolik je posunuta horní hrana výfukového otvoru (zvětšení profilu výfukového otvoru).

Otáčky [1/min]	Otevření [mm]
6000	0
6500	0,5
7000	1
7500	1,5
8000	2
8500	2,5
9000	3
9500	3,5
10000	4
10500	4,5
11000	5
11500	5,5
12000	6

**Tab. 3 Základní mapa pro nastavení výfukové přívěry**

Mapu otevření lze lehce pozměnit pomocí upravení hodnot v navrženém softwaru. Což je jednou z hlavních předností této práce, že k jednotlivým otáčkám není napevno přiřazena hodnota otevření, jak tomu bylo například při předchozím řešení, kdy otevření přívěry bylo ovládáno pouze tlakem ve výfuku. Byla sice možnost tuto závislost lehce pozměnit pomocí výměny pružiny (za pružinu s jinou tuhostí) vracející přívěru do základní polohy (nulové otevření), avšak tento postup nešel praktikovat za běhu motoru a samotná výměna si žádala rozebrání ovládání přívěry.

## Závěr

Úlohou této práce bylo teoreticky podložit účel použití výfukové přívěry na dvoudobém motoru. Navrhnout vhodný pohon pro ovládání a zdůvodnit jeho výhody oproti ostatním pro konkrétní aplikaci. Následně prakticky navrhnout plošný spoj pro ovládání krokového motorku, který přes šroubový převod nastavuje výfukovou přívěru do žádané polohy. Posledním bodem je vývoj softwaru pro řízení variabilního časování přívěry.

Při realizaci této práce bylo zjištěno, že při zvolení pohonu pro mechanické ovládání přívěry, kterým je krokový motorek, je velmi důležitá rychlost jeho otáčení a kroutící moment. U spalovacích motorů a zvláště u motorů dvoudobých (vyšší otáčky) dochází k rychlému nárůstu otáček, kterému se musí přívěra dostatečně rychle vyrovnat (dostatečně rychlá změna horní hrany výfukového otvoru). Tedy motorek musí splňovat dostatečně rychlé krokování s dostatečně velkým momentem, bez vypadávání ze synchronizace.

Programově realizované ovládání nyní umožňuje lepší a snadnější ovládání výfukové přívěry. Tím je myšleno, že lze kdykoliv pouze změnou softwaru změnit závislost otevření přívěry na otáčkách. Použití krokového motorku také usnadnilo to, že lze lehce pozměnit i závislost rychlosti otevření přívěry na otáčkách (pomocí prodloužení doby kroku).

Při zadávání práce se uvažovalo ještě o pozdějším odzkoušení motoru na dynamometru. Tento bod však již splněn nebyl. Důvodem byla jak časová náročnost práce, tak rozsah práce.

Práce i přes neodzkoušení na dynamometru je splněna, neboť hlavním úkolem bylo prakticky provést variabilní časování výfukové přívěry. Odzkoušení na dynamometru by pak zahrnovalo vytvoření různých map, které by se dali měnit dle potřeby. Pro tuto aplikaci je práce připravena.

## Seznam literatury

- [1] GREGORA, Stanislav; MAŠEK, Zdeněk. *Elektronické a mechatronické systémy v konstrukci silničních vozidel*. 1. vyd. Pardubice : Univerzita Pardubice, 2008. 225 s.
- [2] SKALICKÝ, Petr. *Mikroprocesory řady 8051*. 2. vyd. Praha : BEN – technická literatura, 2002. 160 s.
- [3] KOŽOUŠEK, Josef. *Výpočet a konstrukce spalovacích motorů II*. 1. vyd. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1983. 483 s.
- [4] JAROŠ, Karel. *Spalovací motory II: Konstrukce spalovacích motorů*. 1. vyd. Praha : Mezinárodní organizace novinářů, 1990. 204 s.
- [5] CIGÁNEK, Ladislav; BAUER, Miroslav. *Elektrické stroje a přístroje*. 2. vyd. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1957. 640 s.
- [6] *Datasheet mikroprocesoru AT89S8253*, Atmel [online], 2010 [cit. 2010-05-15]. Angličtina. Dostupné z WWW:  
<[http://www.atmel.com/dyn/resources/prod\\_documents/doc3286.pdf](http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc3286.pdf)>.
- [7] *L298 Dual full-bridge driver*, SGS Thomson Microelectronics, 2000 [cit. 2010-05-15]. Angličtina. Dostupné z WWW:  
<<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/SGSThompsonMicroelectronics/mXrqqxz.pdf>>.
- [8] *L297 Stepper motor controllers*, SGS Thomson Microelectronics, 1996 [cit. 2010-05-15] Angličtina. Dostupné z WWW:  
<<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/SGSThompsonMicroelectronics/mXryyss.pdf>>.
- [9] *Datasheet krokového motorku PM35L-048*, Minebea, 2010 [cit. 2010-05-15]. Angličtina. Dostupné z WWW:  
<[http://www.eminebea.com/content/html/en/motor\\_list/pm\\_motor/pdf/pm35l048.pdf](http://www.eminebea.com/content/html/en/motor_list/pm_motor/pdf/pm35l048.pdf)>.

## Seznam tabulek

Tab. 1 Funkce jednotlivých vstupů/výstupů L297 .....	45
Tab. 2 Funkce pinů portu P2 .....	45
Tab. 3 Základní mapa pro nastavení výfukové přívěry .....	47

## Seznam obrázků

Obr. 1 Rychlostní profil [4] .....	16
Obr. 2 Výfuk dvoudobého motoru [4].....	18
Obr. 3 Průběh tlaku ve výfuku [4].....	19
Obr. 4 Způsoby určování rezonanční délky výfukového potrubí [4].....	21
Obr. 5 Závislost mezi časováním a jednotlivými délkami částí výfukového potrubí [4].....	23
Obr. 6 Průběh tlaku ve výfukovém otvoru při různých otáčkách [4].....	24
Obr. 7 Průběh kroutícího momentu u dvoudobého motoru [4].....	28
Obr. 8 Princip krokového motorku.....	33
Obr. 9 Momentová charakteristika krokového motorku [9].....	34
Obr. 10 Stejnoseměrný elektromagnet [5] .....	36
Obr. 11 Šroubový převod .....	40
Obr. 12 Vnitřní blokové zapojení dvojitého H-můstku L298 [7].....	43
Obr. 13 Vnitřní blokové zapojení integrovaného obvodu L297 [8].....	44

## Seznam příloh

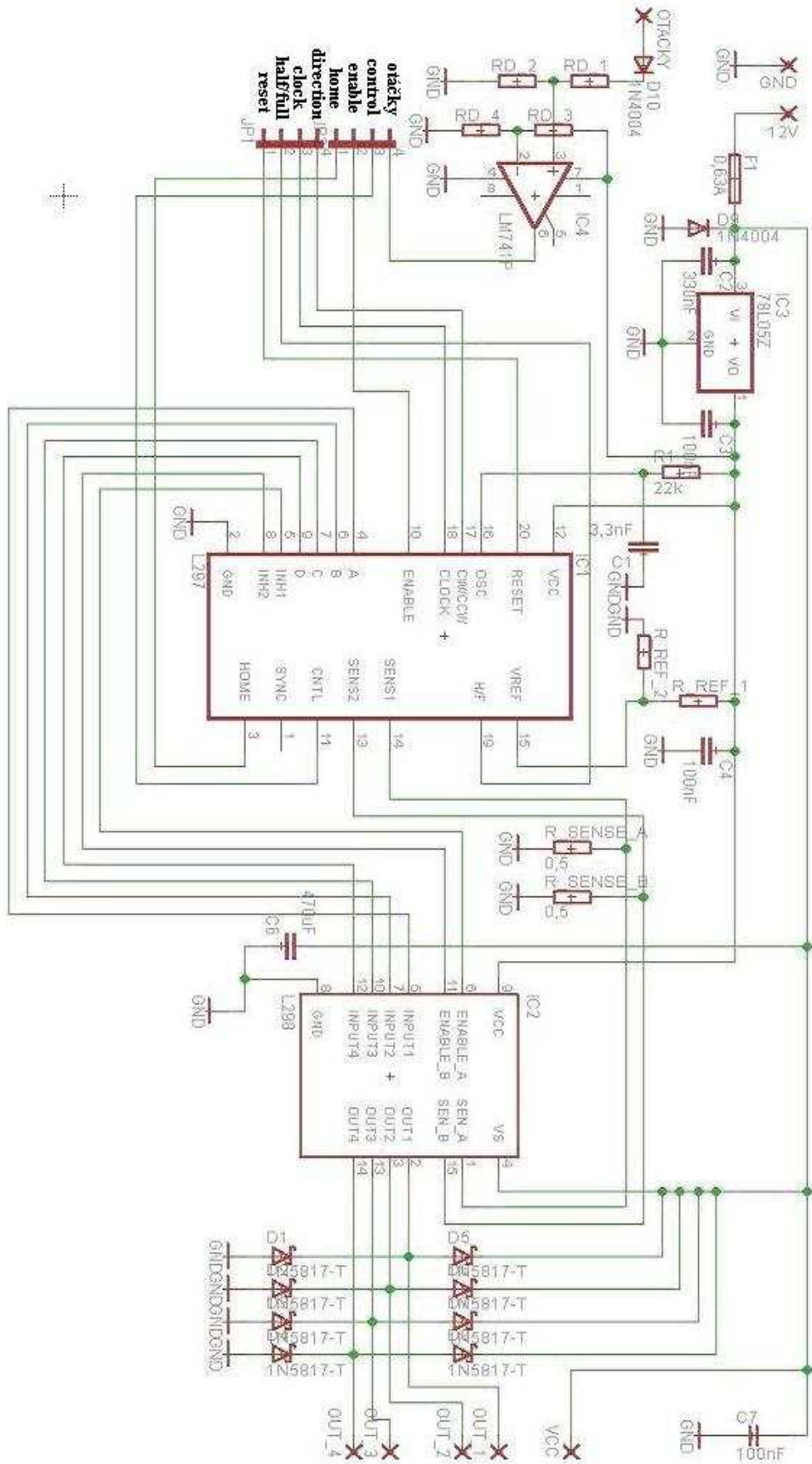
Příloha č. 1 – Schéma zapojení ovládacího panelu .....	54
Příloha č. 2 - Schéma zapojení ovládacího panelu s připojeným mikroprocesorem.....	55
Příloha č. 3 – Návrh plošného spoje pro ovládací panel .....	56
Příloha č. 4 – Praktická realizace elektronicky ovládané výfukové přívěry .....	57

### Na CD:

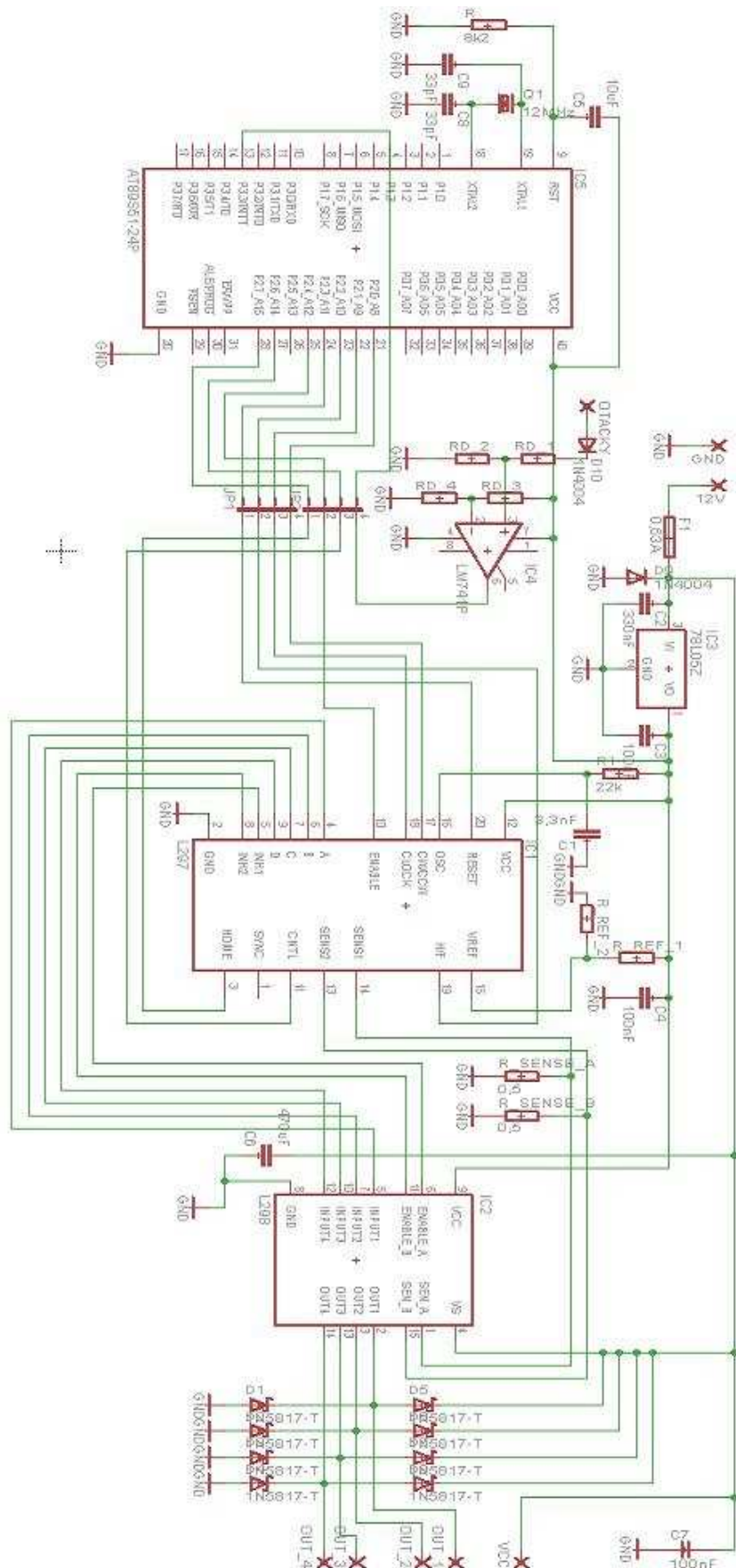
Příloha č. 5 – Program v jazyce Assembler pro mikroprocesor řady x51	
Příloha č. 6 – Schéma zapojení a návrh plošného spoje ovládacího panelu v programu Eagle	
Příloha č. 7 – Bakalářská práce ve formátu PDF.	



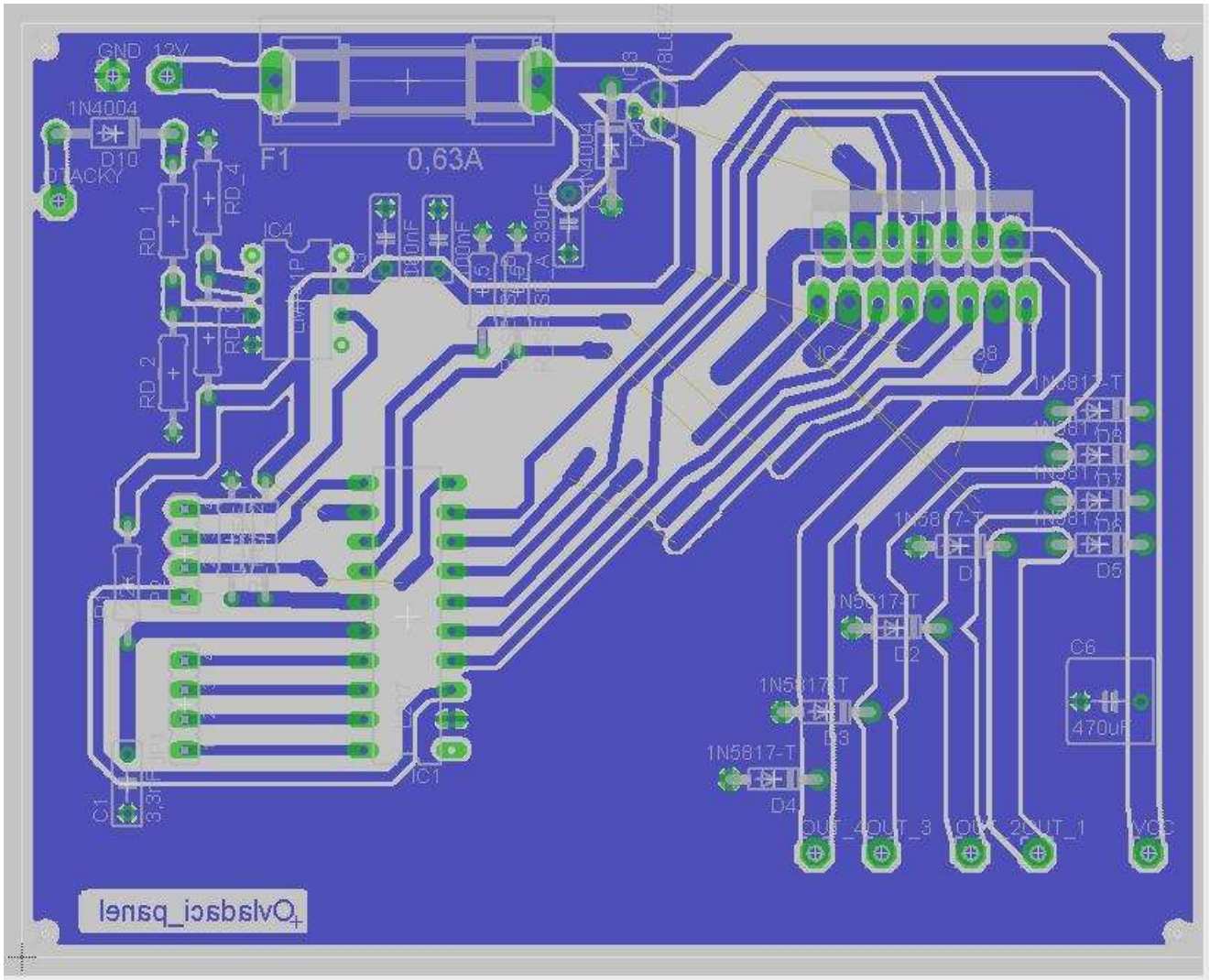
# Příloha č. 1 – Schéma zapojení ovládacího panelu



## Příloha č. 2 - Schéma zapojení ovládacího panelu s připojeným mikroprocesorem



Příloha č. 3 – Návrh plošného spoje pro ovládací panel



**Příloha č. 4 – Praktická realizace elektronicky ovládané výfukové přívěry**

