

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO  
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

## BIOETANOL PRO POHON AUTOMOBILU

BIOETHANOL AND DRIVE OF AUTOMOBILE

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. PAVEL SMETÁK

VEDOUCÍ PRÁCE

doc. Ing. ZDENĚK KAPLAN, CSc.

BRNO 2010



Bc. Pavel Smeták

**Anotace diplomové práce**  
**Bioetanol pro pohon automobilu**

VUT FSI v Brně 2010, Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Náplň své diplomové práce jsem zaměřil na zjišťování vlastností a využitelnosti nově se rodícího paliva pro automobilové využití. Jedná se o bioetanol, který lze vyrábět z obnovitelných zdrojů. Stěžejní částí této práce je vypracovat metodiku experimentálních zkoušek v souvislosti s využitím bioetanolového paliva E85 pro pohon spalovacích motorů vozidel. Cílem je provést zkoušky na motorové zkušebně v podmínkách ÚADI FSI s palivem E85 a BA95 a jednotlivé zkoušky mezi sebou porovnat a vyhodnotit získané výsledky. Další část diplomové práce obsahuje přehled obecného použití bioetanolu v automobilové dopravě.

Bc. Pavel Smeták

**Annotation of master's work**  
**Bioethanol and drive of automobile**

VUT FSI in Brno 2010, Institute of automotive engineering

Content of my diploma thesis focuses on identification of properties and usability of nascent fuel for automotive use. It is a bio-ethanol which can be produced from renewable sources. The heart of this work is to develop methodology of experimental trials in connection with utilization of bio-ethanol E85 as a fuel for vehicle combustion engines. The aim is to perform tests with E85 and BA95 fuels in engine testing room of ÚADI FSI, to compare these trials amongst themselves and to analyze obtained results. Subsequent part of diploma thesis covers overview of general usage of bio-ethanol in road transportation.

**Bibliografická citace VŠKP dle ČSN ISO 690:**

Bc. SMETÁK, P. Bioetanol pro pohon automobilu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 84 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Kaplan, CSc.

### **Prohlášení diplomanta**

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

Souhlasím s tím, že s výsledky mé diplomové práce může být naloženo dle uvážení vedoucího diplomové práce jako jejího spoluautora a doporučení vedoucího institutu. V případě publikace výsledků nebo její významné části budu uveden jako spoluautor.

V Brně .....

.....

podpis diplomanta

### **Poděkování**

Děkuji svému vedoucímu doc. Ing. Zdeňkovi Kaplanovi, CSc. za odborný dohled nad mojí prací, děkuji také Ing. Martinovi Beranovi a Ing. Davidu Svídovi za pomoc při praktickém měření a poskytnutí cenných rad.

# Obsah

<b>Úvod</b> .....	11
Současný stav biopaliv: .....	12
<b>1 Legislativa</b> .....	15
<b>2 Fyzikálně-chemické vlastnosti bioetanolu</b> .....	17
<b>3 Výroba bioetanolu</b> .....	19
<b>4 Bioetanol pro pohon automobilu</b> .....	21
4.2 Přeprava a skladování .....	22
4.3 Vývoj užití alkoholových paliv ve světě a Evropě .....	22
4.3.1 Ve světě: .....	22
4.3.1.1 <i>Brazílie</i> .....	23
4.3.1.2 <i>USA</i> .....	23
4.3.2 V Evropě: .....	24
4.3.2.1 <i>Švédsko</i> .....	24
4.3.2.2 <i>Německo</i> .....	24
4.3.2.3 <i>Francie</i> .....	24
4.4 Vývoj užití alkoholových paliv v České republice .....	25
<b>5 Aplikace v motoru</b> .....	27
5.1 Užití bioetanolu v motorech .....	27
5.1.1 Aplikace ve vznětovém motoru: .....	27
5.1.2 Aplikace v zážehovém motoru: .....	28
5.1.2.1 <i>Zážehové motory na benzín s podílem ETBE a MTBE:</i> .....	28
5.1.3 Dvoupalivové systémy: .....	28
5.2 Dostupnost paliva .....	29
5.3 Dostupnost vozového parku .....	30
5.3.1 Automobily na bioetanol: .....	31
5.3.1.1 <i>Vozy se vznětovým motorem</i> .....	31
5.3.1.2 <i>Vozy se zážehovým motorem</i> .....	32
5.3.2 Světové projekty: .....	33
5.3.2.1 <i>Projekt Lotus „omnivore“</i> .....	33
5.3.2.2 <i>Projekt Lotus „Udržitelnost biopaliv“</i> .....	34
5.4 Vliv paliva na složení spalin .....	35
<b>6 Praktické zkoušky na motorové brzdě</b> .....	37

6.1 Popis pracoviště .....	37
6.2 Příprava stanoviště .....	39
6.2.1 Změna vstřikovacích ventilů motoru .....	39
6.2.2 Přepočítání hodnoty lambda pro zkoušky s palivem E85 .....	40
6.2.3 Předpoklad opakovatelnosti zkoušek .....	40
6.2.4 Přepočítání výkonu a točivého momentu podle normy ISO .....	40
<b>7 Praktické zkoušky s palivem E85 a natural 95 .....</b>	<b>42</b>
7.1 Měření předstihu zážehu směsi v závislosti na výkonu motoru .....	42
7.1.1 Metodika zkoušky .....	42
7.1.2 Postup zkoušky .....	42
7.1.3 Naměřené hodnoty předstihů a výkonů motoru .....	43
7.1.3.1 <i>Tabulka hodnot předstihů a výkonů motoru v celém rozsahu otáček pro BA95</i> .....	43
7.1.3.2 <i>Tabulka hodnot předstihů a výkonů motoru v celém rozsahu otáček pro E85</i> .....	44
7.1.4 Grafické vyhodnocení zkoušky předstihu zážehu .....	44
7.1.4.1 <i>Vyhodnocení průběhu optimálního úhlu zážehu v závislosti na otáčkách</i> .....	44
7.1.4.2 <i>Vyhodnocení průběhu optimálního předstihu v závislosti na výkonu motoru</i> .....	45
7.1.5 Shrnutí výsledků zkoušky .....	45
7.2. Změna výkonnostních parametrů motoru v závislosti na hodnotě lambda $\lambda$ .....	46
7.2.1 metodika zkoušky .....	46
7.2.2 Postup zkoušky .....	47
7.2.3 Naměřené hodnoty výkonnostních parametrů motoru .....	47
7.2.3.1 <i>Tabulky hodnot pro palivo BA95</i> .....	47
7.2.3.2 <i>Tabulky hodnot pro palivo E85</i> .....	48
7.2.4 Grafické vyhodnocení zkoušky změny výkonnostních parametrů motoru v závislosti na hodnotě lambda .....	50
7.2.5 Shrnutí výsledků zkoušky .....	51
7.3 Závislost emisních prvků výfukových plynů na hodnotě lambda .....	52
7.3.1 Metodika zkoušky .....	52
7.3.2 Postup zkoušky .....	52
7.3.3 Naměřené hodnoty zkoušky .....	53
7.3.3.1 <i>Tabulky hodnot pro palivo natural 95</i> .....	53



7.3.3.2	<i>Tabulky hodnot pro palivo E85 s původním nastavením řídicí jednotky pro benzín BA95 z předchozí části zkoušky</i>	54
7.3.3.3	<i>Tabulky hodnot pro palivo E85 s nastavením řídicí jednotky pro toto palivo</i>	55
7.3.4	Grafické vyhodnocení zkoušky závislosti emisních prvků výfukových plynů na hodnotě lambda	56
7.3.4.1	<i>Vyhodnocení hodnot jednotlivých emisních prvků výfukových plynů při otáčkách motoru 2000 min<sup>-1</sup></i>	56
7.3.4.2	<i>Vyhodnocení hodnot jednotlivých emisních prvků výfukových plynů při otáčkách motoru 3000 min<sup>-1</sup></i>	58
7.3.4.3	<i>Vyhodnocení hodnot jednotlivých emisních prvků výfukových plynů při otáčkách motoru 4000 min<sup>-1</sup></i>	60
7.3.5	Shrnutí výsledků zkoušky	62
7.4	Měření emisí výfukových plynů	63
7.4.1	Metodika zkoušky	63
7.4.2	Postup zkoušky	64
7.4.3	Naměřené hodnoty emisních prvků	65
7.4.3.1	<i>Tabulka hodnot pro palivo natural 95</i>	65
7.4.3.2	<i>Tabulka hodnot pro palivo E85</i>	65
7.4.4	Grafické vyhodnocení zkoušky emisí výfukových plynů	66
7.4.4.1	<i>Vyhodnocení jednotlivých složek výfukových plynů BA95 a E85</i>	66
7.4.5	Shrnutí výsledků zkoušky	68
7.5	Vnější otáčková charakteristika	68
7.5.1	Metodika zkoušky	68
7.5.2	Postup zkoušky	69
7.5.3	Naměřené hodnoty ze zkoušky	69
7.5.3.1	<i>Hodnoty zkoušky vnější otáčkové charakteristiky pro palivo BA95</i>	69
7.5.3.2	<i>Hodnoty zkoušky vnější otáčkové charakteristiky pro palivo E85</i>	70
7.5.4	Grafické vyhodnocení zkoušky	70
7.5.4.1	<i>Vyhodnocení průběhu výkonu motoru paliv BA95 a E85</i>	70
7.5.4.2	<i>Vyhodnocení průběhu točivého momentu motoru paliv BA95 a E85</i>	71
7.5.5	Shrnutí výsledků zkoušky	71
7.6	Spotřeba paliva	72
7.6.1	Metodika zkoušky	72

7.6.2	Postup zkoušky .....	72
7.6.3	Výpočet spotřeby .....	73
7.6.4	Získané hodnoty ze zkoušky potřebné pro výpočet spotřeby .....	73
7.6.4.1	<i>Tabulka délky otevření vstřikovacího ventilu a dané spotřeby BA95 .....</i>	<i>73</i>
7.6.4.2	<i>Tabulka délky otevření vstřikovacího ventilu a dané spotřeby E85 .....</i>	<i>74</i>
7.6.5	Grafické vyhodnocení zkoušky .....	74
7.6.5.1	<i>Závislost spotřebovaného paliva na otáčkách motoru .....</i>	<i>74</i>
7.6.6	Shrnutí výsledků zkoušky .....	75
7.7	Indikace tlaku ve válci .....	75
7.7.1	Metodika zkoušky .....	75
7.7.2	Postup zkoušky .....	76
7.7.3	Naměřené hodnoty ze zkoušky .....	76
7.7.3.1	<i>Tabulky tlaků při optimálním předstihu zážehu pro BA95 a E85 .....</i>	<i>76</i>
7.7.4	Grafické vyhodnocení zkoušky .....	77
7.7.4.1	<i>Průběh maximálních tlaků ve válci při použití paliv BA95 a E85 .....</i>	<i>77</i>
7.7.4.2	<i>Průběh tlaku ve válci v závislosti na pootočení klikového hřídele pro obě paliva při otáčkách motoru 3000 min<sup>-1</sup> .....</i>	<i>77</i>
7.7.5	Shrnutí výsledků zkoušky .....	78
<b>8</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>79</b>
8.1	Vyhodnocení užití bioetanolu jako paliva pro automobily .....	79
8.2	Porovnání E85 s benzínem .....	80
	<b>Seznam použitých zdrojů .....</b>	<b>83</b>
	<b>Seznam použitých zkratk a symbolů .....</b>	<b>84</b>

## Úvod

Od doby, kdy lidstvo začalo využívat fosilní zdroje energie (ropa, zemní plyn, uhlí), se začali markantně projevovat důsledky stále se zvyšující spotřeby fosilních paliv, v upadající životní prostředí a v globální změně klimatu. Hlavně v důsledku zvýšení obsahu CO<sub>2</sub> v atmosféře. Řešením těchto závažných problémů, je v hledání alternativ v obnovitelných zdrojích energie. To znamená zdroje, které vznikají v pravidelných cyklech, například biomasa, nebo ve sluneční, větrné, či vodní energii.

Ve světové produkci skleníkových plynů, je na prvním místě energetický průmysl a na druhém místě silniční doprava. V České republice zaujímá automobilová doprava třetí místo v produkci CO<sub>2</sub>. To představuje milióny tun CO<sub>2</sub> vypuštěného do ovzduší každým rokem. Proto je důležité se na tento zdroj skleníkových plynů blíže zaměřit.

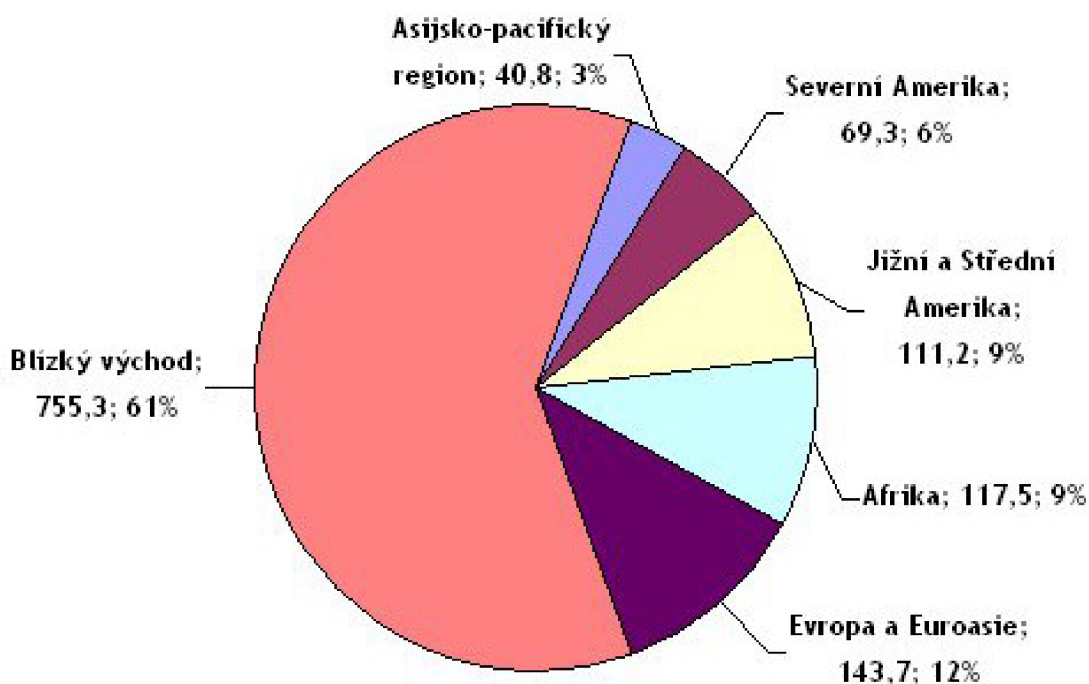
Jedním z alternativních zdrojů energie, které umožňují výrobu kapalných paliv pro spalovací motory, jsou alkoholy a rostlinné oleje získané z biomasy, označované jako biopaliva. Biomasa je zdroj stále se obnovující energie a mezi ostatními zdroji pro výrobu alternativních paliv, představuje jedinečný zdroj akumulované sluneční energie.

Se zpřísnujícími normami, stanovující maximální produkci emisí výfukových plynů automobilů, se postupně výrobci dostávají k problému, který za nějaký čas již nebude možné řešit konstrukčními vymoženostmi spalovacích motorů. Jde o limitující vlastnosti stávajících fosilních paliv. I přes sebelepší technologii, za čas dospějeme k bodu, kdy samotná nedokonalost hoření paliva, bude způsobovat vysokou produkci škodlivin, v rozporu s budoucími normami. I pro tento fakt je již v dnešní době důležité zkoumat jiná paliva, jejich mísení a hoření nepředstavuje tak závažný problém, se kterým se setkáváme v této chvíli u fosilních paliv.

Další stinnou stránkou konvenčních paliv je jejich výroba. Prognózy o zásobách ropy se liší, ale je jasné, že dříve, či později dojit musí. Proto již nyní je pro stát důležité, aby se ubíral politikou postupného nahrazování fosilních paliv, palivy z obnovitelných zdrojů a tím se stával čím dál více nezávislým na dodávkách ropy, což stabilizuje celkové hospodářství státu. Nehledě na to, že zdroje pro výrobu biopaliv jsou pěstovány na území daného státu, což přispívá k většímu využívání hospodářské půdy a podpoře zemědělství.

### Současný stav biopaliv:

Automobil je jedním z nejvýznamnějších vynálezů lidstva. Vzhledem k celosvětovým zásobám ropy **Obr. 1**, které jsou omezené a neobnovitelné a problémům spojených s provozem automobilu, kterými jsou především ovlivňování životního prostředí, začali lidé zhruba od druhé poloviny dvacátého století hledat alternativy, které by nahradily dosavadní paliva (automobilový benzín a motorová nafta). Hlavním cílem je nalézt energii, která by neškodila životnímu prostředí a hlavně, která by i v budoucnu zajistila, že automobilová doprava nevymizí.



Obr. 1 Současný světový stav zásob ropy v miliardách barelů [1]

Biopalivo je klasifikováno jako kapalná nebo plynná pohonná hmota pro dopravu vyráběná z obnovitelných zdrojů rostlinného nebo živočišného původu v čisté formě, to je ve stoprocentní koncentraci. Pokud je biopalivo používáno jako přídavek do benzínu nebo naftě, je označováno za biosložku nebo také za biokomponentu. Je zřejmé, že se zvyšující se dopravou, využívající v převážné míře paliva vyráběná z ropy, není do budoucna udržitelné, vzhledem k množství CO<sub>2</sub>, vypouštěné do ovzduší **Tab. 1** a prognózám o ropných zásobách.

Rok	1990	1997	2009	2020
Emise CO <sub>2</sub> [mld. t]	20,8	22,5	29,6	36,1

Tab. 1 Vývoj emisí CO<sub>2</sub> podle prognózy Mezinárodní energetické agentury IEA [2]

Od roku 1973, kdy proběhla první ropná krize, je biomasa považována za alternativní zdroj energie. Jejím využívání bylo v té době věnováno pouze velmi málo pozornosti. Avšak potenciál biopaliv byl již známý. Za biopaliva jsou považována paliva uvedená v tabulce **Tab.2**. Do pozadí ustoupilo používání dřevoplynu a bioplynu, které bylo populární hlavně v období 2. světové války. V současnosti ani provoz automobilu na MEŘO nebo rostlinný olej není nějak rozšířeno, protože zanikla dotace ze strany státu a tím se tyto paliva staly nezajímavými a cenově znevýhodněnými pro dnešního uživatele automobilu. Nejdůležitějšími palivy vyráběnými v této době z biomasy jsou metanol a etanol.

Plyny	Kapaliny		
	Alkoholy	Ethery	Jiné
Bioplyn	Metanol	MTBE	MEŘO
Dřevoplyn	Etanol	ETBE	Rostlinné oleje
Biovodík	Isopropanol	TAME	
	Butanol	TAAE	
		DEE	
		DME	

Tab. 2 Souhrn používaných biopaliv

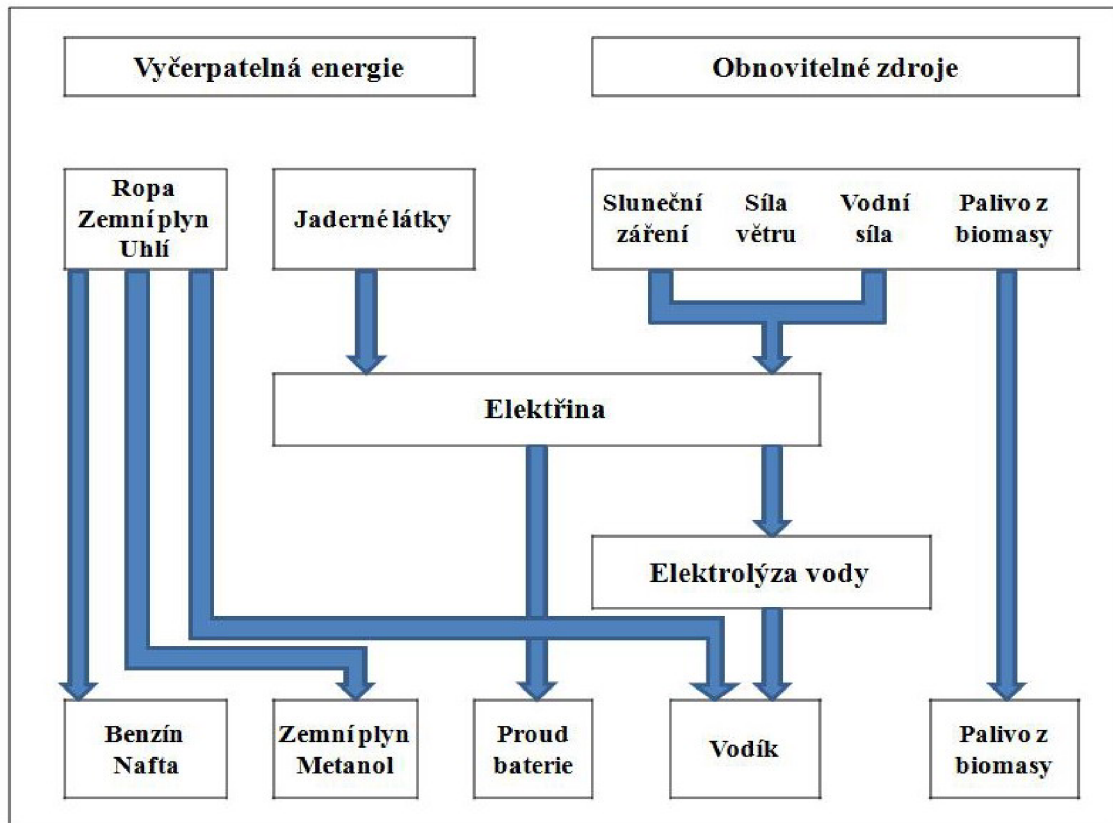
V současnosti je nejrozšířenějším alternativním palivem v České republice propan-butan (LPG = Liquefied Petroleum Gas), na druhém místě jsou biopaliva, používána jako nízkoprocentní i jako vysokoprocentní příměs do fosilních paliv a na třetím místě je stlačený zemní plyn (CNG = Compressed Natural Gas), ale CNG, stejně jako LPG nelze považovat za biopalivo.

Pro zavedení biopaliv v České republice jsou rozhodující tyto důvody:

1. Výrazné snížení škodlivých látek ve výfukových plynech
2. Biopaliva jsou obnovitelným zdrojem energie
3. Používání biopaliv snižuje závislost na dodávkách ropy, která je dovážena především ze zahraničí a její cena je neustále kolísavá
4. Výroba biopaliv přináší další možnosti využití zemědělské půdy

Alternativní paliva se oproti těm konvenčním odlišují právě výrobou, respektive surovinou, ze které jsou vyráběna. Takovýto model je znázorněn na **Obr. 2**. Základním charakteristickým rozdělením a zároveň hlavním znakem rozdělovací paliva na alternativní a konvenční, je zdroj suroviny pro výrobu. Vyčerpatelný zdroj a obnovitelný zdroj.

V současné době je zřejmé, že biopaliva nemohou úplně nahradit fosilní pohonné hmoty, ale při jejich rozumné výrobě a použití, mohou částečně nahradit stávající paliva a pomoci odlehčit životnímu prostředí, hlavně ve městech.



Obr. 2 Druhy energie pro pohon automobilu [4]

## 1 Legislativa

Na základě Akčního plánu Evropské komise by měla být ve státech Evropské unie paliva vyráběná z ropy postupně nahrazována částečně biopalivy, zemním plynem a vodíkem tak, jak je uvedeno v tabulce **Tab. 3**.

Rok	Bopaliva [%]	CNG [%]	Vodík [%]	Celkem [%]
2005	2	0	0	2
2010	6	2	0	8
2015	7	5	2	14
2020	8	10	5	23

Tab. 3. Vývoj alternativních paliv do roku 2020 v EU [3]

Podle „Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2003/30/EC z roku 2003 o podpoře používání biopaliv nebo jiných obnovitelných paliv v dopravě“ má ke konci roku 2010 energetický podíl biopaliv pro dopravu v každém z členských států Evropské unie činit 5,75% z energie dodané pro dopravu v benzínech a v naftách. Obsahem směrnice je definice biopaliv pro dopravu a určení referenčních hodnot náhrady benzínu a motorové nafty k termínu 31.12.2005 a 31.12.2010 jako doporučení pro členské státy ke stanovení jejich národních indikativních cílů užití biopaliv. Referenční hodnota vypočítaná na základě energetického obsahu komponent pohonných hmot je stanovena takto:

Datum	Náhrada fosilních paliv biopalivy
do 31.12. 2005	2,00%
do 31.12. 2006	2,75%
do 31.12. 2007	3,50%
do 31.12. 2008	4,25%
do 31.12. 2009	5,00%
do 31.12. 2010	5,75%

Tab. 4 Rozpis povinného podílu biopaliv v celkovém množství prodaných kapalných motorových paliv v zemích EU [5]

Program České republiky pro podporu biolihu je plně v souladu se záměry Evropské komise v oblasti zemědělské politiky a rozvoje venkova, dopravní politiky, regionální politiky, politiky životního prostředí, energetické politiky, dále respektuje politiku zdanění energetických produktů a pravidla poskytování státní pomoci. Jeho rámec vytváří i Nařízení Evropské Komise 670/2003 ze dne 8.4.2003 stanovující specifická opatření týkající se trhu s etanolem zemědělského původu a Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2003/96/ES ze dne 27.10.2003 o zdanění energetických

produktů. Součástí Programu byl i úkol - stanovit zákonnou povinnost pro výrobce, dovozce a distributory, aby sortiment motorových benzínů a motorové nafty dodávaných na trh obsahoval minimální množství biopaliva nebo jiného paliva z obnovitelných zdrojů stanovené zvláštním právním předpisem. Tuto povinnost ukládá ustanovení § 3, odst. 10 zákona č. 92/2004 Sb., kterým se mění zákon č. 86/2002 Sb. o ochraně ovzduší a o změně některých dalších zákonů (zákon o ochraně ovzduší), ve znění zákona č. 521/2002 Sb. V současné době se k němu připravuje prováděcí předpis formou nařízení vlády. [6]

Za biopaliva na bázi bioetanolu jsou v současné době v ČR podle vyhlášky ministerstva průmyslu a obchodu č. 229/2004 Sb. považovány složky benzínů, jednak bioetanol, bio-ETBE a bionafta - metylestery mastných kyselin vyrobené z rostlinného nebo živočišného oleje. Výchozími surovinami vhodnými k výrobě bioetanolu v ČR je obilí, případně i cukrová řepa.

Norma	Rok vydání	CO [g/km]	HC [g/km]	HC+NOx [g/km]	NOx [g/km]	PM [g/km]
<b>Diesel</b>						
EURO1	1992	2,72	0	0,97	0	0,14
EURO2	1996	1,00	0	0,7	0	0,08
EURO3	2000	0,64	0	0,56	0,5	0,05
EURO4	2005	0,5	0	0,30	0,25	0,025
EURO5	2010	0,5	0	0,23	0,18	0,005
EURO6*	2014	0,5	0	0,17	0,08	0,005
<b>Benzín</b>						
EURO1	1992	2,72	0	0,97	0	0
EURO2	1996	2,2	0	0,5	0	0
EURO3	2000	2,3	0,2	0	0,185	0
EURO4	2005	1,0	0,1	0	0,08	0
EURO5	2010	1,0	0,1	0	0,06	0
EURO6*	2014	1,0	0,1	0	0,06	0

Tab. 5 Hodnoty norem EURO pro osobní a lehké dodávky platná v Evropě. [6]

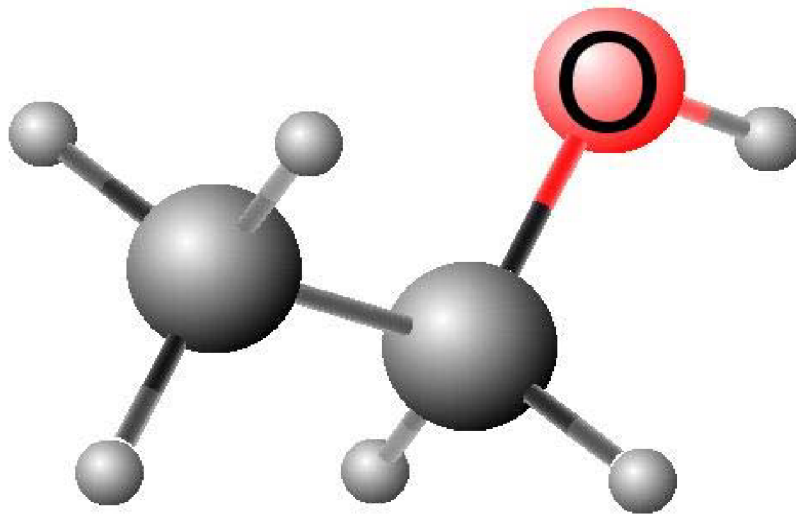
\* tato norma je pouze ve fázi návrhu



## 2 Fyzikálně-chemické vlastnosti bioetanolu

Etanol, jako palivo, je řazený mezi produkty vyrobené z obnovitelných zdrojů, často je označován přízviskem biopalivo. Vyrábí se alkoholovým kvašením z biomasy, především z rostlin, které obsahují škrob a sacharidy. Významnou měrou se při spalování v pístových motorech vyznačuje nižší produkcí škodlivin  $\text{CO}_2$ , než která je udávána u spalování klasického benzínu. Před tím, než je etanol použit jako palivo ve spalovacích motorech, musí projít složitými procedurami celé výroby a následnými úpravami, jako je například zbavení vody. Čistý etanol se příliš jako palivo nepoužívá, spíše se využívá jako příměs, více procentní nebo méně procentní, do fosilních paliv, kde se využívá jeho kvalita jako aditiva. Etanol je tedy látka na bázi čistě rostlinného původu, proto není třeba obávat se při úniku do půdy ekologických následků, protože vlivem organismů se rozloží a nezanechá žádné následky.

Etanol je dnes běžně využíván jako náhrada automobilového benzínu, přičemž je považován za jedno z nejstarších automobilových paliv. Etanol je však využíván i na jiné účely. Velmi důležité uplatnění má i v potravinářském průmyslu. Právě tato všestrannost je jeho velkou výhodou.



Obr. 3 Molekula etanolu [7]

Etanol, také označován jako bioetanol, etylalkohol, či jen jako líh (funkční vzorec -  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ , sumární vzorec -  $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ ) je primárně alkohol obsahující 52,14 % uhlíku, 13,13 % vodíku a 34,73 % kyslíku. Z alkoholů je druhý nejnižší. Je to čirá kapalina, výrazného alkoholového zápachu. 100% výrobek je znám jako absolutní alkohol, obsahující 95,57% etanolu a 4,43 vody. Bod varu je  $78,3^\circ\text{C}$  při tlaku 1013 hPa, hustotu má  $789 \text{ kg/m}^3$ . Kvalita a vlastnosti vyrobeného etanolu jsou velmi závislé na vstupní surovině, ze které se vyrábí. Je rozpustný ve vodě ve všech podílech. Je to čistě přírodní látka, která se při úniku rozloží působením bakterií a nezpůsobí žádnou ekologickou havárii. Etanol má vyšší oktanové číslo než běžný benzín, kolem 105. Čistý etanol také narušuje některé pryže a plasty, ale pokud je maximálně 30% etanolu

obsaženo v benzínu, k žádné nežádoucí reakci nedochází. Směs obsahující aspoň 10 % etanolu je známá jako „gazohol“.

Etanol vyrobený kvasným procesem, musí splňovat podmínky stanovené v normě ČSN 65 6511, aby mohl být použit jako automobilové palivo. Základní vlastnosti etylalkoholových paliv jsou v tabulce **Tab. 6**.

Druh paliva	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	Výhřevnost [MJ/kg]	Bod varu [°C]	Výparné teplo [kJ/kg]	Oktanové číslo
Etanol	789	26,9	78,3	856	106
Metanol	791	18,8	64,5	1090	105
ETBE	745	36,4	73,1	920	118
MTBE	740	34,9	55,3	1130	117
E85	783	29,66	81,4	545	104
Benzín BA95	750	45,3	99,2	315	95

Tab. 6 Porovnání vlastností etanolu, metanolu a benzínu [8]

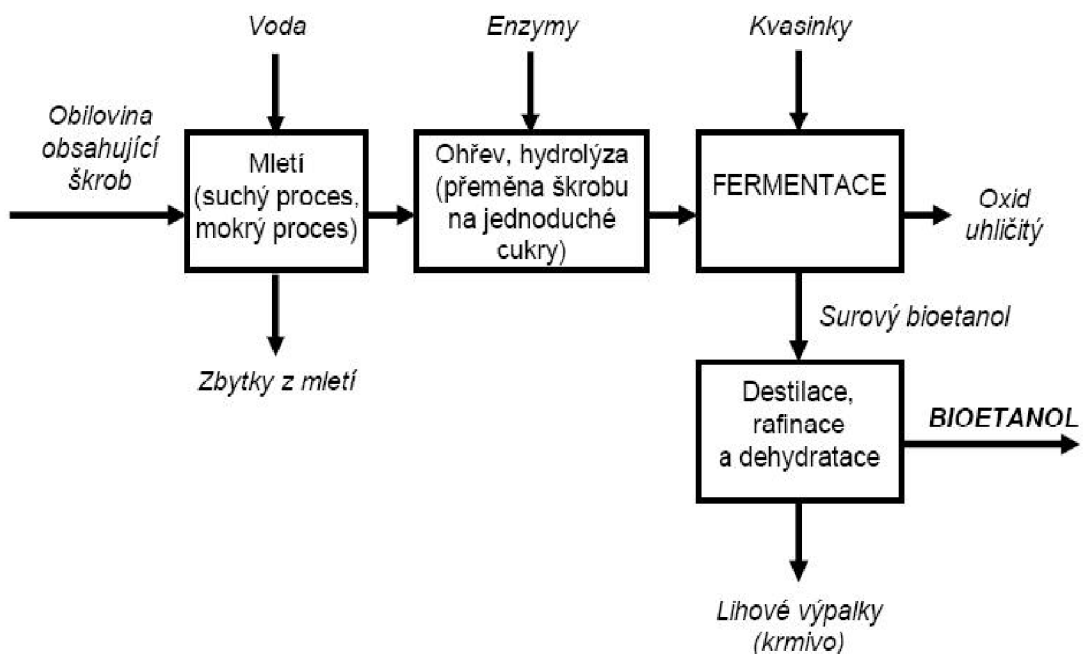
Z hlediska práce s tímto palivem je etanol mnohem bezpečnější než motorový benzín, či nafta. Při úniku do půdy, nebo vodních zdrojů se díky působením bakterií rozloží a neškodné látky. K vyloučení záměny s potravinářským lihem, musí být do palivového etanolu přidána látka se specifickou vůní a chutí. Naproti tomu metanol je vysoce toxická látka a již malé množství může způsobit oslepnutí, či smrt. Manipulace s touto látkou podléhá přísným předpisům. Vzhledem k jeho toxicitě, může jeho únik do půdy, nebo vodních zdrojů způsobit velké ekologické problémy. Z hlediska hořlavosti je etanol i metanol klasifikován stejně jako benzín hořlavina 1. třídy. Alkoholy mají nízkou zápalnou teplotu, hoří slabě svítivým plamenem a jejich hašení je mnohem jednodušší než hašení benzínu, či nafty.

### 3 Výroba bioetanolu

Nejvýznamnějšími zástupci vhodnými pro spalování v pístových spalovacích motorech jsou metanol, etanol a isopropanol. Zatímco metanol je spíše vyráběn ze zemního plynu, pro jednoduchost výroby a nižší finanční náročnost (výrobu lze také provádět z biomasy suchou destilací dřeva), etanol je produkován pouze ze zemědělských plodin, kvašením surovin obsahující cukr, celulózu nebo škrob.

Usnesením vlády České republiky č. 825 ze dne 1. září 2004 byla pro období do 31. května 2013 stanovena minimální kvóta výroby bioetanolu určeného výhradně pro palivové účely v dopravě na trhu v režimu zákona 353/2003 Sb., o spotřebních daních, ve výši 2 mil. hektolitru ročně.[6]

Při kvasném způsobu výroby bioetanolu se využívá řady zemědělských plodin, jako je cukrovinková třtina nebo cukrová řepka, lze ho však také vyrábět z pšenice, kukuřice, obilí nebo brambor. Z jedné tuny obilí s 65% hm. škrobu lze vyrobit 400 litrů bezvodého etanolu a 340 kg suchých výpalků. Na jednom hektaru se vypěstuje zhruba 6 tun obilí. Z hektaru osetým cukrovou řepou, lze vyprodukovat až 5000 litrů etanolu, kdy jeden hektar představuje 48 500 kg cukrové řepy s obsahem cukru 16%. Blokové schéma výroby bioetanolu z obilovin kvašením je znázorněno na obrázku **Obr. 4**.



Obr. 4 Blokové schéma výroby bioetanolu z obilovin [9]

Bilance výroby etanolu přepočítaná na kilogram výstupní suroviny, vychází v případě obilí zhruba na 2,5 kilogramu obilí, z něhož se vyrobí jeden litr etanolu. U cukrové řepy je tento poměr o něco méně příznivý, jedná se o zhruba 9,7 kilogramu vstupní suroviny, ze které se vyrobí jeden litr etanolu.

Při výrobě bioetanolu pomocí kvašení je důležité vytvoření cukernatých (zcukřených) roztoků, jejich zkvašení pomocí přidání kvasinek a následnou destilací.

Zásadní pro výrobu etanolu je pěstování zemědělských plodin. Pokud by někdy v budoucnu měla nastat doba, kdy se bioetanol stane palivem plošně užívaným na celém světě jako výhradní pohonná hmota, vznikne neřešitelný problém. Veškerá obdělávaná půda by ani zdaleka nestačila k pěstování potřebného množství rostlin, pro jeho výrobu. S tím je spojený další problém, lidstvo by tím přišlo o půdu zemědělsky využívanou k pěstování plodin pro výrobu potravin.

Již dnešní zabírání orné půdy pro pěstování lukrativnější biomasy k palivovému zpracování, vytlačuje pěstování potravinářských plodin, které se stávají pro zemědělce méně výhodné. Aby zemědělci nekonvertovali k plodinám využívané v automobilním průmyslu, je nutné zvýšit výdělečnosti potravinářského pěstování, což bohužel sebou nese zvýšení cen potravin a snížení životní úrovně obyvatel. Výhodou výroby bioetanolu je však veliká rozmanitost možných surovin použitelných ke zpracování. Dá se využívat odpadních produktů zemědělské výroby, dřevní biomasy, nebo celulózy, avšak výroba z některých těchto zdrojů má nízký výtěžek.

## 4 Bioetanol pro pohon automobilu

### 4.1 Bioetanol jako palivo v dopravě

Lihová paliva byla v motorismu používána již v jeho začátcích. Velmi často byly náhradou pro běžná fosilní paliva v době válek, či ekonomických krizích minulého století. V současné době nabývají biopaliva význam zvláště z hlediska ekologie.

Celosvětový růst spotřeby konvenčních paliv spojený s postupným vyčerpáváním fosilních zdrojů a stále se zvyšujícím množstvím skleníkových plynů v ovzduší, nutí lidstvo ke krokům vedoucí k záchraně našeho klimatu a života na Zeměkouli. Omezení vlivu skleníkového efektu a zabránění nevratným klimatickým změnám, je možné pouze za předpokladu velkých energetických úspor a zavedení využívání obnovitelných energetických zdrojů. Prioritou Evropského společenství, k jehož politice se přidává postupně celý svět, je globální snížení tvorby skleníkových plynů o 20% do roku 2020. Na tvorbě těchto plynů má svůj podíl i automobilová doprava. Silniční doprava se v České Republice podílí zhruba 10% tvorby CO<sub>2</sub>, 38% N<sub>2</sub>O a necelým 1% CH<sub>4</sub>. Velký tlak je vyvíjen na výrobce automobilů, kteří jsou nuceni vyrábět vozidla s nižší produkcí škodlivin ve výfukových plynech.

Jednou z cest za honbou po snížení škodlivých látek ve výfukových plynech, kterou se lze v dnešní době ubírat, je používání paliv vyráběných z biomasy. Tyto paliva jsou nejen z obnovitelných zdrojů, například ze zemědělských plodin, ale především po jejich spálení vzniká výrazně nižší množství škodlivin, než je tomu doposud u fosilních paliv.

V České republice se pro výrobu etanolu využívá nejvíce cukrové řepy a pšenice. Jeho hlavní uplatnění v automobilismu je dvěma způsoby. Za prvé jako aditivum v podobě MTBE (**M**etyl **T**erc. **B**utyl **É**ter), či méně zdraví škodlivý ETBE (**E**tyl **T**erc. **B**utyl **É**ter). ETBE i MTBE jsou takzvané kyslíkaté složky, které lze přidávat do automobilového benzínu jako aditivum, namísto velmi nebezpečných toxických složek, jako je benzen, touen nebo xylen, přidávaných do benzínu v dnešní době. Oba étery se mohou vyrábět následným zpracováním etanolu. MTBE se v České republice prakticky nepoužívá, protože je velmi toxický a lidskému zdraví nebezpečný. Obě lihové složky mají vysoké oktanové číslo, až 118. S benzinem jsou neomezeně mísitelné, avšak jejich výroba je nákladná.

Druhou možností je výroba dehydratovaného etanolu, takzvaného bioetanolu, který může obsahovat maximálně 0,3% vody. Do motorového benzínu se přidává pouze jako jeho náhrada a to v množství 0 až 85%obj. Čím více je v benzínu etanolu, tím se zvyšuje odolnost proti detonačnímu hoření, což je u benzínových směsí velkou výhodou. Naproti tomu ve směsi s motorovou naftou je spíše třeba, aby se palivo co nejlépeji samovolně vznítilo po dosažení určité teploty vznícení. Tuto odolnost stanovuje cetanové číslo, čím je vyšší, tím ochotněji se palivo samo vzněcuje. U běžné nafty je cetanové číslo 50, avšak u etanolu, či metanolu je kolem 8. Bioetanol se do nafty přidává pouze v malém množství, podle normy 5%obj., aby nedocházelo k výrazným změnám vlastností nafty. Ale je možné etanol pomocí aditiv zvyšující cetanové číslo, mazací vlastnosti a jiné další vlastnosti, přizpůsobit požadavkům vznětových motorů tak, aby bioetanol měl stejné kvality jako motorová nafta. Takto

přizpůsobené palivo se označuje E95. Jedná se o směs 95% bioetanolu a 5% aditivních složek.

Přídavek bioetanolu přímo nebo jako ETBE může být obsažen v BA95 nebo BA98, u BA91 jen velmi výjimečně. V zahraničí se do benzínu přidává převážně ETBE v malých množstvích, v ČR naopak pouze bioetanol jako málo procentní, ale i vysoko procentní příměs.

Avšak natankovat nemůže každý. Automobil bez žádné úpravy na motoru a palivovém ústrojí je schopný spalovat maximálně 22% bioetanolu v benzínu, aniž by došlo k jeho poškození. Bez omezení lze bioetanol tankovat do aut s označením FFV (Fuel Flexible Vehicles). S tímto označením se řidič nemusí bát natankovat palivovou směs od 0 do 85% etanolu podle potřeby a dostupnosti. Automobil má upravené palivové ústrojí tak, aby nedocházelo ke korozi a dimenzované prvky palivového ústrojí tvořící směs, aby množství paliva dodaného do motoru bylo řádově o 1,5 násobek vyšší, než je tomu u benzínu. Pomocí čidla v nádrži, nebo čidla klepání, řídicí jednotka rozpozná složení paliva a podle množství bioetanolu zvolí optimální nastavení parametrů chodu motoru. Pro využití paliva E95 ve vznětových motorech k tomu přizpůsobených, je třeba znát minimální požadavky na kvalitu bioetanolu. Přidáním vhodných přísad a zvolením odlišné konstrukce, je pak takový motor schopen palivo spalovat. Prozatím je vývoj v těchto motorech velmi pomalý a spíše zaměřený na velké nákladní automobily a autobusy.

## 4.2 Přeprava a skladování

Přeprava a skladování pohonných hmot s přídavkem biopaliv, sebou nese složité technické problémy, které vyplývají z rozdílného charakteru biosložek a fosilních paliv. Problémy se projevují při dlouhodobém skladování změnou některých jakostních ukazatelů, změna tlaku par u benzínu, stabilita směsí benzínu, lihu a vody, tvorba zákalu, tvorba pryskyřic a další. Voda, kterou etanol při skladování do sebe vstřebává ze vzdušné vlhkosti, způsobí separaci frakcí benzínu a degradaci paliva, jedná se však o jev vyvolaný dlouhodobým skladováním. Z uváděných směsí je bez problémů pouze benzín s obsahem bio-ETBE do maximálního množství 15%obj. Technickým řešením k odstranění problémů je přidávat biopaliva do fosilních paliv těsně před použitím těchto směsí jako motorového paliva. Tato technologie je převážně používána v Polsku, kde je bioetanol mísen s benzínem až při tankování do nádrže automobilu u čerpací stanice, anebo vhodnou aditivací, což však sebou nese zvýšené náklady.

## 4.3 Vývoj užití alkoholových paliv ve světě a Evropě

### 4.3.1 Ve světě:

USA se po vzoru Brazílie začaly ke konci osmdesátých let rozvíjet nejrychleji z celého světa a produkce, i spotřeba v zemích Severní a Jižní Ameriky rostla nejrychleji. Zbytek světa nebyl v začátcích až tak rychlý. Trh s bioetanolem se z počátku rozvíjel velmi pomalu a jako palivo teprve etanol hledal své místo. Až v posledních letech konce dvacátého století, kdy státy celého světa začali přecházet na

politiku zaměřenou na ekologii, začala se výroba, distribuce a spotřeba bioetanolu rapidně zvedat. V dnešní době se ve většině států vyrábí nadbytek bioetanolu, což vede k snižování jeho ceny a stále vyšší konkurenceschopnosti vůči fosilním palivům. Každým rokem se čísla o celosvětové výrobě zvedají.

#### 4.3.1.1 Brazílie

V Brazílii je palivové využití etanolu naprosto nejrozšířenější. Traduje se od dvacátých let minulého století a za tu dobu se rozvinulo natolik, že Brazílie snížila dodávky ropy až o 50%. Stát inicializoval přidávání nedehydratovaného etanolu do benzínu a podpořil i výrobu upravených motorů, schopných toto stoprocentní palivo spalovat. Od 60. let však roste obliba ve směsi 22% bezvodého etanolu se 78% benzínu. Tento poměr je bez problému spalitelný i v klasické koncepci zážehového motoru.

V roce 1975, Brazílie zahájila program na podporu zemědělství a využití zemědělských přebytků, tím se zpracování zemědělských plodin zaměřilo převážně na výrobu denaturalizovaného lihu. Od roku 1983 až do roku 1988 prosazovala využití bioetanolu jako paliva tehdejší vojenská vláda. V tomto období až 88% aut prodaných na území Brazílie bylo poháněno směsí bioetanolu a benzínu. Po roce 1988 však vládní dotace farmářům ustaly a proto se zpracování cukrové třtiny vrátilo zpět k lukrativnější výrobě cukru. Hlavní a jedinou surovinou pro výrobu biopaliva je cukrová třtina, která má ze všech plodin nejvyšší obsah sacharidů.

V současné době jezdí po Brazílských silnicích až 62% automobilů, jejichž palivem je buď směs benzínu a bioetanolu, nebo čistý etanol (E100).

Používaná paliva v Brazílii:

- alkoholová (95 % vodného etanolu + 5 % autobenzínu),
- směsné benzinové palivo (22 % bezvodého etanolu + 78 % autobenzínu),
- směs "MEG" (33 % metanolu, 60 % etanolu, 7 % autobenzínu).

Až v roce 1994 se brazilská vláda vrátila k podpoře farmářů a zdanila vývoz cukru 10%, aby zvýhodnila jeho zpracování na etanol uvnitř státu a dala impuls k rozšíření výroby motorových paliv s etanolem.

Rok:	1975	1980	1985	1990	1993	2004	2007	2010	2012
Výroba etanolu [mld. l]	0,58	3,68	11,20	11,28	12,50	16,0	17,8	20,5	28,7

Tab. 7 Produkce etanolu v Brazílii od roku 1975 až do roku 2012 [18]

#### 4.3.1.2 USA

V USA bylo využívání etanolu z počátku minulého století také pomalé, etanol byl především doceňován na závodní dráze. Až od roku 1979 se bioetanol začal velmi hojně rozšiřovat a začal být aplikován jako vysokooktanové palivo pro osobní automobily. Od roku 2004 je výroba kvasného lihu zhruba totožná s produkcí v Brazílii.

Spojené státy americké zastávají politiku plošného prodeje tzv. paliva E10, která obsahuje 10% bioetanolu a 90% motorového benzínu. Už jen 10% etanolu přidávat do

celkového množství benzínu spotřebovaného za rok v USA je obrovské množství, proto se počítá s produkcí 7,5 miliardy galonů za rok až do roku 2012 (galon = 3,785 litru), avšak roční spotřeba benzínu je 150 miliard galonů za rok. Amerika se potýká s nedostatkem zemědělské půdy, na které by se dalo vypěstovat dostatečné množství plodin pro výrobu biolihu.

V Brazílii se bioetanol používá spíše jako náhrada za motorový benzín, ve Spojených státech je bioetanol přidáván do benzínu jen jako aditivum.

#### **4.3.2 V Evropě:**

V celé Evropě byla situace podobná. Používání biopaliv se začalo po první světové válce a vývoj kopírovaly zhruba všechny státy celé Evropy. Rozdíly byly pouze v množství biosložek přidávaných do fosilních paliv, zejména motorového benzínu.

##### *4.3.2.1 Švédsko*

Ve Švédsku používání biopaliv není povinné, ale díky dokonale příznivé situaci, kterou pro výrobce, prodejce a motoristy stát vytvořil, se Švédsko honosí primátem v počtu čerpacích stanic, prodaných aut a spotřebovaného množství paliv s příměsí bioetanolu v celé Evropě. V dnešní době je z celkového počtu čerpacích stanic 60% těch, která s dalšími pohonnými hmotami prodávají i paliva E85 pro zážehové motory a E95 pro vznětové motory.

Obě paliva jsou zproštěna od spotřební daně, a protože provoz na tyto paliva je výrazně ekologičtější, mají vozidla s označením FFV bezplatný vjezd do center velkoměst jako je Stockholm, Göteborg nebo Malmö. Daňová politika v tomto směru je rozsáhlá a jímá jak clo na dovoz E85 a E95, ale i dotace na koupi nového vozu FFV i na výstavbu nových čerpacích stanic, nižší silniční daň, nižší sazby pojistného a mnoho dalších. Švédsko je první zemí z EU, která dosáhla 5% hranice náhrady fosilních paliv obnovitelnými zdroji.

##### *4.3.2.2 Německo*

Před druhou světovou válkou se vyráběla především směs zvaná Reichskraftstoff, která byla složená z 50% etanolu, 30% benzenu, či benzínu a 20% acetonu. Za druhé světové války se Německo potýkalo s velkým nedostatkem pohonných hmot, proto se etanol jako palivo vyráběl prakticky z čehokoliv a stal se v té době téměř jediným dostupným palivem.

V Německu je používání biopaliv zákonem povinné, dokonce sama Německá vláda dobrovolně přistoupila k vyššímu procentu příměsí biosložky do fosilních paliv, než jaký stanovila Evropská unie.

##### *4.3.2.3 Francie*

Francie je jednou z prvních zemí, kde se prováděly pokusy s přidáváním kvasného lihu do benzínu. První pokusy jsou datovány již z roku 1873, avšak byly to jen studie s testy. K prvnímu uzákonění povinného dodávání etanolu do paliv vzniklo



v roce 1923. Od této doby se vyrábělo a prodávalo palivo označované jako NATALIT složený z 55% etanolu, 49,9% etyléteru a 0,1% amoniaku. V roce 1935 pokrýval bioetanol ve Francii 12% celkové spotřeby paliva. Dalšímu rozšiřování měla napomoci daňová úleva, ta však přišla až v roce 1992.

Ve Francii, stejně jako je tomu ve Švédsku, není v dnešní době státem nařízené povinné přimíchávání bioetanolu do fosilních paliv. I přesto Francie hledí výše nad stanovené kvóty Evropské unie.

#### 4.4 Vývoj užití alkoholových paliv v České republice

Počátek používání biopaliv na území České republiky sahá až do období těsně po první světové válce, do dvacátých let minulého století. V té době se kvasný líh využíval především v palivech pro motory závodních automobilů. K 50% etanolu se přimíchával motorový benzín a benzol, případně i aceton.

Teprve od roku 1923 bylo stanoveno přesné množství jednotlivých příměsí pro automobilové palivo na 50% etanolu, 30% benzolu a 20% motorového benzínu a letecké palivo na 44% etanolu, 44% benzenu a 12% petroleje. Automobilové palivo se vyrábělo a prodávalo pod názvem DYNALKOL, podle jména jednoho z výrobců, Františka Daška. Dynalkol byl také znám pod zkratkou Bi-Bo-Li (benzín, benzol, líh). Lihová paliva se v té době dostala na takovou úroveň, že dokázala konkurovat klasickému motorovému benzínu.

Od roku 1926 do roku 1936 bylo zákonem povinné přimíchávání bezvodého etanolu s benzínem. Až v roce 1932 vznikl zákon č. 85/1932 Sb. a vládní nařízení č. 127/1932 Sb., které stanovilo přesné, plošné přidávání 20% obj. etanolu do benzínu. Tento zákon trval až do začátku druhé světové války. Rostoucí podíl automobilů na silnicích zvyšoval celkovou spotřebu paliva, která v roce 1935 tvořila 200.000 tun za rok, z toho lihová složka tvořila celých 20% obj, což státu přinášelo nemalé úspory. Používání lihobenzinových směsí v tehdejší Československé republice zaniklo až na počátku padesátých let minulého století.

Rok	ČSR	Německo	Francie
1932	4295	127200	89100
1935	54811	232500	370300
1938	61021	195500	250000

Tab. 9 Množství etanolu přidávaného do pohonných hmot v m<sup>3</sup> [9]

Z této tabulky je patrné, že mísení etanolu s pohonnými hmotami v tehdejší Československu mělo stále rostoucí tendenci, kterou zastavila až druhá světová válka.

Další období znovuzavedení přimíchávání biosložek do paliv se začalo v roce 1992. V tomto roce zavedla vláda České republiky tzv. Oleoprogram a jeho první etapu, která spočívala ve vybudování 17 lisoven a esterifikačních jednotek na výrobu metylesteru mastných kyselin řepkového oleje (MEŘO) s celkovou produkční kapacitou

za rok 63.500 tun RME (řepkový metylester). Používání samotného MEŘO jako palivo pro vznětové motory je ekonomicky nevýhodné, protože jeho výroba je drahá, proto se mísí s motorovou naftou v poměru 30%MEŘO a 70% nafty. MEŘO bylo od začátku roku 1992 zproštěno od spotřební daně a zařazeno do nižší sazby DPH 5%, i cena řepkového semene byla dotována částkou 4688 korun za tunu. Se vstupem České republiky do Evropské unie 1.5. 2004 byla sazba DPH opět zvýšena na 19% a veškeré dotace sníženy na nulu, to způsobilo prakticky úplné zmizení bionafty z českých čerpacích stanic.

Souběžně s Oleoprogramem, avšak o pár let později, vznikl z usnesení vlády České republiky dne 17. června 1998 nový tzv. Bioetanolový program. Jde o program nepotravinářského využití kvasného lihu jako obnovitelné energie ve výrobě pohonných hmot. Jeho cílem z počátku bylo jednak nahrazení složky v motorovém benzínu MTBE (metyl-terc-butyl-éter) za zdraví méně škodlivý ETBE (etyl-terc-butyl-éter), který neobsahuje metanol a v druhé části nahrazení složky MERO (metylester řepkového oleje) za EEŘO (etylexer řepkového oleje) pro použití k výrobě paliva pro vznětové motory opět bez jedovaté látky metanol. Bohužel výroba jak ETBE, tak i EEŘO je náročnější než je tomu u MTBE a MEŘO, proto i náklady jsou vyšší. Tento fakt staví biopaliva prozatím do pozice nekonkurence schopné fosilním palivům, jako je motorová nafta a benzín, proto je nezbytné, aby stát opět začal ceny biopaliv dotovat a zvýhodňovat oproti ostatním.

Oba programy jsou pod záštitou Evropské unie a každý stát EU se zavazuje splněním stanovených cílů. Pro Českou republiku to v posledních letech znamená, že nahradí určité procento fosilních paliv složkou z obnovitelných zdrojů. Všechny tyto státy, včetně nás, se zavázali navýšit podíl biosložek přidávaných do benzínu i nafty z 0% na 5,75% od roku 2003 do konce roku 2010. V ČR se bioetanol začal přimíchávat do fosilních paliv až 1. ledna 2008. Hlavním cílem a smyslem těchto programů je zvýšit využití zemědělských ploch, zvýšit potenciál zemědělství a stabilitu hospodářství v celém státě, zvýšit nezávislost na dodávkách ropy a především odlehčit globálnímu klimatu snížením množství emisních prvků výfukových plynů vypouštěné do ovzduší automobilovou dopravou.

## 5 Aplikace v motoru

### 5.1 Užití bioetanolu v motorech

Užití bioetanolu jako paliva, vyžaduje určité konstrukční změny motoru. Je také třeba přidávat do těchto paliv aditiva, zlepšující jeho mazací schopnosti, antikorozivní aditiva a mnoho dalších. Díky vysokým antidektonačním vlastnostem, lze zvýšit kompresní poměr a tím využít větší množství energie získané z takového paliva. Nespornou výhodou při tvoření směsi se vzduchem je jeho vysoké výparné teplo, které způsobí v sacím, případně spalovacím prostoru, ochlazení a tím zvýšení plnicí, nasávací účinnosti, dojde k zvýšení celkové účinnosti motoru a následkem toho ke zvýšení výkonu. Z hlediska průběhu spalování v motoru, je výhodné určité množství kyslíku, které je obsaženo v etanolu, protože kyslík podporuje hoření. To je u etanolu rychlejší a dokonalejší. Ale na druhou stranu toto procento kyslíku snižuje výhřevnost, která je u alkoholů nižší, než u benzínu nebo nafty.

Velkou nevýhodou alkoholů je jejich schopnost vázat na sebe vodu z ovzduší. Voda, kterou palivo pojme, může pak v dlouhodobém provozu způsobovat korozi kovových částí. Pryžové a některé plastové části motoru, se kterými je bioetanol v kontaktu, mohou být jeho agresivitou narušovány, proto je třeba již při vývoji motoru na tyto okolnosti brát zřetel.

#### 5.1.1 Aplikace ve vznětovém motoru:

Používání bioetanolu ve vznětových motorech prozatím není tak rozšířené, jako u motorů zážehových. Nejvíce rozšířené je používání u nákladních automobilů a autobusů. U vznětových motorů, je možné používat etanol dvěma způsoby. První je přestavět tento motor na zážehový a druhý způsob je, přizpůsobit etanol požadavkům odpovídající motorové naftě.

V prvním případě je jako palivo aplikován stoprocentní etanol. To vyžaduje zásadní změnu konstrukce motoru. Je zapotřebí k motoru namontovat dodatečný zapalovací systém, tím se ze vznětového stane zážehový motor. Avšak již při malé příměsi nafty do etanolu, nutnost zapalovacího systému odpadá, je však nutné přizpůsobit počátek vstříku.

Druhou možností je přizpůsobení vlastností etanolu co nejvíce motorové naftě. Označení paliva nahrazující motorovou naftu je E95. Je to směs 95% etanolu a 5% aditivních přísad, které například zvyšují cetanové číslo a zlepšují mazací schopnosti. Bez přidání těchto 5%, nelze bioetanol v žádném případě ve vznětových motorech spalovat. Avšak zásadní přestavbu je třeba učinit i na samotném motoru. Základní úprava spočívá ve zvýšení kompresního poměru na 25 a více. Je třeba i dimenzovat vstřikovací systém na vyšší dávku paliva a to zhruba 1,7 krát vyšší než u nafty, kvůli nízké výhřevnosti etanolu. Důležitá je i změna počátku vstříku paliva. Vzhledem k takovýmto konstrukčním změnám nelze již daný motor provozovat na klasickou naftu. V současné době je toto palivo využíváno nejvíce společností Scania, která vyrábí městské autobusy.

### 5.1.2 Aplikace v zážehovém motoru:

Nízkoprocentní přimíchávání do motorového benzínu, které je v této době běžně k dostání na každé čerpací stanici v České republice, tedy 5,75% etanolu, nepřináší pro staré i nové spalovací motory téměř žádný problém a není tedy zapotřebí žádných úprav. Hranice, pro kterou není třeba větších zásahů, či úprav motoru a příslušenství, je příměs 22% etanolu.

Vysokoprocentní směsi, jako je palivo E85, 85% bioetanolu a 15% Naturalu 95, lze spalovat i v běžných motorech, ale je třeba provést jednoduchou úpravu řídicí jednotky, která spočívá v prodloužení doby vstřiku paliva, kvůli nízké výhřevnosti bioetanolu, a přizpůsobení zápalu směsi. Konstruktivní změnou je pak výměna sedel ventilů za materiál odolávající větším teplotám a změnu materiálu za antikorozivní je třeba provést i u palivového systému. Tyto úpravy jsou spojeny s náklady několika málo desítek tisíc korun, cena se může lišit podle výrobce, nebo značky automobilu. Anebo zákazník sáhne již po upraveném vozidle s označením FFV. Stechiometrická směs vzduchu s etanolem je v poměru 9,0:1 a s metanolem 6,5:1, pokud se jedná o směs E85 je stechiometrická směs 9,9:1.

Kvůli nízké výhřevnosti je měrná spotřeba bioetanolu vyšší, avšak u motorů s vyšším kompresním poměrem, který může být až 15:1, bývá spotřeba dokonce nižší než u zážehových motorů. Bohužel takováto konstrukční změna, již neumožňuje spalovat jiné palivo než E85.

#### 5.1.2.1 Zážehové motory na benzín s podílem ETBE a MTBE:

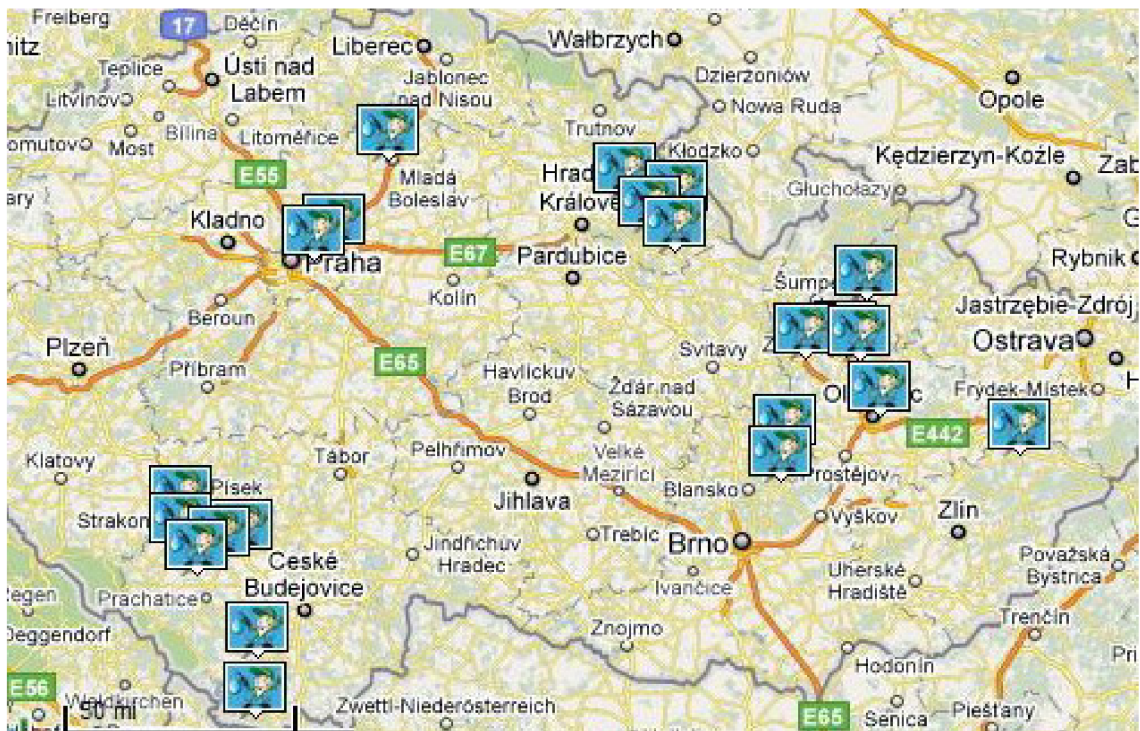
Do benzínu zle přidávat ETBE nebo MTBE jako kyslíkaté složky, které snižují množství CO a HC ve výfukových plynech. Složka takovéto příměsi v benzínu nepřesahuje více jak 15%obj. Bylo prokázáno, že obě složky mají stejný vliv na provozní parametry motoru, proto se ustoupilo od používání MTBE, který je zdravotně závadný a přešlo se k přimíchávání zcela neškodného ETBE. Konstruktivní změny na motoru v tomto případě nejsou zapotřebí. ETBE je do benzínu přidáván pouze jako náhrada za jiné aditivní složky podobných vlastností jako má tento éter. V množství 15% dojde k mírnému zvýšení oktanového čísla a malému snížení výhřevnosti. Kyslíkaté složky přidané do benzínu, mají za následek zdokonalení spalování a zlepšení výkonových charakteristik motoru. Tento způsob náhrady je již několik let využíván ve Francii a Španělsku, kde se ETBE hojně vyrábí.

### 5.1.3 Dvoupalivové systémy:

Dvoupalivové systémy nejsou nikterak rozšířené. Takovéto systémy jsou instalovány pouze do vozů provozovaných v podmínkách, kdy teplota vzduchu dlouhodobě klesá pod hranici  $-15^{\circ}\text{C}$ . Nevýhodou etanolu je jeho velmi špatná startovatelnost v mrazivých podmínkách, která je způsobena vyšší zápalnou teplotou. U benzínu se zápalná teplota pohybuje kolem teploty  $200^{\circ}\text{C}$ , u bioetanolu je kolem  $425^{\circ}\text{C}$ . Proto se pro nastartování motoru přepíná palivový systém na benzín, motor se bez problémů nastartuje a po jeho zahřátí na teplotu chladicí kapaliny nad  $50^{\circ}\text{C}$ , se systém opět přepne na bioetanol.

## 5.2 Dostupnost paliva

S nadcházející érou nových paliv se radikálně mění požadavky v zásobování těmito palivy. Nové pohonné hmoty vždy vyžadují velké investice do vybudování infrastruktury a vybavení. U biopaliv jsou takovéto investice mizivé, pakliže se přikloníme k variantě nahrazování několika procent benzínu, či nafty bionaftou nebo etanolem. Větší investice, pak přicházejí v úvahu s distribucí vysokoprocentních etanolových paliv, kdy je zapotřebí vybudování nových čerpacích stanic. V České republice je v dnešní době zhruba 26 čerpacích stanic distribuující palivo E85. Bioetanol pro čerpací stanice **Obr. 6** dodává společnost Cukrovary a lihovary TTD a.s. Zbylé čerpací stanice jsou například v Brně, Pardubicích, nebo Českých Budějovicích. Cena jednoho litru se pohybuje okolo 23,50 korun. Množství čerpacích stanic na E85 a jeho cena v porovnání s Českou Republikou je v tabulce **Tab. 1**.



Obr. 6 Mapa čerpacích stanic distribuující palivo E85 v ČR [10]

Dostupnost bioetanolu je mnohem jednodušší než by se mohlo zdát. Jeho výroba je velmi jednoduchá a surovin, ze kterých se může vyrábět je nepřeborné množství. Přimíchávání bioetanolu do automobilového benzínu a motorové nafty by mělo snížit závislost Česka na dovozu ropy. V České republice se uplatnění biopaliva v pohonných hmotách podporuje od roku 1992. V letech 1992 až 1996 šlo převážně o výstavbu a nákup technologií. Od roku 1997 stát podporoval výrobu bionafty. Nahrazení fosilních paliv biopaliva vyžadují směrnice EU. Cena vyrobeného etanolu se odvíjí od ceny základní suroviny, samotný proces kvašení a destilace není nějak finančně náročný. V České republice výroba směřuje k obilí. 70 až 80% ceny etanolu jsou náklady na surovinu.

Stát	Počet čerpacích stanic	Cena za litr E85
Švédsko	1578	8,75 -8,98 SEK
Francie	321	0,746 – 0,90 Euro
Německo	318	0,82 – 0,99 Euro
Maďarsko	88	215 – 236 HUF
Švýcarsko	63	1,20 – 1,59 CHF
Nizozemí	32	1,364 – 1,91 Euro
Česko	26	21,90 - 23,50 Kč
Rakousko	25	0,90 – 0,92 Euro
Velká Británie	21	0,02 – 0,10 GBP
Norsko	19	8,00 – 8,59 NOK
Španělsko	16	0,875 – 0,89 Euro
Finsko	6	0,85 – 0,91 Euro
Belgie	3	0,83 – 1,015 Euro
Itálie	2	1,77 Euro

Tab. 9 Počet čerpacích stanic na E85 a cena jednoho litru E85 v Evropě k 31.12.2009 [11]

### 5.3 Dostupnost vozového parku

Po Amerických silnicích jezdí více jak šest miliónů vozidel s označením FFV. V Brazílii pak o dalších 4,3 miliónu vozů, které pohání palivo E85 více.

S nástupem biopaliv na Český trh, přichází i možnost konvertovat původní zážehový motor na motor spalující například E85 nebo E50, což je směs 50% bioetanolu a 50% Naturalu 95. Lze tímto způsobem překlenout období, než se v Českých autosalónech objeví dostatečné množství vozidel s označením FFV, tedy vozy podporující tuto alternativu pohonu přímo od výrobce. Základní ideou je instalace korekční řídicí jednotky s podporou speciálního softwaru, který upravuje parametry pro vstup do sériové řídicí jednotky.

Zhruba na konci roku 2008 nabízel takzvané flexibilní automobily pouze Ford a Saab, avšak v roce 2009 se na trh dostaly i vozy značky Volvo, Renault, Peugeot, BMW, Citroën, ale i Škoda. Novými projekty jsou například Ferrari F430 Spider Biofuel, nebo Corvette Z06. Nejrozvinutější je trh ve Švédsku, kde kraluje v prodejnosti značka Ford, zhruba 60% všech vozů Ford prodaných na území Švédska je s motory podporující spalování E85. Zatímco, Saab a Ford jsou s cenou srovnatelné s jejich benzinovými ekvivalenty, je Volvo na E85 zhruba o 40 tisíc korun levnější.

### 5.3.1 Automobily na bioetanol:

#### 5.3.1.1 Vozy se vznětovým motorem

Možnostmi využití alkoholových paliv pro naftové motory se již v minulosti zabývala řada významných výrobců motorů. Výzkum byl motivován mj. skutečností, že vznětové motory poháněné alkoholovými palivy produkují méně některých výfukových škodlivin, zejména NO<sub>x</sub> a pevných částic, než motory naftové. Zbylé složky zvýšené produkce jako je CO a HC jsou bez problému redukovány v oxidačním katalyzátoru. Výfukové plyny neobsahují sloučeniny síry. Přínosem alkoholových paliv je i nižší množství úsad v motoru a delší životnost motorového oleje.

#### Scania OmniLink etanol:

Jedná se o autobus určený pro městský provoz. Je vybaven třemi dveřmi pro nástup a výstup pasažérů. Karosérie je vyráběná z lehkých slitin. Palivo, které autobus spaluje je E95. Motor je vodou chlazený řadový pětiválec o zdvihovém objemu 8900cm<sup>3</sup> a maximálním výkonu 198 kW(270 HP)/1900 min<sup>-1</sup> a točivým momentem 1200 N.m/1100 – 1400 min<sup>-1</sup>. Díky tomuto palivu je produkce CO<sub>2</sub> až od 90% nižší než u motoru s naftovým pohonem. Motor splňuje emisní normu EURO V a u některých složek tuto normu i překonává. V České republice je provozováno pouze pár vozů, ve Švédsku jezdí po silnicích velkých měst na 600 takovýchto autobusů. Do nádrže lze natankovat 400 litrů E95, což znamená dojezd zhruba 560 kilometrů ve městském provozu s průměrnou spotřebou 71 litrů E95 na 100 kilometrů. Maximální rychlost je omezena na 100 km/hod. Cena vozu je přibližně o 10000 eur vyšší než cena za verzi na motorovou naftu.



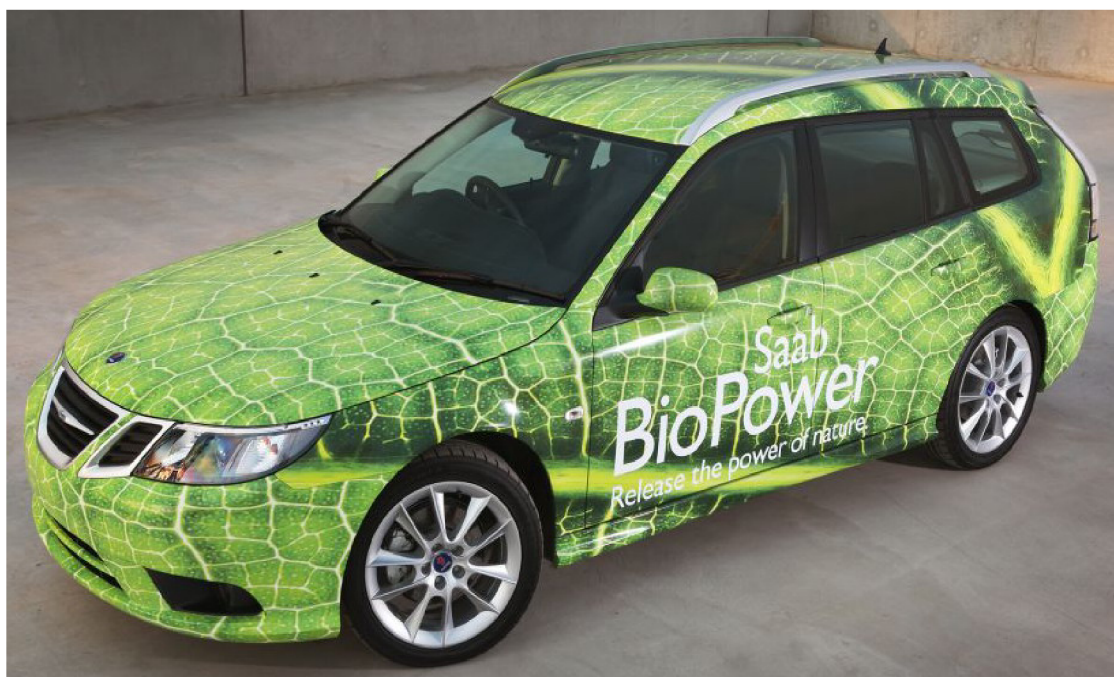
Obr. 6 Scania OmniLink Etanol [12]

### 5.3.1.2 Vozy se zážehovým motorem

Trh s vozidly s označením FFV je v současnosti již rozvinutý a díky mnohým státním podporám, v některých zemích, i konkurence schopným ostatním automobilům. Rozvinutější je však prodej a vývoj automobilů se zážehovým motorem spalujícím palivo E85 nežli se vznětovým motorem se spalováním E95. Provozovatel automobilu spalující benzín, který přejde na provoz na E85, osloví několik velmi zajímavých vlastností a výhod spojených s tímto provozem, avšak je zde i odvrácená strana věci. S porovnáním s benzinem se na bioetanol dojezd automobilu zhruba o třetinu zkracuje. Častému tankování lze však předejít instalací větší palivové nádrže. Hluběji do kapsy si i přesto řidič bude muset sáhnout. E85 je o pár korun levnější na litru, ale spotřebované množství je přeci jen vyšší.

#### Saab 9-5 2.0t biopower:

Saab ho označuje jako auto-alkoholik. Pod kapotou biopoweru je celohliníkový, přeplňovaný čtyřválec s variabilním časováním sacích a výfukových ventilů, spalující E85 z obnovitelných zdrojů. Kvůli odlišným vlastnostem hoření bioetanolu dostal motor Saabu zesílené ventily a jejich sedla a díky přímému vstřikování SIDI dosahuje výkonu 132 kW při 5500 ot/min a točivého momentu 280 Nm, to je o čtvrtinu víc než benzínový ekvivalent, srovnání v tabulce **Tab. 8**. Výsledkem je kromě prakticky nulové zátěže životního prostředí a absolutní eliminace pevných částí výfukových plynů, také dramatické zlepšení jízdních parametrů. Cena tohoto vozu se pohybuje kolem 945 000 Kč.



Obr. 7 Saab BioPower 9-5 2,0t [13]



Typ	2.0t	2.0t BioPower	2.3t	2.3T	2.3 Turbo	1.9 TiD
Zdvihový objem [cm <sup>3</sup> ]	1985	1985	2290	2290	2290	1910
Výkon [kW/min]	110/5500	132/5500	136/5500	162/5500	191/5300	110/4000
Točivý moment [Nm/min]	240/1800	280/1800	280/1800	310/1800	350/2000	320/2000
Největší rychlost [km/h]	215	225	230	235	250	205
Zrychlení z 0 na 100 km/h [s]	9,8	8,5	8,3	7,8	6,9	9,5

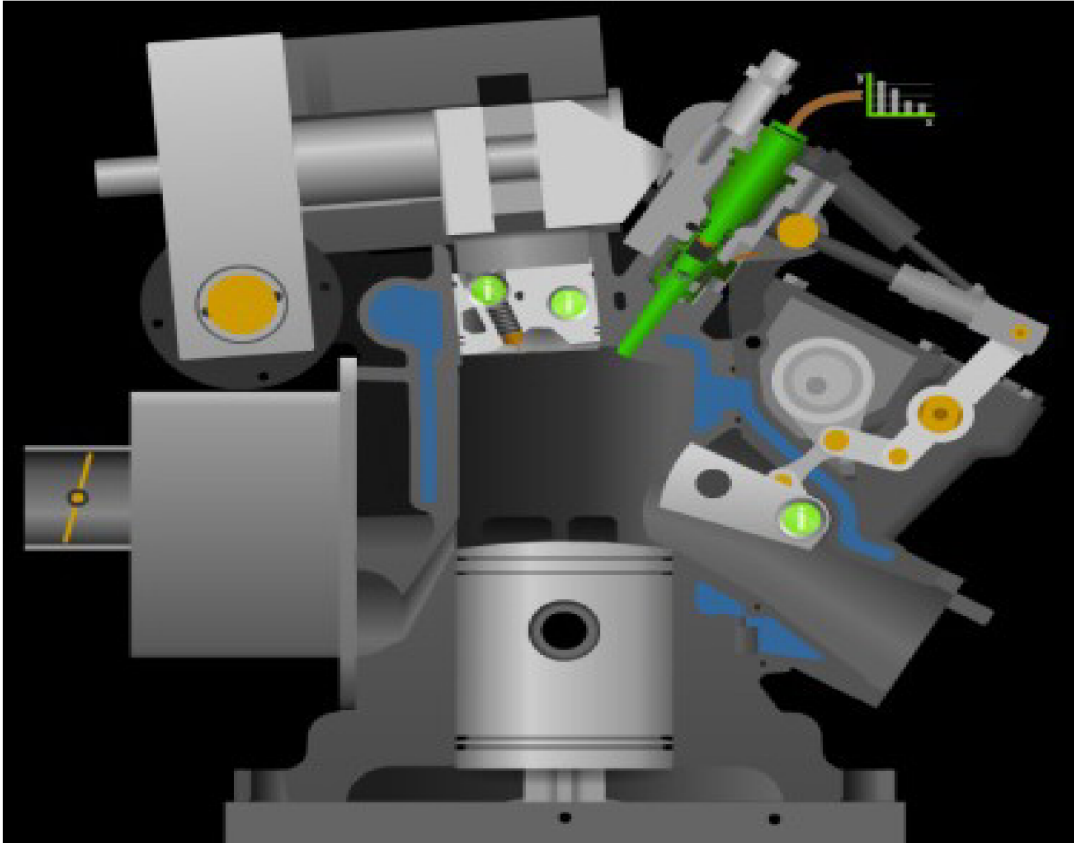
Tab. 10 Srovnání technických parametrů Saab BioPower a ostatní verze [14]

### 5.3.2 Světové projekty:

#### 5.3.2.1 Projekt Lotus „omnivore“

Tento jedinečný projekt, který se zrodil ve společnosti Lotus Engineering je průlomový v řešení konstrukčních požadavků kladený na motor provozovaný na etanolové palivo v příměsi s benzínem v poměru 0 až 100% etanolu. Jedná se o vývoj jednoválcového dvoutaktního motoru a proměnlivým kompresním poměrem. Hlava válce motoru je vytvořena tak, aby za provozu mohl být změněn kompresní poměr, tak jak to zrovna okolnosti vyžadují. Pro provoz motoru na bioetanol ve stoprocentní koncentraci je rozhodující nastavit vysoký kompresní poměr, až 15:1, aby mohl být v maximálním rozsahu využit potenciál paliva. Pakliže bude v nádrži vozidla palivo s obsahem benzínu je zapotřebí kompresní poměr snížit natolik, aby nedocházelo k detonačnímu hoření benzínu. Pro tento motor není rozhodující, v jakém poměru se obě paliva v nádrži nacházejí, důležité je pouze nastavení optimálního kompresního poměru, tak aby chod motoru byl co nejefektivnější. Výsledkem je zvýšení výkonu a snížení emisí výfukových plynů.

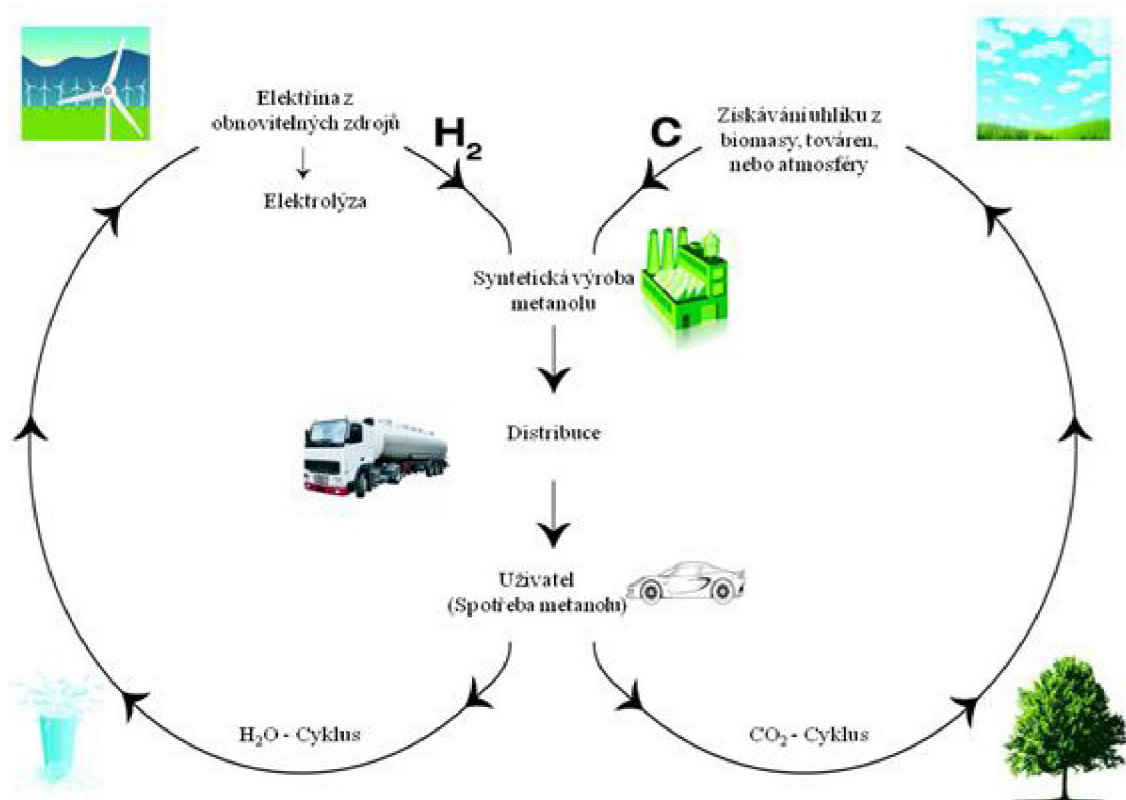
Motor je dvoudobý a má proměnlivé časování ventilů a přímé vstřikování palivo přímo do válce. Objem válce je 499,6 kubických centimetrů. Stupeň komprese je proměnlivý a jeho maximální hodnota je až 40:1. Účinnost motoru je až o 10% vyšší. Díky proměnlivému stupni komprese je motor schopný spalovat jakékoliv tekuté palivo, od benzínu, přes naftu až po veškerá biopaliva.



Obr. 8 Lotus omnivore concept engine [15]

### 5.3.2.2 Projekt Lotus „Udržitelnost biopaliv“

Společnost Lotus Engineering představila studii na výrobu metanolu. Jedná se o syntetickou výrobu z uhlíku a vodíku. Podle představy společnosti by mohl být uhlík získáván chemickou reakcí z  $\text{CO}_2$ , kterého například v atmosféře je stále více a více, nebo z továren, či biomasy. Získávání vodíku by bylo založené na elektrolýze vody. Zde je prozatím hlavní otázkou, z jakého zdroje získávat dostatečné množství elektrické energie, pro elektrolýzu potřebnou. V takzvané zelené budoucnosti by to měl být například zdroj z větrných, vodních a solárních elektráren. Po získání uhlíku i vodíku a po jejich sloučení je možné vytvářet metanol. Celá výroba je znázorněna na obrázku **Obr. 9**.



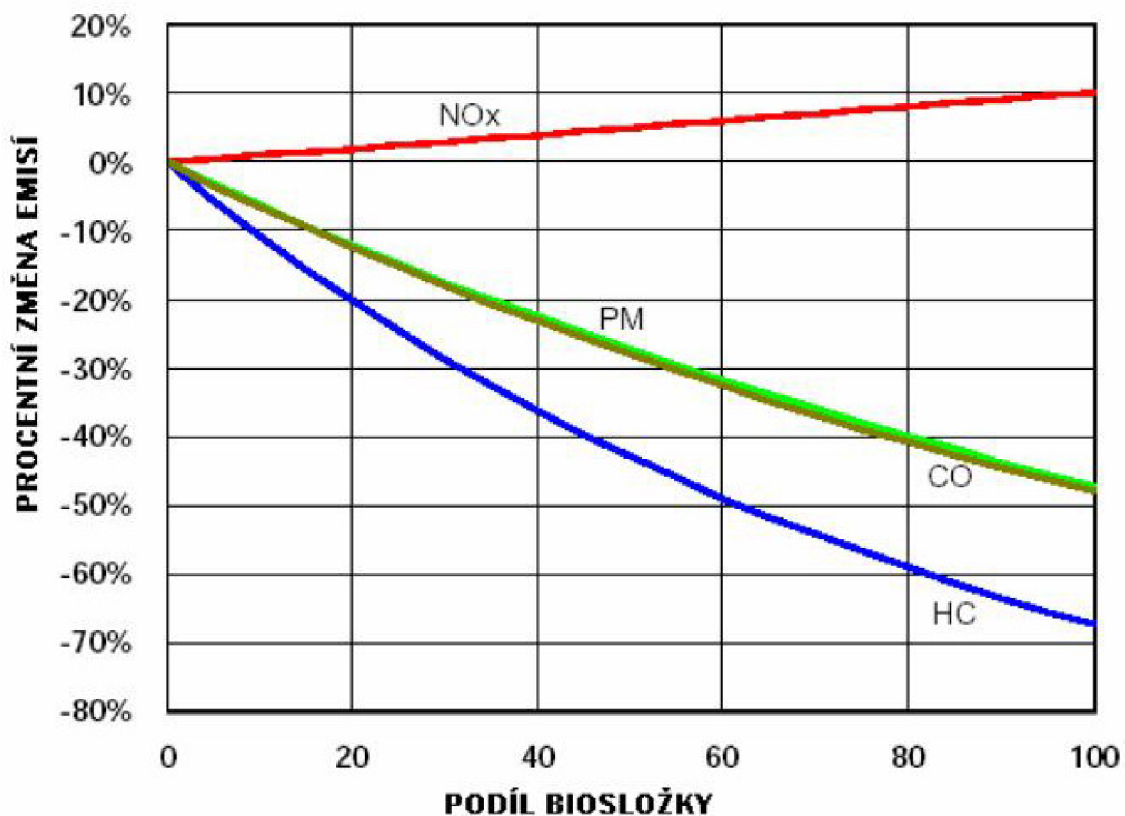
Obr. 9 Cyklus výroby metanolu [15]

#### 5.4 Vliv paliva na složení spalin

Na rozdíl od paliv vyráběná z ropy, při spalování bioetanolu nedochází k nárůstu oxidu uhelnatého v atmosféře. Je to dáno díky takzvané „dokonalé smyčce“. Její princip je založen na vstřebávání  $CO_2$  rostlinami z atmosféry. Dá se uvažovat, že pro výrobu bioetanolu je zapotřebí určité množství plodin. Tento vyrobený etanol je postupně spalován v motorech pohánějící automobily. Při spalování dochází k produkci určitého množství  $CO_2$ , které je teoreticky zpětně vstřebáno rostlinami, jež jsou opět záměrně pro výrobu bioetanolu pěstovány.

Produkce škodlivých plynů je snížena i díky samotnému spalování, které je oproti spalování benzínu mnohem efektivnější. V tabulce **Tab.11** je přehled produkce oxidu uhličitého v porovnání se stejným typem motoru, avšak jednou provozovaného na fosilní palivo a jednou na E85. Lepší spalování souvisí s mnohem jednodušší strukturou alkoholů oproti benzínu nebo naftě. Tím lépe hoří a celý proces pak vede k nižší tvorbě nespálených zbytků.

Podle toho, kolik procent biosložky je obsaženo v palivu se úměrně snižuje množství škodlivin produkovaných při spalování v motoru, viz **Obr.10**. Zhruba o polovinu klesne množství  $CO$  a o čtvrtinu poklesnou i emise  $N_2O$ . Pevných částic, stejně tak jako organických částic je ve výfukových plynech minimálně.



Obr. 10 Změna limitních prvků výfukových plynů po přidání biosložek do fosilních paliv [16]

Na druhé straně, je při spalování bioetanolu produkováno velké množství acetaldehydu, který vytváří škodlivý ozón. Je to karcinogenní látka a hlavní složka smogu. Značné množství, až 80% této látky lze pomocí katalyzátoru odstranit.

Značka vozu	Produkce CO <sub>2</sub>
Volvo V70 2,0 D	157 g/km
Volvo V70 2,0 E	63 g/km
WV Passat 1,9 D	136 g/km
WV Passat 1,9 EcoFuel E	70 g/km
Renault Clio 1,2 16V B	130 g/km
Renault Clio FlexFuel 1,2 16V E	52 g/km
Saab 9-3 2.0 B	170 g/km
Saab 9-3 2.0 BioPower E	54 g/km

Tab. 11 Srovnání produkce CO<sub>2</sub> stejných vozů s konvenčními palivy a E85 [17]  
B – Benzin, D – Diesel, E – Etanol. Písmeno poukazuje na druh provozovaného paliva

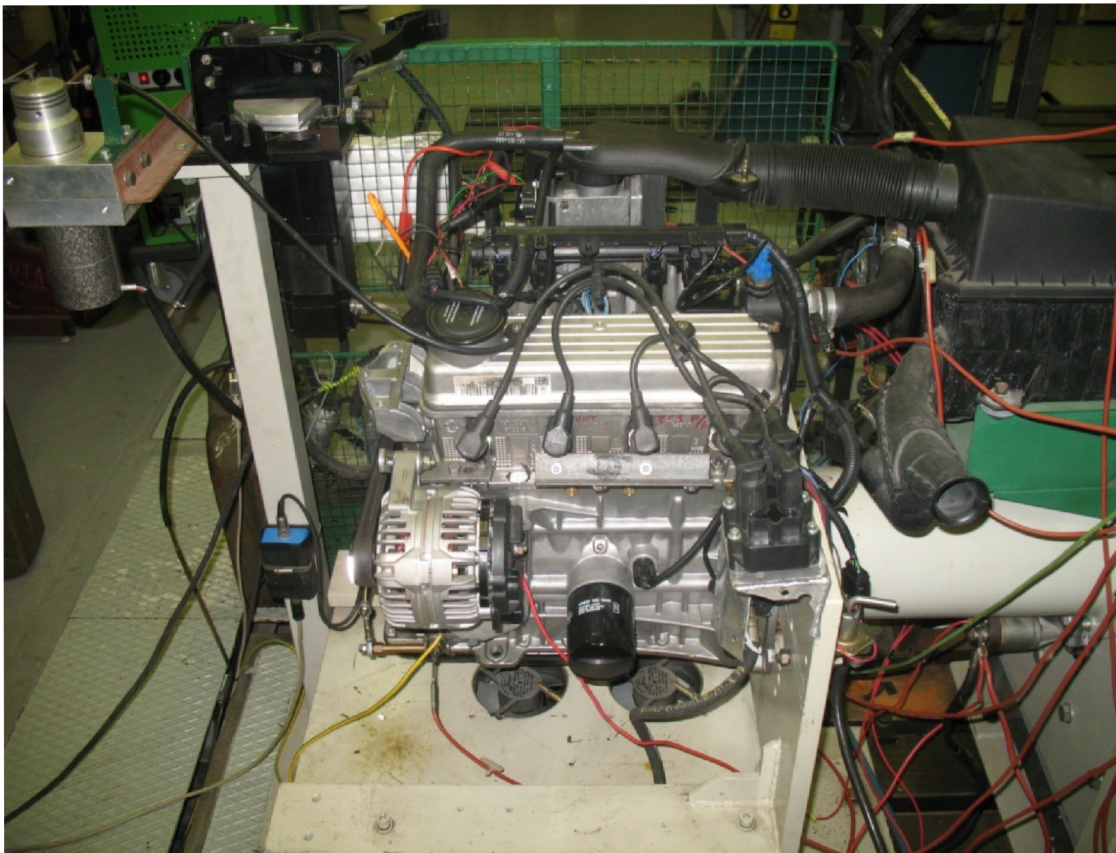
## 6 Praktické zkoušky na motorové brzdě

### 6.1 Popis pracoviště

Veškeré mé měření proběhlo v budově Fakulty strojního inženýrství blok C03. Jako zkušební motor byl použit motor značky Škoda 1.0 MPI s označením ARV **Obr. 11**.

#### Technické údaje motoru:

Kód motoru	ARV
Zdvihový objem	997 cm <sup>3</sup>
Počet válců:	4
Vrtání/zdvih:	72/61,2 mm
Kompresní poměr:	10
Počet ventilů na válec:	2
Pořadí zapalování:	1-3-4-2
Výkon při 4500 min <sup>-1</sup>	34 kW
Točivý moment při 3000 min <sup>-1</sup>	72 Nm



Obr. 11 Zkušební motor škoda 1.0 MPI ARV

Byla použita dvě paliva. Automobilový benzín Natural 95 a biopalivo E85 složené z 85% bietanolu a 15% Naturalu 95. Obě paliva jsou legislativně přípustná paliva a jsou státem uznávána jako paliva dovolená používat na území České republiky jako pohonnou hmotu. Jejich kvalita je dána normou ČSN. Pro Natural 95 je kvalita dána normou ČSN EN 228 a pro E85 je kvalita stanovena normou ČSN 65 6511.

Pro měření emisních prvků výfukových plynů byl použit nejmodernější diagnostický komplet BOSCH FSA 750, jehož částí je analyzátor výfukových plynů BEA 050, který dokáže kromě všech běžných složek, měřit i obsah NOx **Obr. 12**. Jímání výfukových plynů tímto přístrojem je realizováno před katalyzátorem. Skutečný obsah prvků emisí u reálného motoru je tedy odlišný, protože dojde k redukci katalytickou reakcí. Pro moje měření však toto nemá nijaký vliv, protože metody a podmínky měření obou paliv jsou totožné a proto lze výsledky mezi sebou porovnávat.



*Obr. 12 Diagnostický komplet BOSCH FSA 750*

## 6.2 Příprava stanoviště

### 6.2.1 Změna vstřikovacích ventilů motoru

Pro provoz zkušební motoru na palivo E85 bylo nutné provést několik drobných změn v programu řídicí jednotky, tak aby bylo možné optimálně palivo E85 spalovat. Oproti nastavení takzvaných map řídicí jednotky benzínu se mapy pro E85 liší především v délce otevření vstřikovacího ventilu. Z prvotních testů jsem zjistil, že stávající vstřikovací ventily nebyly schopné při provozu na E85 dodat dostatečné množství paliva do spalovacího prostoru. U původních vstřikovačů byla prodloužena doba vstřiku zhruba o 30% ve všech režimech. To způsobilo, že při plném zatížení motoru a zhruba při otáčkách  $4500 \text{ min}^{-1}$ , že se vstřikovací ventily otevíraly maximálně, tedy pro celý cyklus byl ventil plně otevřený. Proto došlo k výměně vstřikovacích ventilů litrového motoru za ventily z motoru Škoda Fabia 1.4 MPI.

Po této změně bylo nutné nastavit do řídicí jednotky jiné, odpovídající množství průtoku paliva za daný čas. Nové vstřikovací ventily mají podle dílenské příručky průtočné množství 145 ml za 30 vteřin. Pro zadání hodnot do řídicí jednotky jsem musel přepočítat průtok ventilem na gramy za minutu.

Ze vztahu pro hustotu (1) jsem vyjádřil hmotnost a do tohoto vztahu (2) jsem dosadil získané hodnoty:

$$\text{Hustota benzínu:} \quad \rho = 750 \text{ kg/m}^3 = 750000 \text{ g/m}^3$$

$$\text{Objem průtočného množství benzínu:} \quad V = 145 \text{ ml} = 0,000145 \text{ m}^3$$

$$\rho = \frac{m}{V} \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (1)$$

$$m = \rho \times V \text{ [kg]} \quad (2)$$

$$m = 750000 \times 0,000145$$

$$\underline{m = 108,75 \text{ [g]}}$$

Výsledkem je tedy 108,75 g benzínu za 30 vteřin. Do řídicí jednotky byla zapsána hodnota 217.5 g za minutu. Pro zkušební měření s benzínem byla volena mapa s délkou otevření vstřikovacího ventilu tak, aby hodnota lambda odpovídala stechiometrickému poměru. U zkoušek paliva E85 byly nastaveny stejné podmínky, ale tak aby dávka paliva byla o 30% vyšší oproti benzínu.

### 6.2.2 Přepočítání hodnoty lambda pro zkoušky s palivem E85

Pro následující zkoušky s palivem E85 je nezbytně nutné přepočítat hodnotu lambda. Řídící jednotka, která je na tomto motoru použita, je předprogramována na vlastnosti benzínu. To znamená, že jsou do ní uložena data například o hustotě, výhřevnosti a také stechiometrickém poměru. Pro benzín je tento poměr vzduchu a benzínu v množství 14,7:1. Shořením takovéto směsi ve spalovacím prostoru odpovídá hodnotě lambda  $\lambda=1$ . Při běžném provozu motoru se řídící jednotka snaží tuto hodnotu lambda udržovat, protože tento provoz je nejméně zatížen produkcí emisí výfukových plynů.

Pro palivo E85 je tato situace odlišná. Stechiometrický poměr vzduchu a E85 je 9,9:1. Pokud dojde ke spálení takovéto stechiometrické směsi, měla by hodnota lambda být opět jedna, což tedy znamená nejdokonalější spalování. Za předpokladu, že řídící jednotka má informace o vlastnostech E85, bude toto spalování odpovídat  $\lambda=1$ . Na tomto zkušebním stanovišti je řídící jednotka, která byla vyvinuta původně pouze pro benzín. Při spalování E85 s touto řídící jednotkou je tedy ideální spalování při jiné hodnotě lambda. Proto je nutné tuto hodnotu přepočítat.

Po přepočítání, se do řídící jednotky nastavila hodnota  $\lambda=0,92$ , což odpovídá spalování stechiometrické směsi pro E85, respektive ekvivalent hodnoty  $\lambda=1$  pro benzín.

### 6.2.3 Předpoklad opakovatelnosti zkoušek

Veškeré následující zkoušky, které jsem prováděl ve zkušební laboratoři, jsou velmi náročné na přesnost provedení. Pro opakovatelnost zkoušek za stejných podmínek je naprosto nezbytné, aby veškeré naměřené hodnoty byly za co nejbližších okolních podmínek. S každou naměřenou hodnotou jsem musel pečlivě zapisovat i hodnotu teploty nasávaného vzduchu do motoru, teplotu chladicí kapaliny motoru a atmosférický tlak vzduchu ve zkušební laboratoři. Veškeré hodnoty z jednotlivých zkoušek jsem mohl zapisovat až po ustálení těchto okolních hodnot teplot a tlaku, abych mohl zaručit opakovatelnost zkoušky a tím eliminovat vzniklou chybu. Díky dodržení těchto předpokladů zkoušky jsem mohl hodnoty získané ze zkušebního měření mezi sebou porovnávat.

Například při rozdílné teplotě nasávaného vzduchu dojde ke změně nasátého objemu vzduchu, což změní hodnotu výsledného výkonu. Drobné odchylky teplot v řádech desetin °C výsledky měření nikterak výrazně neovlivní.

### 6.2.4 Přepočítání výkonu a točivého momentu podle normy ISO

U zkoušek, kde jsem zapisoval točivý moment a výkon motoru, bylo nutné kvůli přesnému vyhodnocení přepočítat změřený výkon motoru podle normy ISO na takzvaný korigovaný výkon. Normou ISO jsou dány podmínky, při kterých by se zkouška měla provádět, pokud chceme, aby měření bylo objektivní. Jedná se o teplotu a tlak vzduchu na měřícím stanovišti.



Pomocí vztahu (3) je za  $P$  dosazován výkon zjištěný při zkoušce a hodnota korekčního faktoru  $k_{ISO}$  je vypočítána ze vztahu (4), kde  $p$  je tlak při zkoušce a  $T$  je teplota na měřícím stanovišti v kelvinech.

Korigovaný výkon:

$$P_{ISO} = P \cdot k_{ISO} \quad (3)$$

Korekční faktor:

$$k_{ISO} = \left(\frac{99}{p}\right)^{1,2} \cdot \left(\frac{T}{298}\right)^{0,6} \quad (4)$$

## 7 Praktické zkoušky s palivy E85 a natural 95

### 7.1 Měření předstihu zážehu směsi v závislosti na výkonu motoru

Pro to, aby následující zkoušky etanolového paliva byly proveditelné, bylo nutné nahrát do řídicí jednotky potřebné množství informací pro chod motoru. Odlišné parametry paliva E85, především výhřevnost a oktanové číslo, by při špatném nastavení řídicí jednotky motoru způsobily, že zkoušky s tímto palivem by byly neplnohodnotné, respektive by výsledky neodpovídaly maximálnímu využití potenciálu paliva za daných podmínek na zkušebně.

Při tomto testu jsem zjišťoval hodnoty předstihu zážehu směsi paliva a vzduchu pro natural 95 a E85 a optimální hodnoty nahrával do programu řídicí jednotky, čemuž se také říká mapování řídicí jednotky.

#### 7.1.1 Metodika zkoušky

1. Zvolit druh zkoušeného paliva BA95 nebo E85. Zvolené palivo připojit k palivovému systému motoru.
2. Spustit motor na volnoběžné otáčky a minimální zatížení. Vyčkat v tomto chodu motoru až do okamžiku zahřátí provozních kapalin na stanovené teploty provozu.
3. Nastavit autoregulaci množství dodávaného paliva tak, aby hodnota lambda byla rovna jedné pro benzín a pro E85 lambda rovna 0,92. (Tyto hodnoty odpovídají stechiometrickému spalování)
4. Zvýšit otáčky motoru na  $1500 \text{ min}^{-1}$ .
5. Nastavit maximální zatížení motoru, tedy škrtecí klapku otevřít na 100%.
6. Úhel zážehu posunout na úroveň detonačního hoření, tuto hodnotu úhlu si zapsat a zaznamenat si i hodnotu výkonu motoru.
7. Postupně úhel zážehu snižovat do okamžiku, kdy výkon motoru začne významně klesat. Zapsat si tuto hodnotu předstihu, před výrazným poklesem výkonu a také si zapsat daný výkon.
8. Krok snížení úhlu zážehu zvolit tak, aby pro celé měření vyšlo čtyři až pět hodnot předstihu a výkonu motoru.
9. Zvýšit otáčky motoru o 500 za minutu a měření v bodech 6. až 8. opakovat.
10. Zkoušku ukončit po odměření při otáčkách 5500 za minutu.
11. Vyměnit palivo a nastavit vstupní parametry pro řídicí jednotku, odpovídající danému palivu.
12. Zkoušku celou opakovat, podle bodů 1. až 10.

#### 7.1.2 Postup zkoušky

U této zkoušky jsem jako první připojil k palivovému systému motoru benzínové palivo natural 95 a motor nastartoval. Do doby než se provozní kapaliny motoru zahřály na teplotu optimálního provozu, jsem motor nechal běžet na volnoběžné otáčky a zatížení nastavil na minimum. Po čase, kdy bylo již možné zahájit zkoušku, jsem zvýšil otáčky motoru na 1500 za minutu a škrtecí klapku otevřel na maximum, což odpovídá maximálnímu zatížení motoru. Po ustálení okolních hodnot jsem pomocí programu

řídící jednotky nastavil úhel zážehu směsi paliva a vzduchu na takovou hodnotu, kdy směs začala samovolně přecházet do detonačního hoření. Tento stav, kdy dojde k samovolnému zápalu je doprovázen silným akustickým projevem v podobě cinkání, označovaným také jako „klepání motoru“. Detonační hoření lze rozpoznat i na indikátoru tlaku ve spalovacím prostoru, kdy nárůst tlaku je velmi strmý a křivka průběhu tlaku ve válci je velmi roztřesená. Úhel zážehu na hranici detonačního hoření a výkon motoru při tomto předstihu jsem zaznamenal.

Následně jsem po malých krocích úhel zážehu snižoval a zároveň sledoval hodnotu výkonu motoru. Ve chvíli, kdy výkon začal rychle klesat, jsem si zaznamenal hodnotu předstihu a výkonu, právě ve chvíli počátku poklesu výkonu motoru. Od hranice detonování až po významný pokles výkonu, kdy jsem předstih snižoval, výkon motoru příliš neklesal, této prodlevě se odborně říká „death timing“ a je důležitá pro stanovení optimálního úhlu zážehu. Ten by měl být při co nevyšším výkonu motoru, ale co nejdále od hranice detonačního hoření a tímto předstihem je právě úhel zážehu na konci takzvané fáze „death timing“. Tuto hodnotu předstihu a výkonu motoru jsem si zaznamenal a nahrál do řídicí jednotky, jako optimální hodnotu předstihu.

Dále jsem pokračoval ve snižování předstihu po takovém kroku, aby měření vyšlo zhruba na 5 hodnot předstihů a výkonů. Při velmi malém úhlu zážehu výkon motoru začal rapidně klesat, což je známkou, že již nemá cenu dále předstih snižovat a zkoušku pro tyto otáčky jsem ukončil.



Následně jsem otáčky motoru zvýšil o 500 za minutu a měření provedl identicky znovu. Poslední část zkoušky jsem provedl pro otáčky 5500 za minutu a celé měření následně ukončil. Po odstavení motoru jsem k palivovému systému připojil druhé palivo E85. Do řídicí jednotky jsem nastavil zvýšení dávky paliva, abych dosáhl stejné výhřevnosti jako u benzínu a hodnotu lambda nastavil na optimum pro E85  $\lambda=0,92$ . Celou zkoušku jsem poté co nejpřesněji opakovat.

### 7.1.3 Naměřené hodnoty předstihů a výkonů motoru

#### 7.1.3.1 Tabulka hodnot předstihů a výkonů motoru v celém rozsahu otáček pro BA95

Otáčky motoru [min <sup>-1</sup> ]	$\delta_1$ [°]	Pe <sub>1</sub> [kW]	$\delta_2$ [°]	Pe <sub>2</sub> [kW]	$\delta_3$ [°]	Pe <sub>3</sub> [kW]	$\delta_4$ [°]	Pe <sub>4</sub> [kW]
1500	10	7,58	13	9,12	15	9,99	21	10,35
2000	10	11,50	15	13,65	20	13,87	25	13,85
2500	15	16,83	18	18,20	20	18,67	26	18,74
3000	15	19,80	20	21,70	25	22,65	30	23,90
3500	15	21,32	20	24,96	27	25,15	33	25,94
4000	20	25,80	25	28,55	30	29,30	36	29,96
4500	20	29,40	25	31,79	30	32,38	36	32,67
5000	20	30,70	25	34,00	30	36,15	36	36,25
5500	20	33,15	25	35,88	30	36,47	36	36,71

Tab. 12 Hodnoty úhlu předstihu a odpovídajícího výkonu motoru při zkoušce paliva BA95

 Optimální hodnota předstihu v závislosti na výkonu  
 Hodnota předstihu, kdy začalo detonační hoření

## 7.1.3.2 Tabulka hodnot předstihů a výkonů motoru v celém rozsahu otáček pro E85

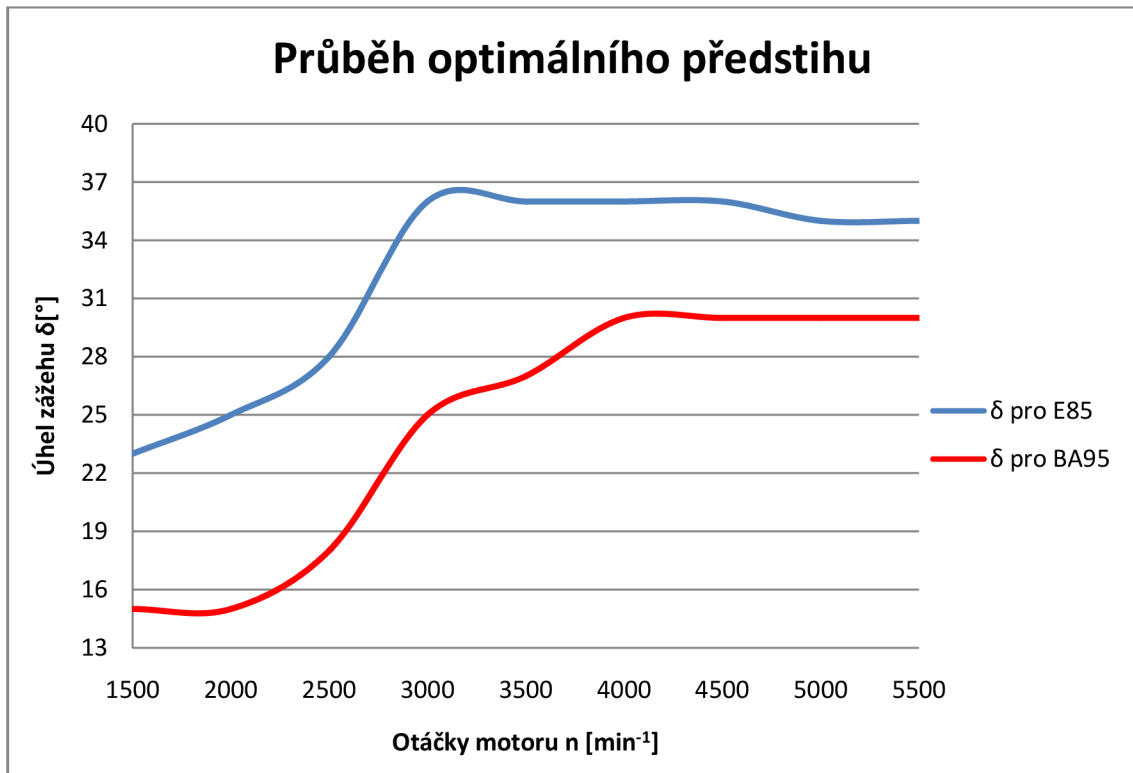
Otáčky motoru [min <sup>-1</sup> ]	$\delta_1$ [°]	Pe <sub>1</sub> [kW]	$\delta_2$ [°]	Pe <sub>2</sub> [kW]	$\delta_3$ [°]	Pe <sub>3</sub> [kW]	$\delta_4$ [°]	Pe <sub>4</sub> [kW]	$\delta_5$ [°]	Pe <sub>5</sub> [kW]
1500	15	9,21	20	10,54	23	11,25	30	11,35	35	11,55
2000	20	13,07	25	14,50	30	14,00	35	14,02	40	14,05
2500	20	18,01	25	20,61	28	21,00	35	21,45	39	21,21
3000	20	20,05	26	22,33	30	23,02	36	24,14	40	24,64
3500	25	24,03	30	26,56	30	27,51	36	28,59	45	28,67
4000	25	28,96	30	30,10	36	31,00	40	31,20	46	31,45
4500	25	32,18	30	34,20	36	34,68	40	34,88	45	34,95
5000	25	35,20	30	37,40	35	37,95	40	38,07	43	38,80
5500	25	37,51	30	39,00	35	39,12	40	39,78	43	40,00

Tab. 13 Hodnoty úhlu předstihu a odpovídajícího výkonu motoru při zkoušce paliva E85

- Optimální hodnota předstihu v závislosti na výkonu
- Maximální možná hodnota předstihu, ale i tak nedosaženo hranice detonačního hoření
- Hodnota předstihu, kdy začalo detonační hoření

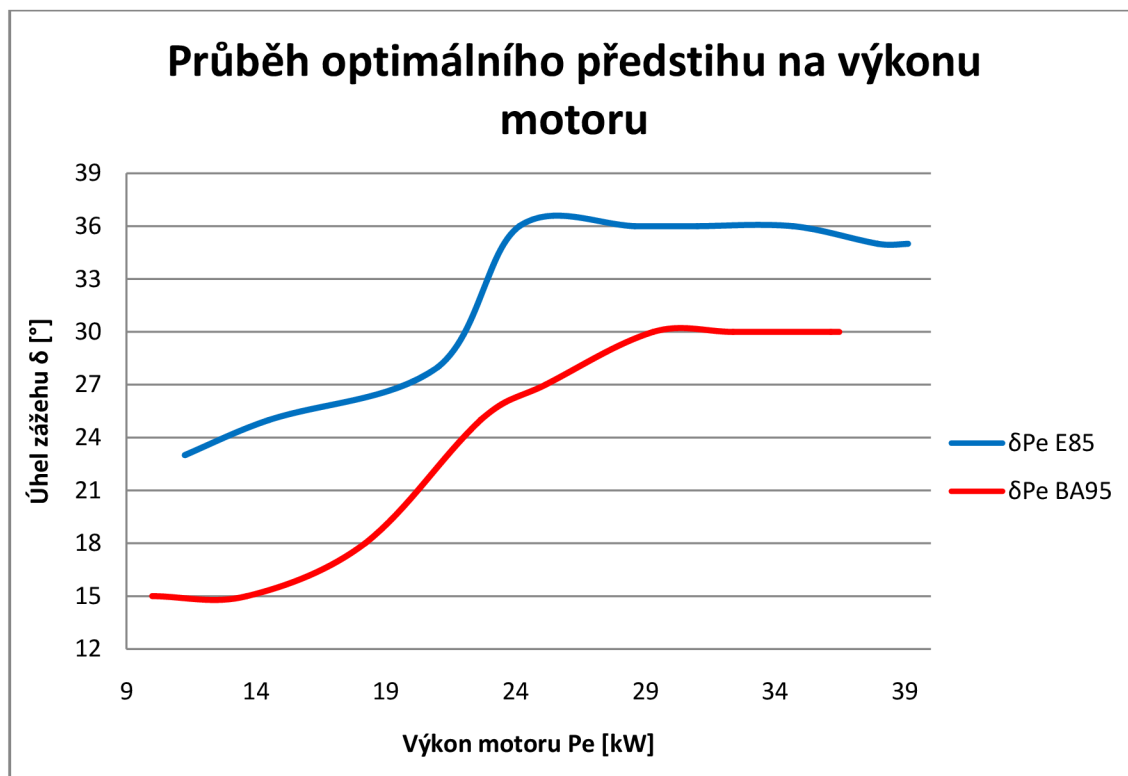
## 7.1.4 Grafické vyhodnocení zkoušky předstihu zážehu

## 7.1.4.1 Vyhodnocení průběhu optimálního úhlu zážehu v závislosti na otáčkách



Graf. 1 Průběh optimálního předstihu v závislosti na otáčkách motoru pro paliva BA95 a E85

## 7.1.4.2 Vyhodnocení průběhu optimálního předstihu v závislosti na výkonu motoru



Graf. 2 Průběh optimálního předstihu v závislosti na výkonu motoru pro paliva BA95 a E85

## 7.1.5 Shrnutí výsledků zkoušky

Tuto zkoušku obou paliv jsem prováděl ze všech následujících zkoušek jako první. Důvodem bylo zjištění optimálních úhlů zážehu paliva E85 pro jednotlivé otáčky při plném zatížení motoru. Tyto hodnoty jsem postupně v průběhu zkoušky nahrával do řídicí jednotky, abych v následujících zkouškách mohl nastavit co nejvhodnější podmínky pro spalování E85 za podmínek daných touto zkušebnou. Hodnoty předstihů, které jsem uložil do řídicí jednotky, jsou vyznačeny v tabulce **Tab. 13** v zelených polích.

Hodnoty vyznačené v obou tabulkách **Tab. 12** i **Tab. 13** v červených polích jsou naměřeny při takzvaném detonačním hoření směsi. Takovýto chod motoru v detonační oblasti hoření paliva je nestabilní a při dlouhodobém provozu za těchto podmínek by mohlo dojít ke zničení motoru, proto zjišťování těchto hodnot předstihu a výkonu muselo proběhnout velmi rychle. V tabulce **Tab. 13** ve žlutých polích jsou maximální hodnoty předstihu, které bylo reálně možné pomocí řídicí jednotky nastavit. Řídicí jednotka další zvýšení předstihu neumožňovala. Avšak i přes tuto skutečnost nebylo dosaženo hranice detonačního hoření.

Z grafu **Graf. 1** je patrný průběh optimálního průběhu předstihu obou paliv v závislosti na otáčkách motoru. Na průběhu obou křivek je patrné, že tvar křivek je poměrně podobný, nicméně průběh předstihu pro palivo E85 je o určitou hodnotu posunutý do vyšších hodnot úhlu zážehu. Možnost zvýšit tuto hodnotu oproti benzínu, aniž by docházelo k detonačnímu hoření, je díky vyššímu oktanovému číslu oproti BA95. Čím je oktanové číslo paliva vyšší, tím je jeho schopnost odolávat samozápalům

lepší. To ve výsledku znamená, že palivo je možné více stlačit a zahřát, tak aby vývin uvolněného tepla po zážehu směsi byl vyšší. Tato vlastnost paliva umožňuje nastavit parametr předstihu tak, aby došlo k určitému nárůstu výkonu motoru.

Na grafu **Graf. 2** je znázorněn průběh optimálního předstihu v závislosti na výkonu motoru, tak aby bylo zřejmé, jaký vliv má na hodnotu výkonu velikost oktanového čísla paliva. Protože E85 má oktanové číslo 106 bylo možné při zkoušce dosáhnout vyšších hodnot předstihu a zároveň i vyšších hodnot výkonu motoru.

Pokud by bylo možné za podmínek, při kterých jsem zkoušku prováděl, zvýšit kompresní poměr motoru a tuto zkoušku znovu s palivem E85 opakovat, což by bylo možné díky vysokému oktanovému číslu E85, bylo by využito většího potenciálu tohoto paliva a tím by došlo i k dalšímu nárůstu výkonu motoru.

## 7.2. Změna výkonnostních parametrů motoru v závislosti na hodnotě lambda $\lambda$

Tuto zkoušku jsem provedl v pořadí jako druhou, abych si ověřil přepočtení hodnoty lambda v kapitole 6.2.2 a tuto hodnotu mohl používat v dalších měřeních jako hodnotu pro nastavení chodu motoru při spalování paliva E85.

### 7.2.1 metodika zkoušky

1. Zvolit druh zkoušeného paliva BA95 nebo E85. Toto palivo připojit k palivovému systému motoru.
2. Spustit motor na volnoběžné otáčky a nulové zatížení. Vyčkat v tomto chodu motoru až do okamžiku zahřátí provozních kapalin na stanovené teploty provozu.
3. Nastavit maximální zatížení motoru a škrticí klapku otevřít na 100%.
4. Zvýšit otáčky motoru na  $2000 \text{ min}^{-1}$ .
5. Pomocí programu řídicí jednotky nastavit délku otevření vstřikovacího ventilu tak, aby na ukazateli hodnoty lambda byla nastavena počáteční hodnota měření  $\lambda=0,7$  u E85 a  $\lambda=0,8$  u BA95.
6. Vyčkat do ustálení okolních podmínek a z programu hydrodynamické brzdy zapisovat hodnoty výkonu a točivého momentu motoru a předstih zážehu.
7. Důležité pro opakovatelnost zkoušky je zapisovat si i hodnoty nasávaného vzduchu a atmosférický tlak vzduchu ve zkušební místnosti. Pro každé měření by se tyto hodnoty neměly příliš lišit.
8. Po zapsání všech hodnot do tabulky, pokračovat ve zvyšování hodnoty lambda na těchto otáčkách s krokem 0,05 až do konečné hodnoty  $\lambda=1,2$ .
9. Pro každou hodnotu lambda zapisovat daný výkon, točivý moment motoru a předstih zážehu.
10. Po odměření celého rozsahu hodnot lambda při otáčkách motoru  $2000 \text{ min}^{-1}$ , zvyšovat otáčky o  $1000 \text{ min}^{-1}$ , až do konečné hodnoty měření  $4000 \text{ min}^{-1}$  a opakovat zkoušku v bodech 1. až 9.

### 7.2.2 Postup zkoušky

Motor byl uveden do chodu na automobilový benzín a byl ponechán ve volnoběžném chodu, až do jeho zahřátí na provozní teploty. Poté byla škrtková klapka nastavena na maximální otevření, což odpovídá plnému zatížení motoru. Počáteční hodnotu otáček jsem nastavil na 2000 otáček za minutu. Tyto otáčky jsem ponechal po dobu celého rozsahu hodnoty  $\lambda$ , který byl od  $\lambda=0,8$  do  $\lambda=1,2$ . Krok, se kterým jsem postupně hodnotu  $\lambda$  zvyšoval, byl 0,05. Před každým zvýšením hodnoty  $\lambda$  jsem z obrazovky pro ovládání hydrodynamické brzdy zapisoval veškeré hodnoty. Výkon a točivý moment motoru, předstih zážehu, teplotu nasávaného vzduchu a tlak vzduchu ve zkušebně, tak abych mohl změřený výkon a točivý moment přepočítat podle normy ISO, viz. kapitola 6.2.4. Pakliže se hodnoty teploty nasávaného vzduchu a teploty motoru, které jsem sledoval, odlišovaly od teplot z předchozího měření, musel jsem vyčkat do ustálení stavu, kdy rozdíl byl pouze v desetínách °C a zkoušku provést.

Po odměření celého rozsahu  $\lambda$  při daných otáčkách 2000 za minutu, jsem následně otáčky motoru zvýšil na 3000 za minutu a celé měření opakovat za stejných podmínek. Konečná hodnota otáček motoru pro toto měření byla 4000 za minutu.

Po této části zkoušky, jsem k palivovému systému motoru připojil druhé palivo E85 a celé měření v rozsahu otáček a hodnot  $\lambda$  opakovat. Nastavení řídicí jednotky jsem přizpůsobil tak, aby odpovídalo chodu motoru na toto palivo. Rozdílným nastavením byla počáteční hodnota  $\lambda$ . Ta byla nastavena na  $\lambda=0,7$ .

### 7.2.3 Naměřené hodnoty výkonnostních parametrů motoru

#### 7.2.3.1 Tabulky hodnot pro palivo BA95

##### Otáčky motoru 2000 min<sup>-1</sup>

$\lambda$	Pe [kW]	Mk [Nm]	$t_{\text{vzduchu}} [^{\circ}\text{C}]$	$P_{\text{atm}} [\text{hPa}]$	Pe <sub>iso</sub> [kW]	Mt <sub>iso</sub> [Nm]	K <sub>iso</sub>
0,80	13,47	64	23,70	967,80	13,81	65,61	1,02521
0,85	13,60	65	23,50	966,10	13,97	66,75	1,02696
0,90	13,70	65	23,30	966,10	14,06	66,73	1,02654
0,95	13,64	65	22,70	966,00	13,99	66,65	1,02542
1,00	13,41	64	23,80	966,00	13,78	65,77	1,02771
1,10	11,19	54	24,10	965,10	11,52	55,59	1,02948
1,20	10,59	49	23,50	965,10	10,89	50,38	1,02823

Tab. 14 Hodnoty ze zkoušky pro BA95 při otáčkách motoru 2000 min<sup>-1</sup>

**Otáčky motoru 3000 min<sup>-1</sup>**

$\lambda$	Pe [kW]	Mk [Nm]	$t_{\text{vzduchu}} [^{\circ}\text{C}]$	$P_{\text{atm}} [\text{hPa}]$	Pe <sub>iso</sub> [kW]	Mt <sub>iso</sub> [Nm]	K <sub>iso</sub>
0,80	22,49	75	25,10	966,60	23,16	77,22	1,02964
0,85	22,46	75	25,00	966,40	23,13	77,23	1,02969
0,90	22,84	76	24,80	966,00	23,52	78,26	1,02978
0,95	22,95	75	24,70	966,00	23,63	77,22	1,02958
1,00	22,29	74	24,40	966,00	22,94	76,14	1,02895
1,10	20,26	65	25,40	966,60	20,87	66,97	1,03026
1,20	17,18	55	25,40	966,70	17,70	56,66	1,03013

Tab. 15 Hodnoty ze zkoušky pro BA95 při otáčkách motoru 3000 min<sup>-1</sup>**Otáčky motoru 4000 min<sup>-1</sup>**

$\lambda$	Pe [kW]	Mk [Nm]	$t_{\text{vzduchu}} [^{\circ}\text{C}]$	$P_{\text{atm}} [\text{hPa}]$	Pe <sub>iso</sub> [kW]	Mt <sub>iso</sub> [Nm]	K <sub>iso</sub>
0,80	28,92	69	26,40	967,10	29,84	71,19	1,03169
0,85	29,22	70	26,30	967,10	30,14	72,20	1,03148
0,90	29,98	71	26,10	966,90	30,92	73,22	1,03132
0,95	29,31	70	26,10	966,90	30,23	72,19	1,03132
1,00	28,61	68	26,00	966,90	29,50	70,12	1,03112
1,10	25,46	61	26,40	967,10	26,27	62,93	1,03169
1,20	21,52	52	27,00	966,80	22,24	53,73	1,03331

Tab. 16 Hodnoty ze zkoušky pro BA95 při otáčkách motoru 4000 min<sup>-1</sup>**7.2.3.2 Tabulky hodnot pro palivo E85****Otáčky motoru 2000 min<sup>-1</sup>**

$\lambda$	Pe [kW]	Mk [Nm]	$t_{\text{vzduchu}} [^{\circ}\text{C}]$	$P_{\text{atm}} [\text{hPa}]$	Pe <sub>iso</sub> [kW]	Mt <sub>iso</sub> [Nm]	K <sub>iso</sub>
0,70	14,10	68	26,80	966,90	14,56	70,23	1,03277
0,75	14,43	64	26,80	966,80	14,90	66,11	1,03290
0,80	14,50	66	26,50	966,30	14,98	68,17	1,03292
0,85	14,65	65	26,40	966,90	15,12	67,08	1,03194
0,90	14,85	68	25,80	966,80	15,31	70,10	1,03083
0,95	14,73	67	25,70	966,80	15,18	69,05	1,03062
1,00	14,63	64	25,80	966,80	15,08	65,97	1,03083
1,10	14,42	57	26,70	966,80	14,89	58,86	1,03269
1,20	11,44	48	26,70	966,90	11,81	49,56	1,03256

Tab. 17 Hodnoty ze zkoušky pro E85 při otáčkách motoru 2000 min<sup>-1</sup>



**Otáčky motoru 3000 min<sup>-1</sup>**

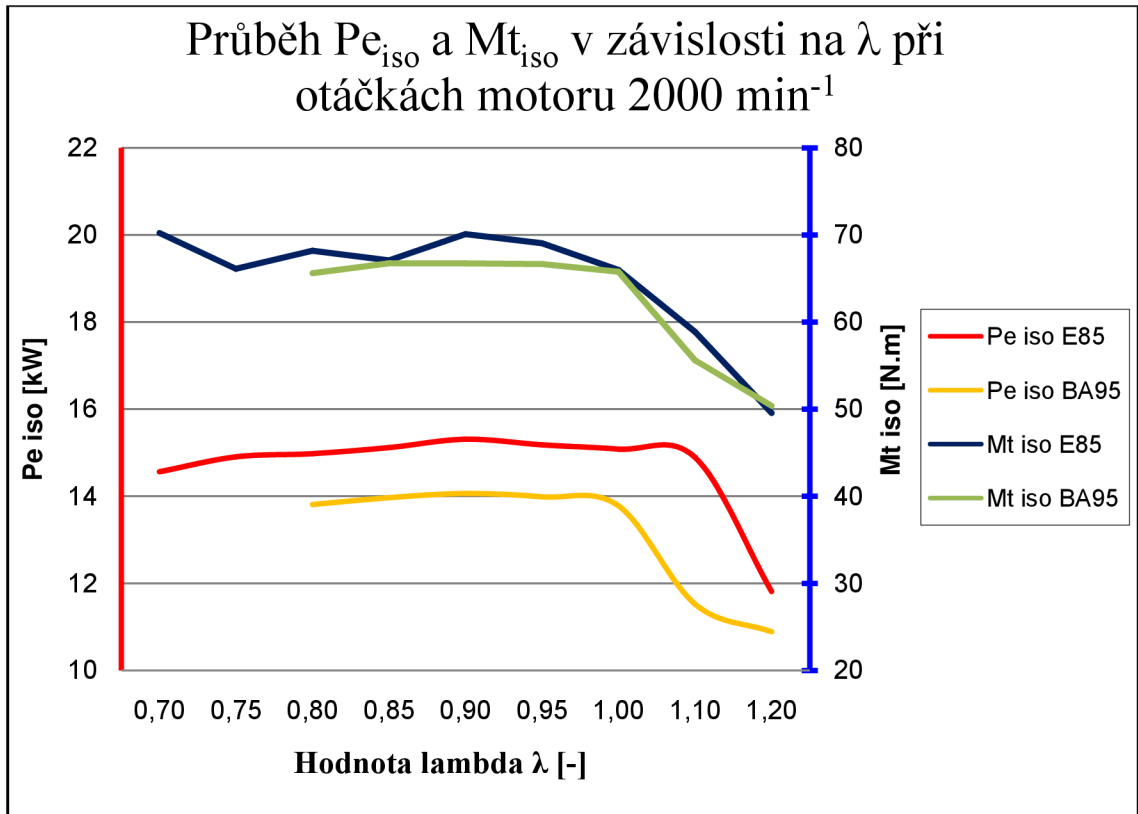
$\lambda$	Pe [kW]	Mk [Nm]	$t_{\text{vzduchu}} [^{\circ}\text{C}]$	$P_{\text{atm}} [\text{hPa}]$	Pe <sub>iso</sub> [kW]	Mt <sub>iso</sub> [Nm]	K <sub>iso</sub>
0,70	22,29	75	27,00	967,10	23,02	77,47	1,03293
0,75	23,70	76	26,80	967,10	24,47	78,47	1,03251
0,80	23,40	78	26,50	967,10	24,15	80,49	1,03189
0,85	23,87	76	27,30	967,10	24,67	78,55	1,03355
0,90	23,77	77	27,10	967,10	24,56	79,55	1,03313
0,95	23,52	75	27,10	967,10	24,30	77,49	1,03313
1,00	23,53	75	27,00	967,10	24,30	77,47	1,03293
1,10	20,69	68	27,00	967,10	21,37	70,24	1,03293
1,20	19,44	60	27,70	967,10	20,11	62,06	1,03437

Tab. 18 Hodnoty ze zkoušky pro E85 při otáčkách motoru 3000 min<sup>-1</sup>**Otáčky motoru 4000 min<sup>-1</sup>**

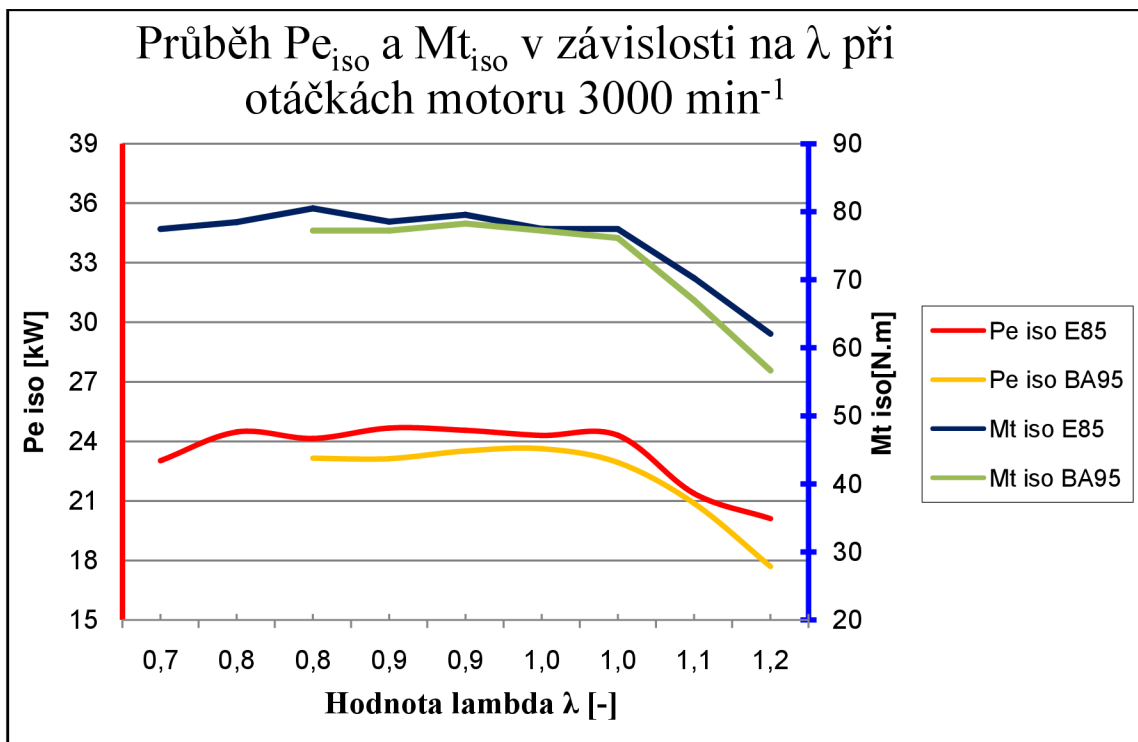
$\lambda$	Pe [kW]	Mk [Nm]	$t_{\text{vzduchu}} [^{\circ}\text{C}]$	$P_{\text{atm}} [\text{hPa}]$	Pe <sub>iso</sub> [kW]	Mt <sub>iso</sub> [Nm]	K <sub>iso</sub>
0,70	28,95	71	28,30	967,00	29,98	73,54	1,03574
0,75	29,95	73	28,10	967,00	31,01	75,58	1,03533
0,80	30,78	73	28,80	967,00	31,91	75,68	1,03677
0,85	30,50	74	28,70	967,00	31,62	76,71	1,03656
0,90	30,68	74	28,70	967,00	31,80	76,71	1,03656
0,95	30,92	75	28,50	966,90	32,04	77,72	1,03628
1,00	30,00	73	28,40	966,90	31,08	75,63	1,03607
1,10	29,62	68	28,30	966,90	30,68	70,44	1,03587
1,20	24,60	59	28,00	966,90	25,47	61,08	1,03525

Tab. 19 Hodnoty ze zkoušky pro E85 při otáčkách motoru 4000 min<sup>-1</sup>

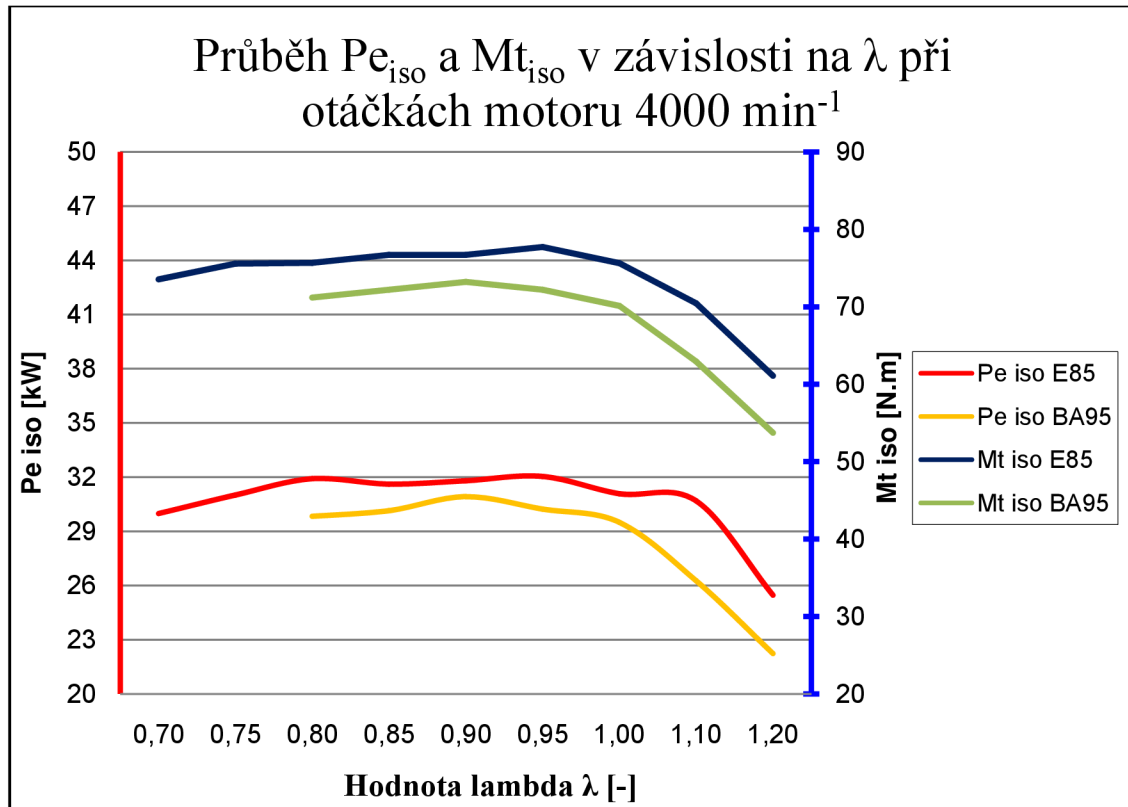
### 7.2.4 Grafické vyhodnocení zkoušky změny výkonnostních parametrů motoru v závislosti na hodnotě lambda



Graf. 3 Průběh hodnot výkonu a točivého momentu pro otáčky  $2000 \text{ min}^{-1}$  paliv E85 a BA95



Graf. 4 Průběh hodnot výkonu a točivého momentu pro otáčky  $3000 \text{ min}^{-1}$  paliv E85 a BA95



Graf. 5 Průběh hodnot výkonu a točivého momentu pro otáčky  $3000 \text{ min}^{-1}$  paliv E85 a BA95

### 7.2.5 Shrnutí výsledků zkoušky

Z této zkoušky jsem jednak porovnával získané výsledky výkonu a točivého momentu motoru, ale také ověřoval správnost přepočtu hodnoty lambda z kapitoly 6.2.2. Při spalování benzínu v motoru je pomocí řídicí jednotky korigována hodnota lambda na  $\lambda=1$ , tak aby docházelo k co nejlepšímu spalování. Ovšem při maximálním výkonu motoru je tato korekce potlačena a proto se hodnota lambda posouvá více do oblasti bohaté směsi, kolem  $\lambda=0,96$ , i za předpokladu zvýšené produkce výfukových plynů. Pokud se při spalování E85 pohybujeme kolem lambda  $\lambda=0,92$ , jakožto hodnoty, kdy je spalování nejdokonalejší, pak při maximálním výkonu se posuneme zhruba kolem hodnoty lambda  $\lambda=0,90$  až  $0,85$ .

Pro tuto zkoušku jsem zvolil krok lambda  $0,05$ . Nejde tedy přesně určit při jaké hodnotě lambda je výkon motoru maximální, ale z grafů **Graf. 3**, **Graf. 4** s **Graf. 5** dá se usuzovat, že lambda při maximálním výkonu pro palivo E85 leží okolo  $\lambda=0,85$ . Z tohoto předpokladu lze vyvodit závěr, že nastavení hodnoty lambda v řídicí jednotce pro E85 z kapitoly 6.2.2 je správné a v dalších zkouškách lze tuto hodnotu použít pro nastavení řídicí jednotky.

### 7.3 Závislost emisních prvků výfukových plynů na hodnotě lambda

Jako jedinou zkoušku ze všech jsem měření prováděl ve třech fázích. Nejprve pro benzín BA95, pak pro E85, ale s totožným nastavením řídicí jednotky jako pro BA95 a za poslední opět s E85, ale s nastavením předstihů z předchozí zkoušky v kapitole 7.1.

#### 7.3.1 Metodika zkoušky

1. Zvolit druh zkoušeného paliva BA95 nebo E85. Toto palivo připojit k palivovému systému motoru.
2. Spustit motor na volnoběžné otáčky a nulové zatížení. Vyčkat v tomto chodu motoru až do okamžiku zahřátí provozních kapalin na stanovené teploty provozu.
3. Nastavit maximální zatížení motoru a škrticí klapku otevřít na 100%.
4. Zvýšit otáčky motoru na  $2000 \text{ min}^{-1}$ .
5. Pomocí programu řídicí jednotky nastavit délku otevření vstřikovacího ventilu tak, aby na ukazateli hodnoty lambda byla nastavena počáteční hodnota měření  $\lambda=0,7$  u E85 a  $\lambda=0,8$  u BA95.
6. Vyčkat do ustálení okolních podmínek a z analyzátoru výfukových plynů zapsat hodnoty příslušných emisních prvků CO, NO<sub>x</sub>, HC a CO<sub>2</sub>.
7. Důležité pro opakovatelnost zkoušky je zapisovat si i hodnoty nasávaného vzduchu a atmosférický tlak vzduchu ve zkušební místnosti. Pro každé měření by se tyto hodnoty neměli příliš lišit.
8. Po zapsání hodnot z analyzátoru, pokračovat ve zvyšování hodnoty lambda na těchto otáčkách s krokem 0,05 až do konečné hodnoty  $\lambda=1,2$ .
9. Pro každou hodnotu lambda zapisovat množství jednotlivých prvků výfukových plynů.
10. Po odměření celého rozsahu hodnot lambda při otáčkách motoru  $2000 \text{ min}^{-1}$ , zvyšovat otáčky o  $1000 \text{ min}^{-1}$ , až do konečné hodnoty měření  $4000 \text{ min}^{-1}$  a opakovat zkoušku v bodech 1. až 9.

#### 7.3.2 Postup zkoušky

Motor byl uveden do chodu na automobilový benzín a byl ponechán ve volnoběžném chodu, až do jeho zahřátí na provozní teploty. Poté byla škrticí klapka nastavena na maximální otevření, což odpovídá plnému zatížení motoru. Počáteční hodnotu otáček jsem nastavil na 2000 otáček za minutu. Tyto otáčky jsem ponechal po dobu celého rozsahu hodnoty lambda, který byl od  $\lambda=0,8$  do  $\lambda=1,2$ . Krok, se kterým jsem postupně hodnotu lambda zvyšoval, byl 0,05. Před každým zvýšením hodnoty lambda jsem na analyzátoru výfukových plynů odečítal množství limitních prvků výfukových plynů CO, HC, NO<sub>x</sub> a CO<sub>2</sub>. S těmito hodnotami jsem sledoval i teplotu nasávaného vzduchu a teplotu motoru, a pakliže se odlišovaly od teplot z předchozího měření, musel jsem vyčkat až do chvíle, kdy rozdíl byl pouze v desetínách °C.

Po zkušebním měření celého rozsahu lambda při daných otáčkách 2000 za minutu, jsem následně otáčky motoru zvýšil na 3000 za minutu a celé měření opakovat za stejných podmínek. Konečná hodnota otáček motoru pro toto měření byla 4000 za minutu.

Po této části zkoušky, jsem k palivovému systému motoru připojil druhé palivo E85 a celé měření v rozsahu otáček a hodnot lambdy opakoval. Rozdílným nastavením byla počáteční hodnota lambda. Ta byla nastavena na  $\lambda=0,7$ . Tuto zkoušku jsem s palivem E85 provedl dvakrát. Poprvé s identickým nastavením řídicí jednotky jako pro BA95, tak aby byl viditelný rozdíl výsledných hodnot pouze za předpokladu změny paliva. Druhé měření s tímto palivem bylo pro nastavení hodnot řídicí jednotky odpovídající optimálnímu nastavení pro etanolové palivo E85 zjištění ze zkoušky v kapitole 7.1. Výsledný rozdíl je patrný na grafickém vyhodnocení.

### 7.3.3 Naměřené hodnoty zkoušky

#### 7.3.3.1 Tabulky hodnot pro palivo natural 95

##### Otáčky motoru 2000 min<sup>-1</sup>

$\lambda$	CO [%obj.]	HC [ppm]	NO <sub>x</sub> [ppm]	CO <sub>2</sub> [%obj.]
0,80	7,236	350	222	10,50
0,85	5,498	291	388	11,56
0,90	2,998	238	973	13,06
0,95	1,459	176	1765	13,90
1,00	0,753	147	2164	14,52
1,10	0,167	108	2256	13,69
1,20	0,148	54	708	12,67

Tab. 20 Hodnoty zkoušky pro otáčky motoru 2000 min<sup>-1</sup> a palivo natural 95

##### Otáčky motoru 3000 min<sup>-1</sup>

$\lambda$	CO [%obj.]	HC [ppm]	NO <sub>x</sub> [ppm]	CO <sub>2</sub> [%obj.]
0,80	7,696	292	273	10,22
0,85	5,721	233	541	11,30
0,90	3,598	212	1128	12,78
0,95	2,135	182	1793	13,67
1,00	0,172	128	3218	14,43
1,10	0,141	100	2704	13,55
1,20	0,150	53	1079	12,43

Tab. 21 Hodnoty zkoušky pro otáčky motoru 3000 min<sup>-1</sup> a palivo natural 95

**Otáčky motoru 4000 min<sup>-1</sup>**

$\lambda$	CO [%obj.]	HC [ppm]	NO <sub>x</sub> [ppm]	CO <sub>2</sub> [%obj.]
0,80	7,578	230	323	10,29
0,85	5,574	196	607	11,55
0,90	3,870	187	1046	12,59
0,95	2,158	156	2029	13,79
1,00	0,419	138	3072	14,57
1,10	0,146	70	2945	13,70
1,20	0,133	47	1337	12,64

Tab. 22 Hodnoty zkoušky pro otáčky motoru 4000 min<sup>-1</sup> a palivo natural 95**7.3.3.2 Tabulky hodnot pro palivo E85 s původním nastavením řídicí jednotky pro benzín BA95 z předchozí části zkoušky****Otáčky motoru 2000 min<sup>-1</sup>**

$\lambda$	CO [%obj.]	HC [ppm]	NO <sub>x</sub> [ppm]	CO <sub>2</sub> [%obj.]
0,70	9,407	307	42	8,88
0,75	8,446	287	83	9,54
0,80	7,124	261	85	10,40
0,85	5,169	230	214	11,77
0,90	3,498	151	562	12,54
0,95	1,451	126	1262	13,85
1,00	0,575	153	1899	14,28
1,10	0,163	140	906	13,07
1,20	0,127	162	290	12,00

Tab. 23 Hodnoty zkoušky pro otáčky motoru 2000 min<sup>-1</sup> a palivo E85**Otáčky motoru 3000 min<sup>-1</sup>**

$\lambda$	CO [%obj.]	HC [ppm]	NO <sub>x</sub> [ppm]	CO <sub>2</sub> [%obj.]
0,70	9,503	539	42	8,21
0,75	8,286	523	112	9,51
0,80	6,493	513	199	10,69
0,85	4,900	206	430	11,71
0,90	2,987	192	959	12,93
0,95	1,753	171	1602	13,58
1,00	0,476	170	2156	14,18
1,10	0,128	306	2041	13,26
1,20	0,140	366	776	12,04

Tab. 24 hodnoty zkoušky pro otáčky motoru 3000 min<sup>-1</sup> a palivo E85

**Otáčky motoru 4000 min<sup>-1</sup>**

$\lambda$	CO [%obj.]	HC [ppm]	NO <sub>x</sub> [ppm]	CO <sub>2</sub> [%obj.]
0,70	11,130	320	127	7,48
0,75	8,627	278	181	9,40
0,80	6,990	280	286	10,39
0,85	5,095	275	526	11,59
0,90	3,180	275	919	12,66
0,95	1,598	261	1769	13,74
1,00	0,446	246	2463	14,30
1,10	0,141	213	2235	13,51
1,20	0,135	214	975	12,24

Tab. 25 Hodnoty zkoušky pro otáčky motoru 4000 min<sup>-1</sup> a palivo E85**7.3.3.3 Tabulky hodnot pro palivo E85 s nastavením řídicí jednotky pro toto palivo****Otáčky motoru 2000 min<sup>-1</sup>**

$\lambda$	CO [%obj.]	HC [ppm]	NO <sub>x</sub> [ppm]	CO <sub>2</sub> [%obj.]
0,70	9,258	232	71	8,93
0,75	8,369	276	70	9,53
0,80	6,949	288	128	10,38
0,85	5,309	258	319	11,56
0,90	3,372	265	798	12,65
0,95	1,834	252	1734	13,65
1,00	0,522	240	2436	14,13
1,10	0,163	140	1652	13,07
1,20	0,110	171	985	11,77

Tab. 26 Hodnoty zkoušky pro otáčky motoru 2000 min<sup>-1</sup> a palivo E85 s optimálním nastavením Ř.J.**Otáčky motoru 3000 min<sup>-1</sup>**

$\lambda$	CO [%obj.]	HC [ppm]	NO <sub>x</sub> [ppm]	CO <sub>2</sub> [%obj.]
0,70	9,503	539	42	8,21
0,75	8,422	230	178	9,50
0,80	6,911	176	323	10,42
0,85	5,050	166	599	11,50
0,90	3,208	148	1246	12,73
0,95	1,685	145	2209	13,62
1,00	0,622	154	3034	14,07
1,10	0,128	148	2545	13,26
1,20	0,101	136	1979	12,04

Tab. 27 Hodnoty zkoušky pro otáčky motoru 3000 min<sup>-1</sup> a palivo E85 s optimálním nastavením Ř.J.

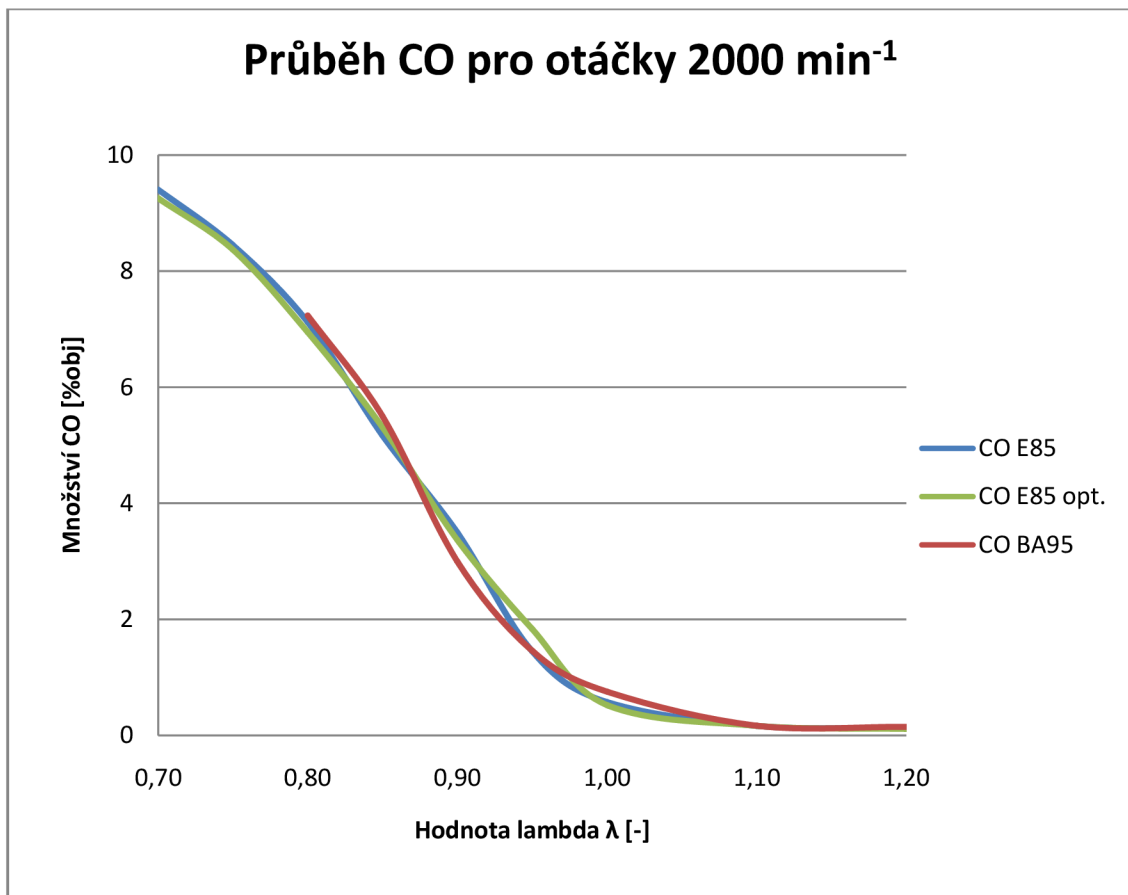
**Otáčky motoru 4000 min<sup>-1</sup>**

$\lambda$	CO [%obj.]	HC [ppm]	NO <sub>x</sub> [ppm]	CO <sub>2</sub> [%obj.]
0,70	11,130	320	127	7,48
0,75	8,540	206	153	9,47
0,80	7,043	196	250	10,42
0,85	5,182	180	538	11,56
0,90	3,201	171	1108	12,68
0,95	1,787	153	1965	13,58
1,00	0,590	130	2978	14,21
1,10	0,141	121	2435	13,51
1,20	0,118	87	1685	12,12

Tab. 28 Hodnoty zkoušky pro otáčky motoru 4000 min<sup>-1</sup> a palivo E85 s optimálním nastavením Ř.J.

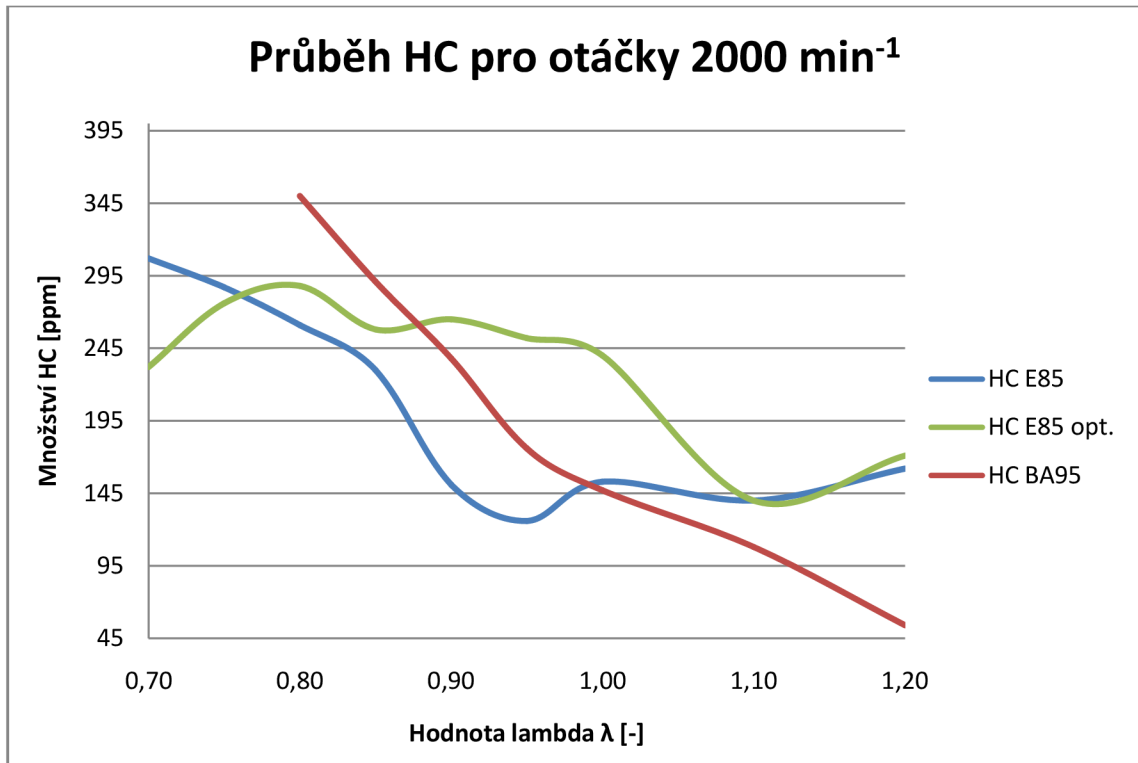
### 7.3.4 Grafické vyhodnocení zkoušky závislosti emisních prvků výfukových plynů na hodnotě lambda

#### 7.3.4.1 Vyhodnocení hodnot jednotlivých emisních prvků výfukových plynů při otáčkách motoru 2000 min<sup>-1</sup>

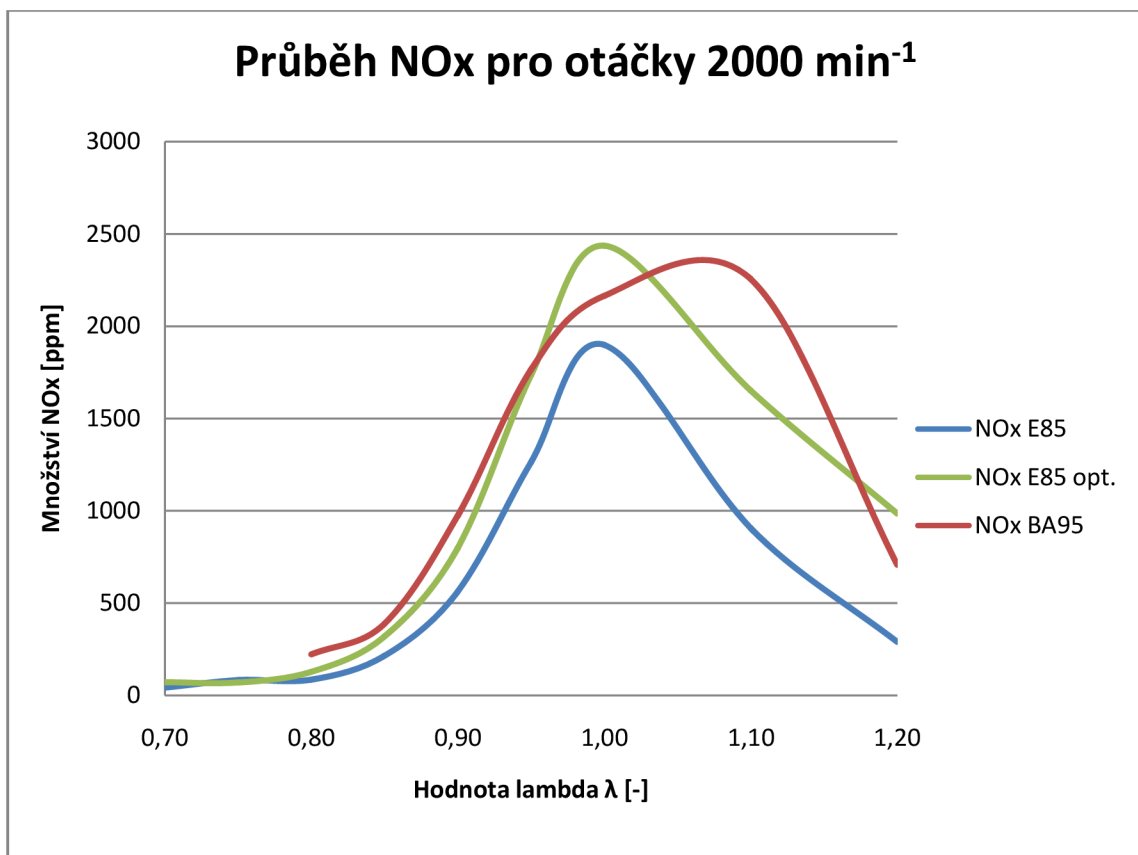


Graf. 6 Průběh množství CO paliv E85 a BA95 při otáčkách motoru 2000 min<sup>-1</sup>

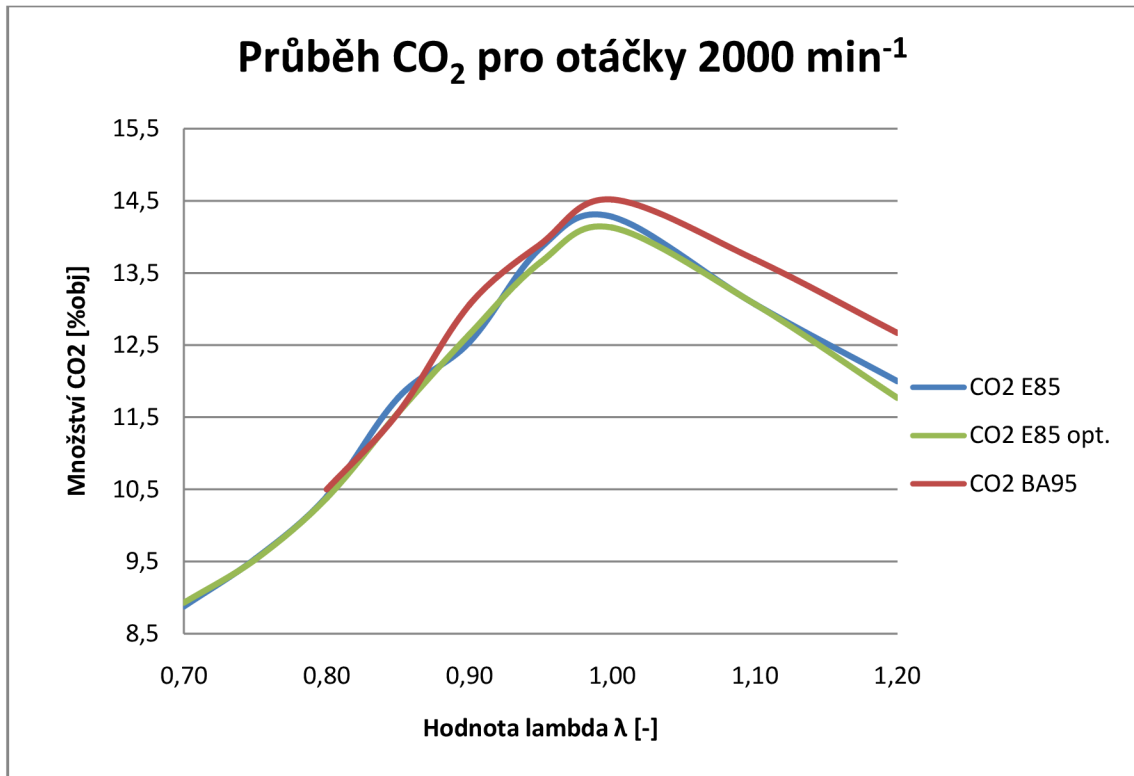




Graf. 7 Průběh množství HC paliv E85 a BA95 při otáčkách motoru 2000 min<sup>-1</sup>

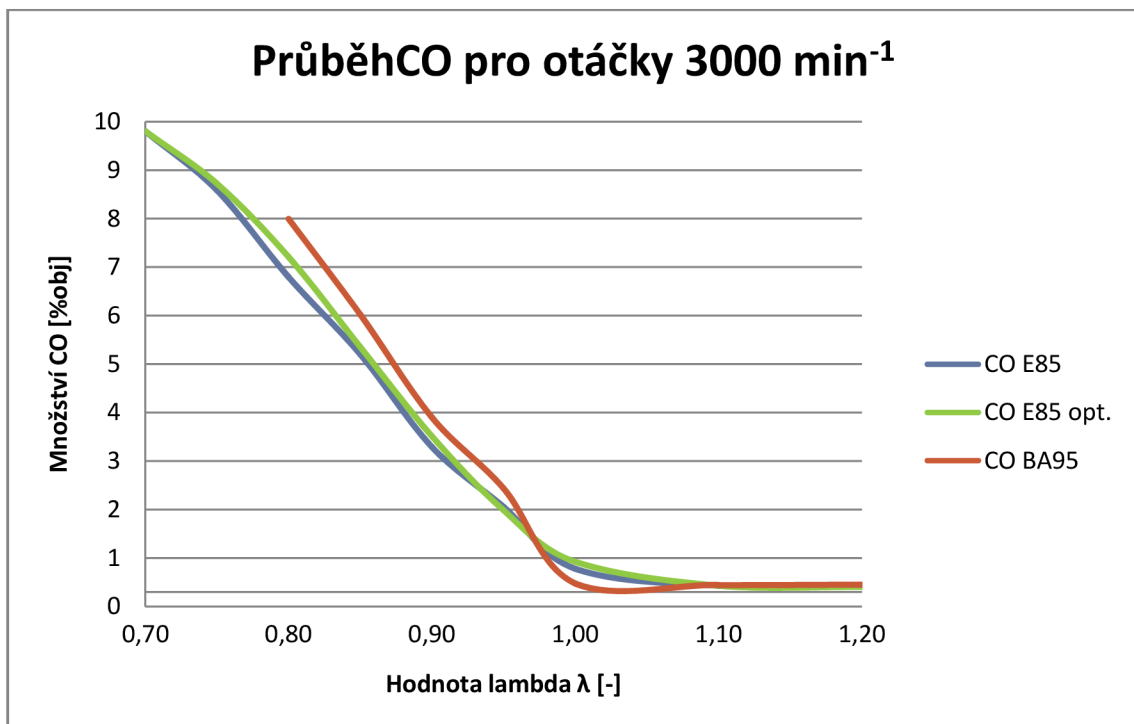


Graf. 8 Průběh množství NOx paliv E85 a BA95 při otáčkách motoru 2000 min<sup>-1</sup>

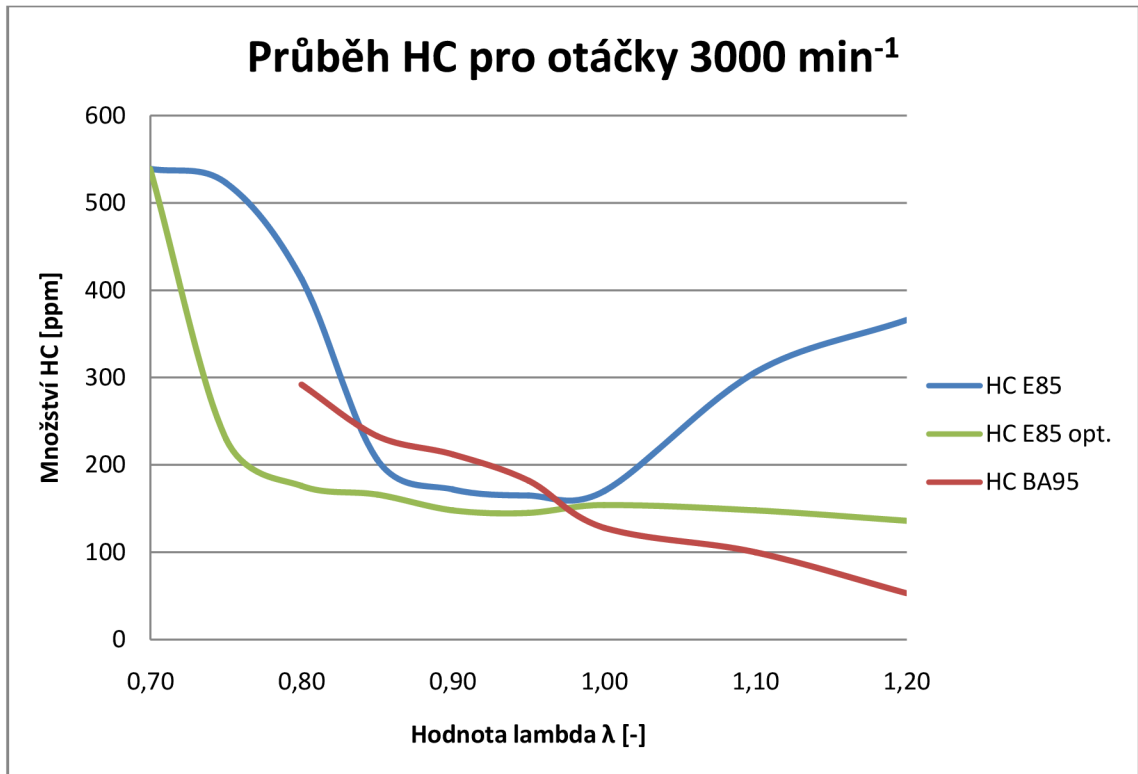


Graf. 9 Průběh množství CO<sub>2</sub> paliv E85 a BA95 při otáčkách motoru 2000 min<sup>-1</sup>

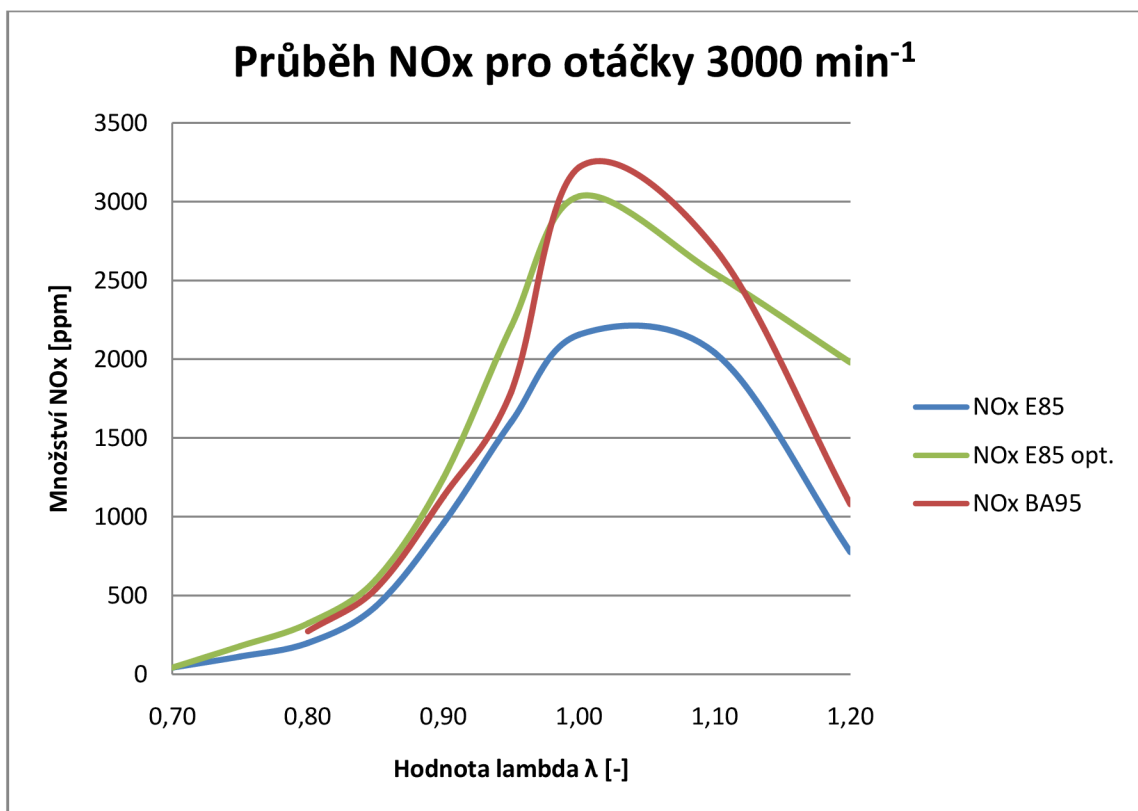
#### 7.3.4.2 Vyhodnocení hodnot jednotlivých emisních prvků výfukových plynů při otáčkách motoru 3000 min<sup>-1</sup>



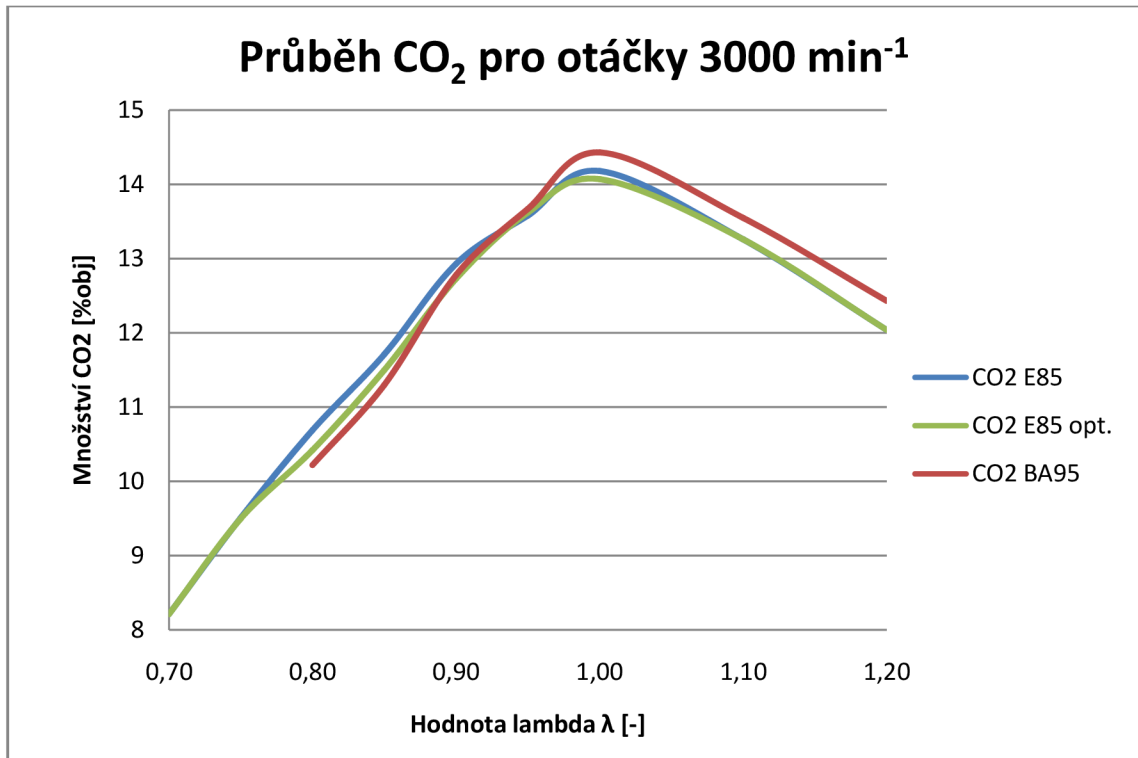
Graf. 10 Průběh množství CO paliv E85 a BA95 při otáčkách motoru 3000 min<sup>-1</sup>



Graf. 11 Průběh množství HC paliv E85 a BA95 při otáčkách motoru 3000 min<sup>-1</sup>

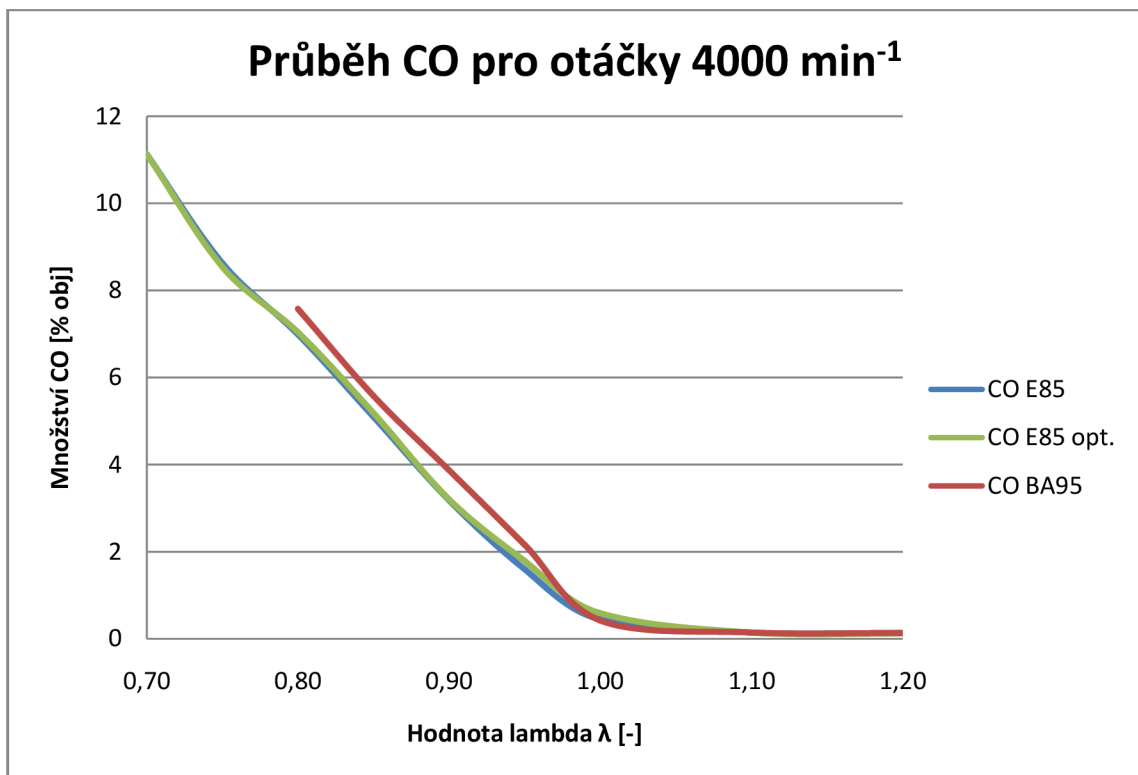


Graf. 12 Průběh množství NOx paliv E85 a BA95 při otáčkách motoru 3000 min<sup>-1</sup>

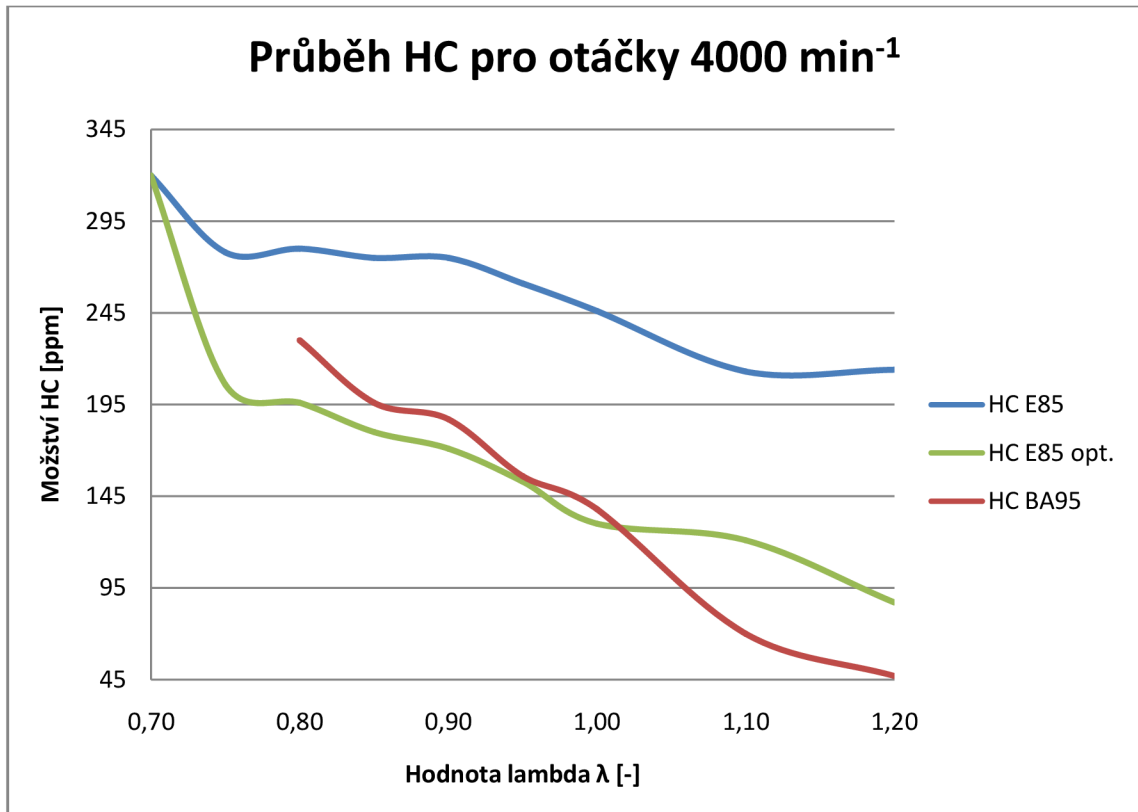


Graf. 13 Průběh množství CO<sub>2</sub> paliv E85 a BA95 při otáčkách motoru 3000 min<sup>-1</sup>

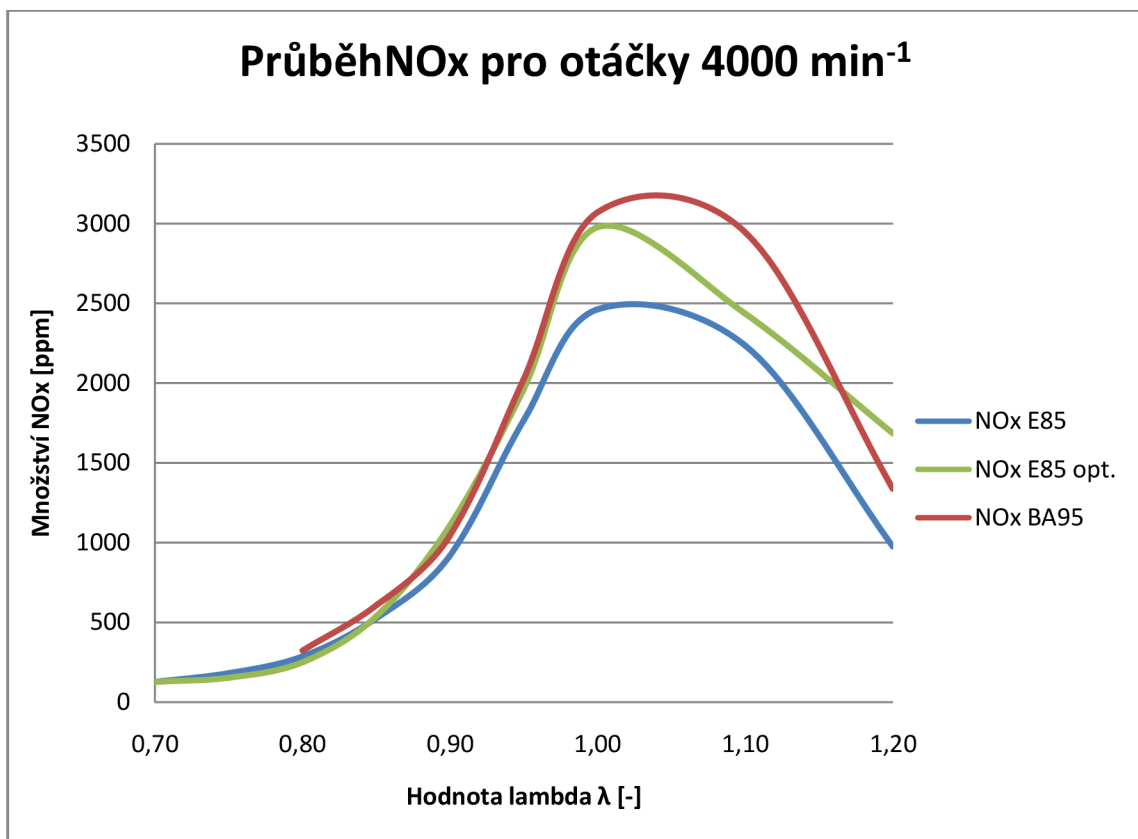
#### 7.3.4.3 Vyhodnocení hodnot jednotlivých emisních prvků výfukových plynů při otáčkách motoru 4000 min<sup>-1</sup>



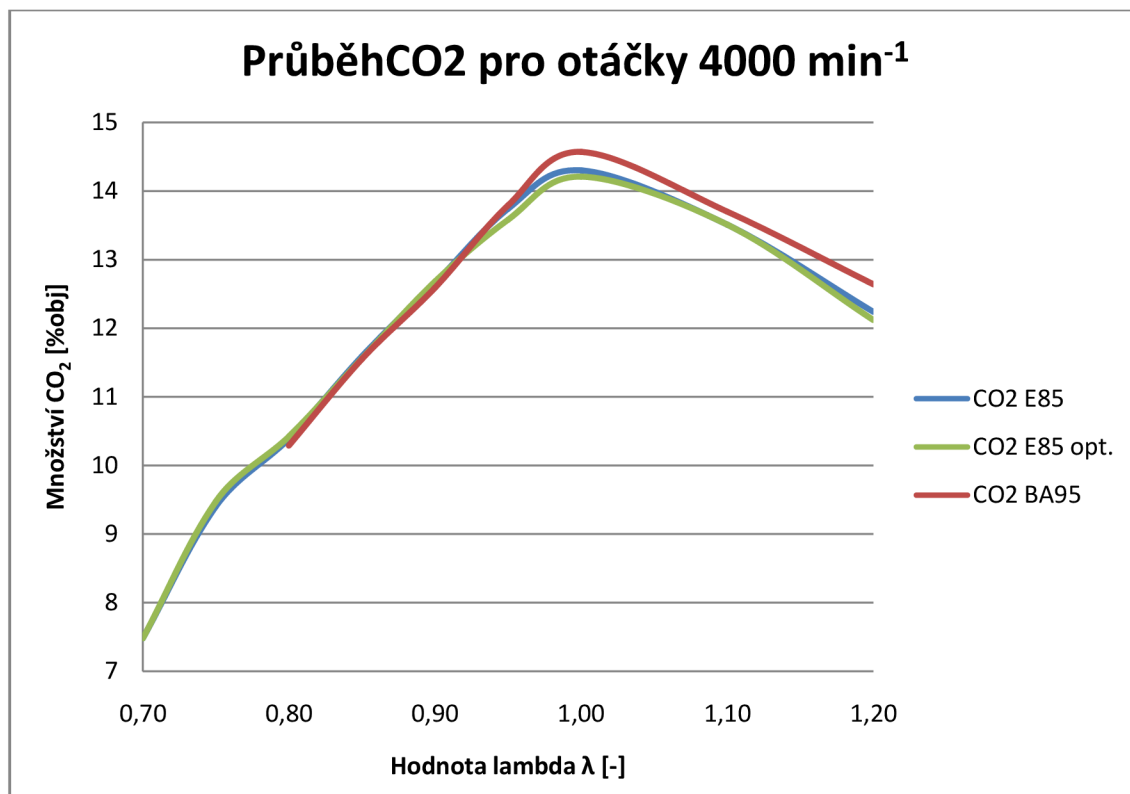
Graf. 14 Průběh množství CO paliv E85 a BA95 při otáčkách motoru 4000 min<sup>-1</sup>



Graf. 15 Průběh množství HC paliv E85 a BA95 při otáčkách motoru 4000 min<sup>-1</sup>



Graf. 16 Průběh množství NOx paliv E85 a BA95 při otáčkách motoru 4000 min<sup>-1</sup>



Graf. 17 Průběh množství CO<sub>2</sub> paliv E85 a BA95 při otáčkách motoru 4000 min<sup>-1</sup>

### 7.3.5 Shrnutí výsledků zkoušky

Tato zkouška byla provedena ve třech měřeních. Poprvé pro automobilový benzín natural 95 a následně dvakrát pro palivo E85.

Etanolvé palivo E85 bylo měřeno nejprve pro nastavení řídicí jednotky odpovídající parametrům naturalu 95. Tak aby bylo zřejmé, jak se změni výsledky zkoušky, pakliže se při stejném nastavení motoru, změni pouze dané palivo. Samozřejmě, aby nebyla zkouška ovlivněna nižší výhřevností paliva E85, bylo nutné docílit stejné výhřevnosti zvýšením dodávky paliva E85 o 30% oproti dodávce BA95. Tento rozdíl vstříkovaného paliva do spalovacího prostoru je patrný na grafech **Graf. 7**, **Graf. 11** a **Graf. 15**. Na těchto grafech je průběh nespálených uhlovodíků. Kvůli vyšší dodávce paliva je i produkce HC ve výfukových plynech u E85 o něco vyšší než u BA95.

Druhé měření s palivem E85 bylo provedeno po přenastavení parametrů řídicí jednotky, odpovídající za daných podmínek optimálnímu nastavení pro toto palivo. Změna byla provedena především v načtení jiných hodnot předstihů zážehu směsi z prvního měření v kapitole 7.1 do řídicí jednotky motoru.

Z grafů průběhu množství CO **Graf. 6**, **Graf. 10** a **Graf. 14** je patrné, že všechny tři průběhy jsou prakticky totožné, liší se pouze v malých hodnotách. Ani rozdílné nastavení u E85, které v předchozím měření ukázalo, že výkon motoru se změnou

předstihu vzrostl, v této zkoušce nijak velkou roli nehraje. Takovýto závěr lze stanovit i u průběhů  $\text{CO}_2$  **Graf. 9**, **Graf. 13** a **Graf. 17**, kde všechny tři průběhy mají velmi podobný tvar a jednotlivé množství se od sebe liší v malé míře. U těchto dvou plynů v celém měřicím rozsahu otáček je zajímavé pozorovat, jak se i přes zvýšenou spotřebu paliva E85 oproti BA95 množství ve výfukových plynech výrazně neliší. Je tedy zřejmé, že pokud by se nám povedlo snížit spotřebu E85, dosáhli bychom i snížení těchto dvou emisních prvků výfukových plynů. Rychlost hoření a dostatek kyslíku u E85 dokázalo vyrovnat množství CO a  $\text{CO}_2$  na hodnotu naturalu 95 i za předpokladu vyšší spotřeby paliva E85 o 30% oproti benzínu.

Z průběhů grafů  $\text{NO}_x$  **Graf. 8**, **Graf. 12** a **Graf. 16**, je viditelný významný rozdíl v jednotlivých množstvích produkovaného  $\text{NO}_x$ . Oxidy dusíku vznikají při vysokých teplotách, což znamená, že čím je teplota hoření vyšší, tím i více  $\text{NO}_x$  vznikne. Etanol, potažmo E85 má velikou výhodu ve vysokém výparném teplu, které je oproti benzínu zhruba dvakrát vyšší. Tato vlastnost způsobí, že při odpařování E85 v sání a spalovacím prostoru je nutné spotřebovat pro odpaření E85 více tepla z okolí, tím dojde ke snížení teploty celého prostoru a po shoření směsi E85 a vzduchu k celkově nižší teplotě. Ve zkoušce vychází podle těchto tří grafů nejlépe E85 s nastavením předstihů pro BA95. Je to dáno právě tím, že zážeh směsi je později než by mělo být optimum. Proto se etanol v palivo E85 může delší dobu odpařovat a odebírat tím okolní teplo. Při optimálním nastavení předstihů, je směs zažehnuta dříve, proto i vývin tepla začíná dříve. Z hlediska množství emitovaného  $\text{NO}_x$  je tedy výhodnější použít při spalování E85 nastavení totožné jako u benzínu, ale z hlediska výkonnostních parametrů je výhodnější optimální nastavení parametrů řídicí jednotky pro palivo E85.

## 7.4 Měření emisí výfukových plynů

Po přípravě stanoviště jsem provedl měření emisí výfukových plynů motoru za podmínek, které odpovídaly nejlepšímu možnému nastavení řídicí jednotky pro daná paliva. Analyzoval jsem prvky ve výfukových plynech zkušebního motoru v celém rozsahu jeho otáček. Měření jsem provedl pro automobilový benzín BA95 a etanolové palivo E85.

### 7.4.1 Metodika zkoušky

1. Zvolit druh zkoušeného paliva BA95 nebo E85. Zvolené palivo připojit k palivovému systému motoru.
2. Nastavit řídicí jednotku na zvolené palivo.
3. Spustit motor na volnoběžné otáčky a minimální zatížení. Vyčkat v tomto chodu motoru až do okamžiku zahřátí provozních kapalin na stanovené teploty provozu.
4. Nastavit autoregulaci množství dodávaného paliva tak, aby hodnota lambda byla rovna jedné pro benzín a pro E85 lambda rovna 0,92.
5. Zvýšit otáčky motoru na  $1500 \text{ min}^{-1}$ .
6. Nastavit maximální zatížení motoru, tedy škrticí klapku otevřít na 100%.

7. Vyčkat do ustálení okolních podmínek a z analyzátoru výfukových plynů zapsat hodnoty příslušných emisních prvků CO, NO<sub>x</sub>, HC a CO<sub>2</sub>.
8. Důležité pro opakovatelnost zkoušky je zapisovat si i hodnoty nasávaného vzduchu a atmosférický tlak vzduchu ve zkušební místnosti. Pro každé otáčky by se tyto hodnoty neměly příliš lišit.
9. Zvýšit otáčky motoru o 500 min<sup>-1</sup>.
10. Zapsat hodnoty prvků výfukových plynů.
11. Takto postupovat až do maximálních otáček motoru 5500 min<sup>-1</sup>.
12. Po odzkoušení jednoho paliva připojit k palivovému systému motoru druhé palivo, zvolit mapu řídicí jednotky pro dané palivo a postupovat identicky podle bodů 1. až 11.

#### 7.4.2 Postup zkoušky

První měření jsem provedl pro palivo benzín natural 95. Po nastartování motoru, jsem pomocí počítače zvolil takzvanou mapu řídicí jednotky. Tato mapa obsahuje údaje, pro chod motoru. Řídicí jednotka pomocí těchto dat, ovládá motor a přizpůsobuje jeho chod pro dané podmínky. Motor jsem nechal chvíli běžet naprázdno, aby se provozní kapaliny zahřály na provozní teplotu.

Zapnul jsem takzvanou auto regulaci, což znamená, že řídicí jednotka si automaticky doreguluje délku otevření vstřikovacího ventilu tak, aby docházelo k co nejideálnějšímu spalování, které odpovídá právě hodnotě  $\lambda=1$ . Po zahřátí motoru jsem nastavil otáčky motoru na hodnotu 1500 otáček za minutu a škrtkicí klapku otevřel na maximum, tak aby zatížení motoru bylo také maximální.

Hodnotu otáček jsem měnil od 1500 do 5500 otáček za minutu s krokem po 500 otáček za minutu. Při každé nastavené hodnotě otáček a po ustálení teploty motoru, jsem z analyzátoru výfukových plynů zapisoval množství jednotlivých složek (CO, HC, NO<sub>x</sub> a CO<sub>2</sub>). Po skončení měření naturalu 95 jsem motor vypnul, od palivového systému jsem toto palivo odpojil a připojil E85.

Motor jsem po připojení E85 k palivovému systému nastartoval. Nastavení řídicí jednotky bylo změněno, tak aby chod motoru na E85 byl co možná nejvíce blízký optimálnímu nastavené za daných podmínek. Informace, které slouží řídicí jednotce k řízení chodu motoru pro palivo E85 jsem získal z prvotních testovacích měření, které jsou popsány v kapitole 7.1 a 7.2.

Tuto zkoušku jsem opět začal při otáčkách motoru 1500 za minutu a po ustálení chodu motoru jsem si zapsal hodnoty z analyzátoru výfukových plynů. Následně jsem zvýšil otáčky motoru o 500 za minutu a měření opakoval až do otáček 5500 za minutu.

Bylo důležité sledovat hodnoty teplot motoru a nasávaného vzduchu, aby bylo možné přesně opakovat měření a srovnávat tak hodnoty při stejných podmínkách. Pakliže v průběhu zkoušky došlo k zahřátí okolního prostoru vlivem vysoké teploty motoru, bylo nutné motor na určitou dobu vypnout a počkat, až se hodnota vzduchu ve zkušební místnosti opět ustálila a pokračovat ve zkoušce.



### 7.4.3 Naměřené hodnoty emisních prvků

#### 7.4.3.1 Tabulka hodnot pro palivo natural 95

Otáčky motoru [ $\text{min}^{-1}$ ]	CO [%obj]	HC [ppm]	NO <sub>x</sub> [ppm]	CO <sub>2</sub> [%obj]
1500	4,741	317	1939	14,12
2000	4,273	207	2058	14,31
2500	3,666	164	2223	14,38
3000	3,939	163	2748	14,31
3500	4,052	155	2439	14,27
4000	3,850	137	2569	14,35
4500	3,810	109	2989	14,41
5000	3,625	80	2840	14,43
5500	3,660	65	2850	14,44

Tab. 29 Hodnoty emisních prvků výfukových plynů v závislosti na otáčkách motoru pro BA95

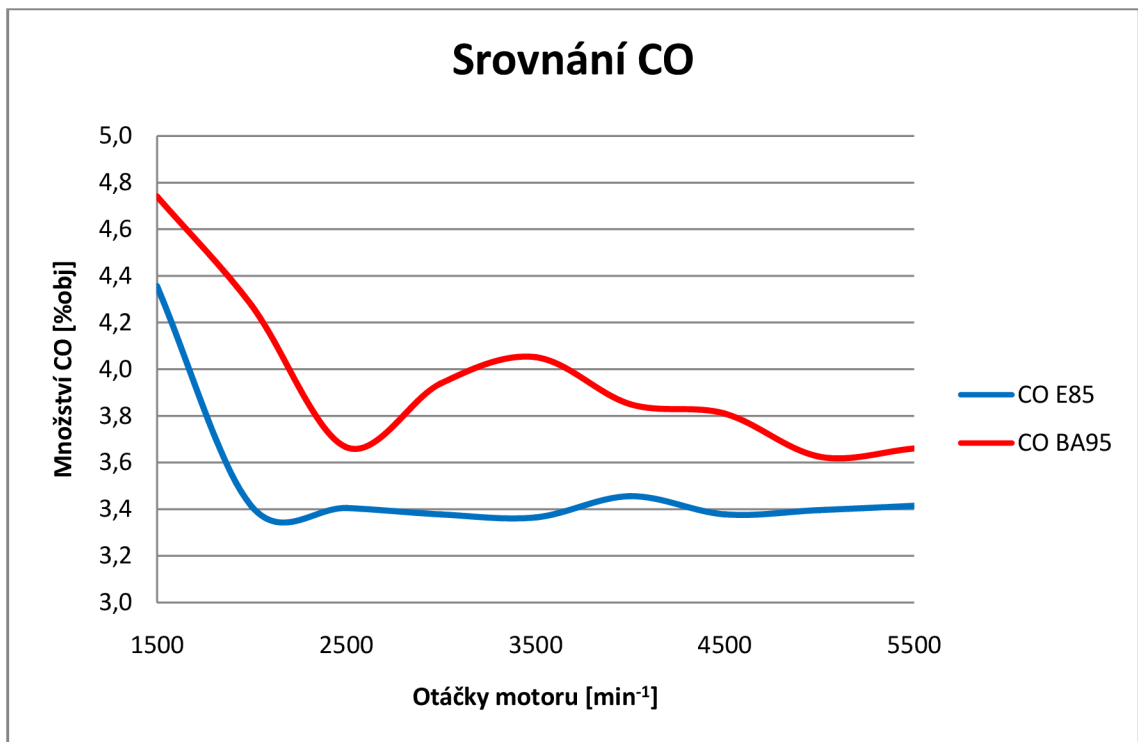
#### 7.4.3.2 Tabulka hodnot pro palivo E85

Otáčky motoru [ $\text{min}^{-1}$ ]	CO [%obj]	HC [ppm]	NO <sub>x</sub> [ppm]	CO <sub>2</sub> [%obj]
1500	4,356	205	832	12,65
2000	3,412	172	847	12,7
2500	3,405	185	1156	12,21
3000	3,378	193	1240	12,76
3500	3,365	165	1121	12,65
4000	3,456	141	1089	12,69
4500	3,378	135	1265	12,87
5000	3,396	122	1356	12,45
5500	3,415	75	1368	12,54

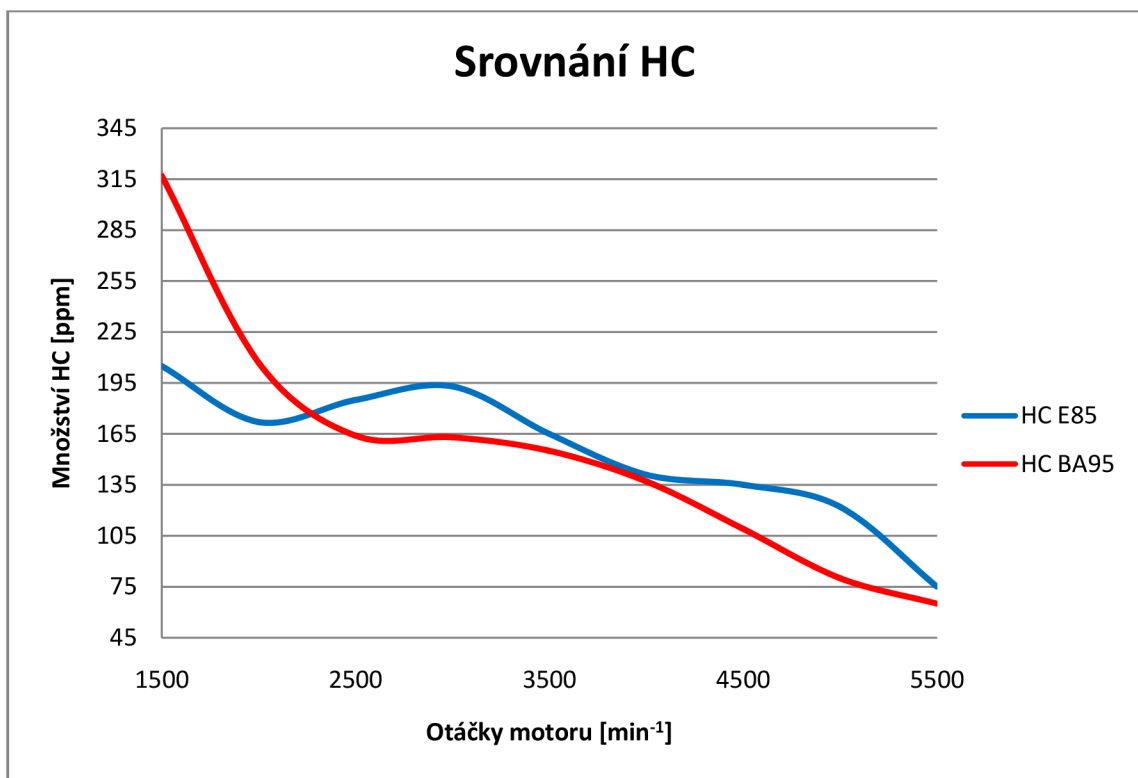
Tab. 30 Hodnoty emisních prvků výfukových plynů v závislosti na otáčkách motoru pro E85

#### 7.4.4 Grafické vyhodnocení zkoušky emisí výfukových plynů

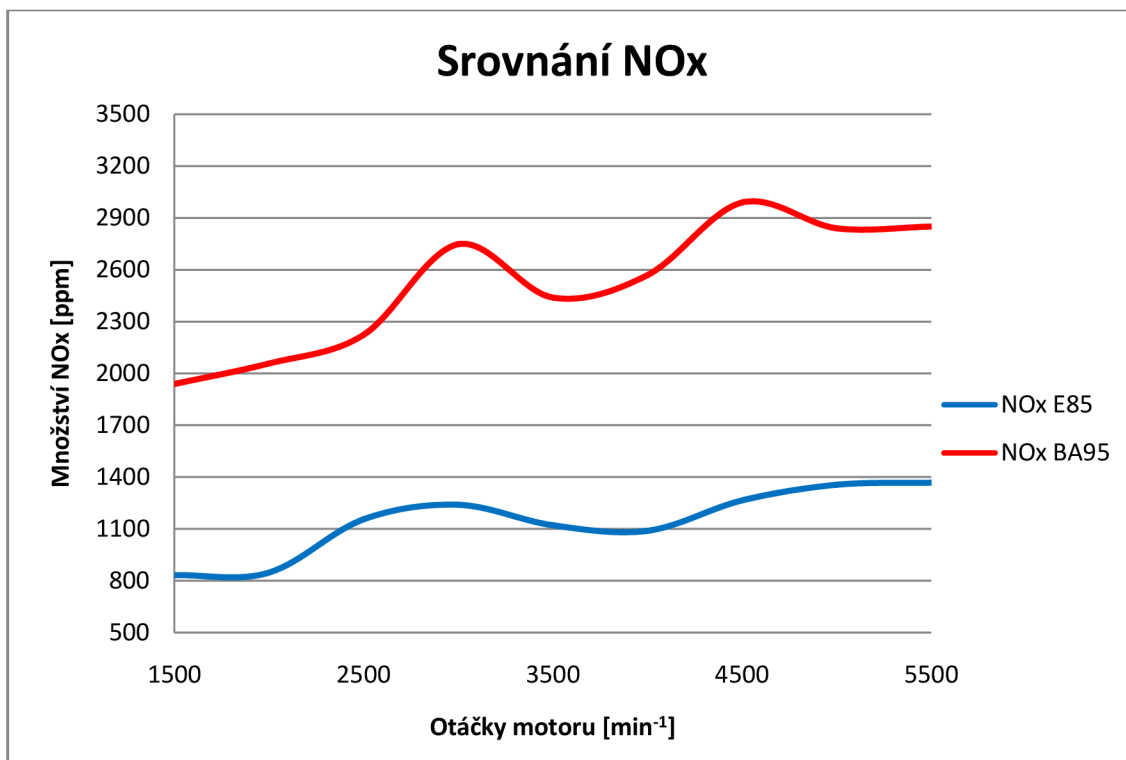
##### 7.4.4.1 Vyhodnocení jednotlivých složek výfukových plynů BA95 a E85



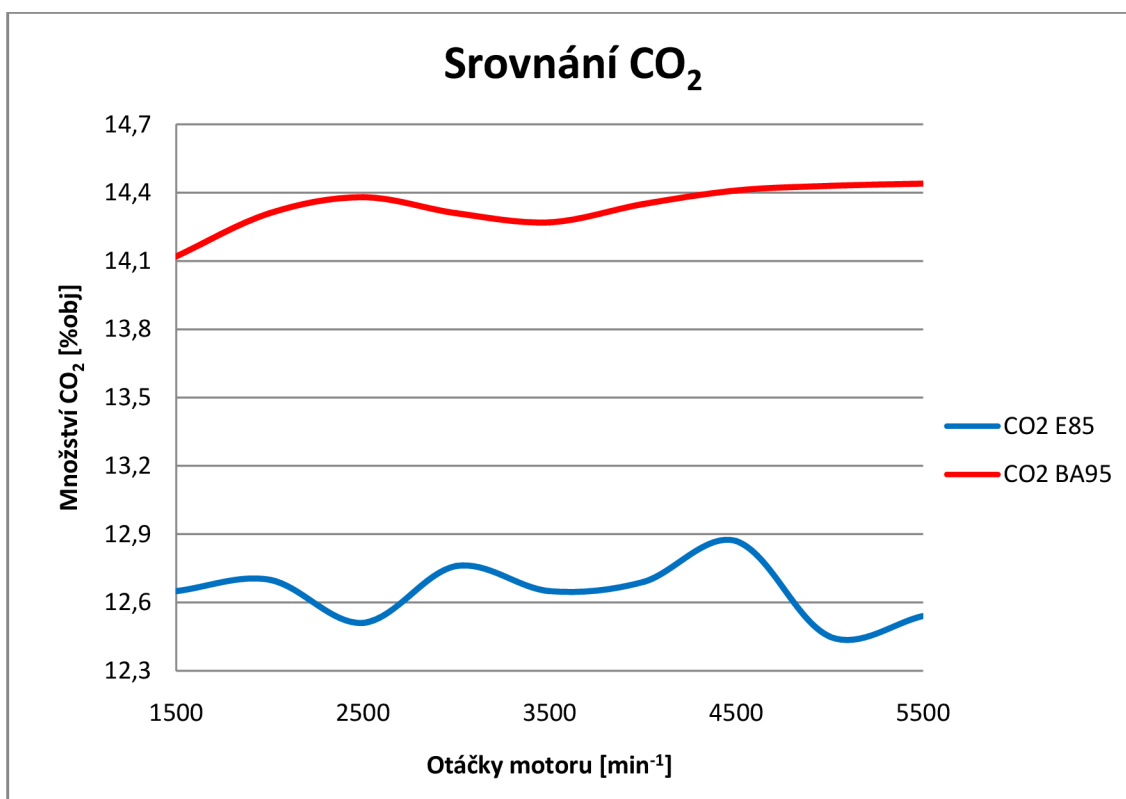
Graf. 18 Srovnání průběhu množství CO ve výfukových plynech BA95 a E85



Graf. 19 Srovnání průběhu množství HC ve výfukových plynech BA95 a E85



Graf. 20 Srovnání průběhu množství NOx ve výfukových plynech BA95 a E85



Graf. 21 Srovnání Průběhu množství CO<sub>2</sub> ve výfukových plynech BA95 a E85

#### 7.4.5 Shrnutí výsledků zkoušky

Výsledkem této zkoušky je porovnání jednotlivých emisních prvků výfukových plynů. Z analyzátoru jsem pro celé otáčkové spektrum motoru jímá CO, CO<sub>2</sub>, HC a NO<sub>x</sub>. Obě paliva BA95 i E85 byly spalovány v motoru za co nejpříznivějších podmínek. To znamená, že pro každé palivo jsem zvolil nastavení řídicí jednotky tak, aby za daných podmínek umožňovalo co nejefektivněji využít vlastnosti paliva.

Z grafů **Graf. 20** a **Graf. 21** je patrný velký rozdíl z množství NO<sub>x</sub> a CO<sub>2</sub> obsažené ve výfukových plynech. V těchto dvou případech je výrazně menší množství po spálení E85 než po spálení BA95. Tvorba NO<sub>x</sub> u E85 je opět snížena jeho schopností ochlazovat spalovací prostor. Tvorba CO<sub>2</sub> je pro změnu u E85 snížena díky dostatečnému množství kyslíku přivedeného k procesu hoření, to znamená, že uhlík obsažený v etanolu a vzdušný kyslík mohou mezi sebou reagovat a dát vzniku CO<sub>2</sub>. Snížit tvorbu CO<sub>2</sub> lze používáním paliv, které neobsahují velké množství uhlíku, například čistý vodík. Chemický vzorec benzínu je C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, tedy tři molekuly uhlíku. Etanol má pouze dvě molekuly.

Z grafu **Graf. 18** je pozorovatelný nárůst produkce CO při spalování BA95. Množství CO ve výfukových plynech naznačuje nedokonalé spalování, to zapříčiňuje, že se dva atomy uhlíku spojí s kyslíkem a vzniknou dvě molekuly CO. Tento prvek je pro lidské tělo velmi nebezpečný, protože se váže na hemoglobin mnohem rychleji než kyslík. To může při vyšší koncentraci způsobit udušení člověka. Tvary všech průběhů produkovaných plynů si jsou velmi podobné.

### 7.5 Vnější otáčková charakteristika

Při této zkoušce mezi sebou budu porovnávat výkonnostní parametry motoru 1.0 MPI. V celém spektru otáček budu zjišťovat hodnoty výkonu a točivého momentu pro obě paliva BA95 a E85.

#### 7.5.1 Metodika zkoušky

1. Zvolit druh zkoušeného paliva BA95 nebo E85. Zvolené palivo připojit k palivovému systému motoru.
2. Nastavit řídicí jednotku na zvolené palivo.
3. Spustit motor na volnoběžné otáčky a minimální zatížení. Vyčkat v tomto chodu motoru až do okamžiku zahřátí provozních kapalin na stanovené teploty provozu.
4. Nastavit autoregulaci množství dodávaného paliva tak, aby hodnota lambda byla rovna jedné pro benzin a pro E85 lambda rovna 0,92.
5. Zvýšit otáčky motoru na 1500 min<sup>-1</sup>.
6. Nastavit maximální zatížení motoru, tedy škrtící klapku otevřít na 100%.
7. Vyčkat do ustálení okolních hodnot teplot a tlaku a z monitoru, v programu pro ovládání hydrodynamické brzdy, zapsat velikost daného výkonu a točivého momentu motoru.
8. Důležité pro opakovatelnost zkoušky je zapisovat si i hodnoty nasávaného vzduchu a atmosférický tlak vzduchu ve zkušební místnosti. Pro každé otáčky by se tyto hodnoty neměly příliš lišit.
9. Zvýšit otáčky motoru od 500 min<sup>-1</sup>

10. Opět vyčkat do ustálení okolních hodnot a zapsat daný výkon a točivý moment motoru.
11. Opět zvýšit otáčky motoru o stejný krok a zapsat stejné hodnoty. Takto pokračovat až do maximálních otáček motoru  $5500 \text{ min}^{-1}$ .
12. Po ukončení zkoušky s jedním palivem vypnout motor a připojit k palivovému systému druhé palivo.
13. Zkoušku co nejpřesněji opakovat podle bodů 1. až 12.

### 7.5.2 Postup zkoušky

V první části této zkoušky jsem uvedl zkušební motor na automobilový benzín BA95. Motor jsem nechal určitou dobu běžet bez zatížení na volnoběžné otáčky, aby se provozní kapaliny zahřály na teplotu provozu. Posléze jsem zahájil danou zkoušku. Zvýšil jsem otáčky motoru na 1500 za minutu a nastavil pomocí plného otevření škrticí klapky maximální zatížení motoru. Nyní jsem vyčkal do doby, než se ustálí okolní hodnoty nasávaného vzduchu, teploty motoru a tlaku vzduchu ve zkušebně a z monitoru, v programu pro ovládání hydrodynamické brzdy, jsem si zapsal výši daného výkonu a točivého momentu motoru.

Bylo důležité také sledovat a zapisovat si teplotu nasávaného vzduchu a tlak vzduchu ve zkušebně, abych následné hodnoty výkonu a točivého momentu mohl přepočítat podle normy ISO a abych mohl v pokračující zkoušce provést měření za co neblíže podmínek a vyvarovat se tak vzniklé chybě měření.

Po zapsání všech potřebných hodnot jsem zvýšil otáčky motoru o 500 za minutu a měření provedl identicky jako při otáčkách 1500 za minutu. Takto jsem pokračoval až do maximálních hodnot otáček motoru 5500 za minutu.

Zkoušku pro palivo BA95 jsem těmito otáčkami ukončil, vypnul motor a k palivovému systému motoru jsem připojil druhé palivo E85.

Zkoušku s E85 jsem provedl krok po kroku jako u paliva BA95. Výsledné hodnoty jsem zapsal do tabulek uvedené v následující podkapitole 7.5.3.

### 7.5.3 Naměřené hodnoty ze zkoušky

#### 7.5.3.1 Hodnoty zkoušky vnější otáčkové charakteristiky pro palivo BA95

$n \text{ [min}^{-1}]$	$P_e \text{ [kW]}$	$M_k \text{ [Nm]}$	$t_{\text{vzduchu}} \text{ [}^\circ\text{C]}$	$p_{\text{atm}} \text{ [hPa]}$	$\delta \text{ [}^\circ]$	$P_{e_{\text{iso}}} \text{ [kW]}$	$M_{t_{\text{iso}}} \text{ [Nm]}$	$K_{\text{iso}}$
1500	9,99	63	26,80	966,60	15	10,32	65,09	1,0331
2000	13,15	65	26,80	966,00	15	13,60	67,21	1,0339
2500	18,20	69	26,70	967,00	18	18,79	71,24	1,0324
3000	21,96	70	26,70	967,00	26	22,67	72,27	1,0324
3500	25,13	71	26,70	967,00	27	25,95	73,30	1,0324
4000	28,73	69	26,70	966,90	30	29,67	71,25	1,0325
4500	32,38	68	27,00	966,90	30	33,45	70,26	1,0331
5000	35,94	66	27,00	966,90	30	37,13	68,19	1,0331
5500	36,47	62	27,00	966,90	30	37,68	64,06	1,0331

Tab. 31 Hodnoty získané ze zkoušky pro celé spektrum otáček motoru při použití paliva BA95

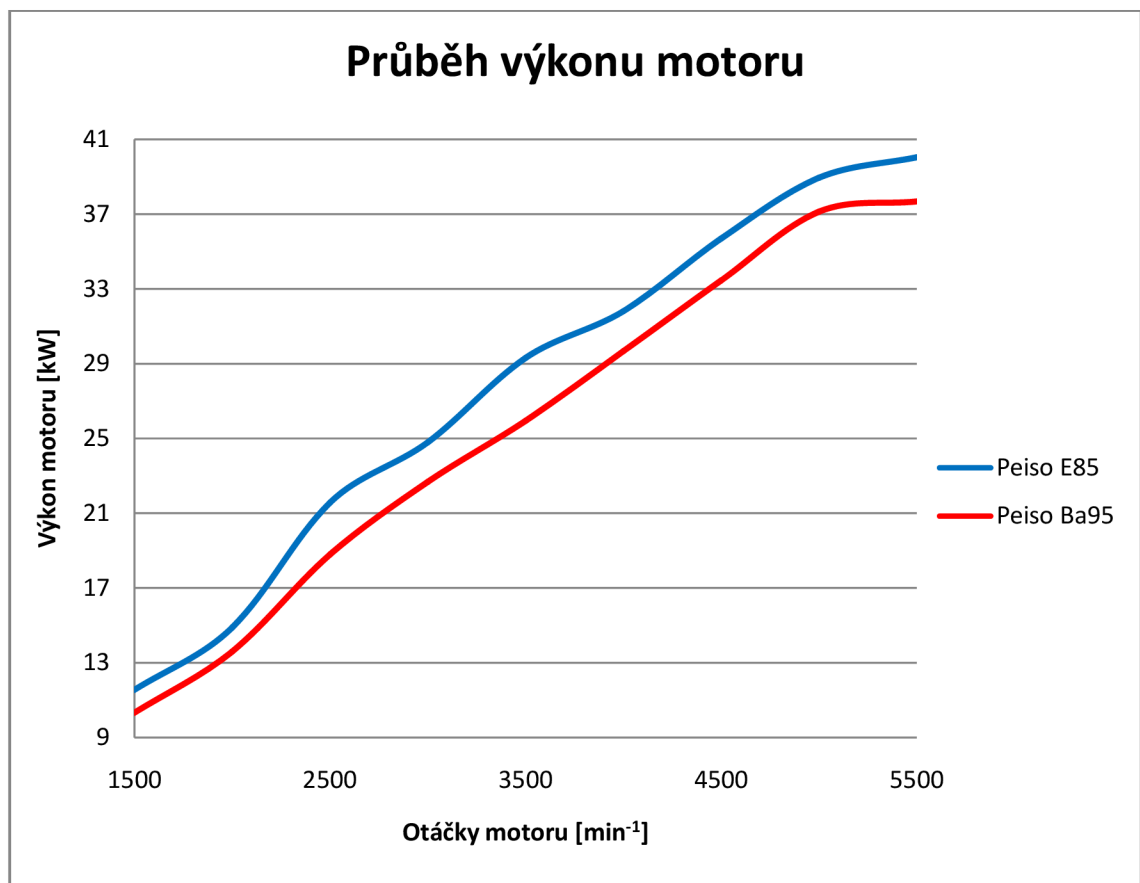
## 7.5.3.2 Hodnoty zkoušky vnější otáčkové charakteristiky pro palivo E85

n [min <sup>-1</sup> ]	Pe [kW]	Mk [Nm]	t <sub>vzduchu</sub> [°C]	p <sub>atm</sub> [hPa]	δ[°]	Pe <sub>iso</sub> [kW]	Mt <sub>iso</sub> [Nm]	K <sub>iso</sub>
1500	11,25	63	26,70	971,80	23	11,55	64,66	1,0263
2000	14,50	67	26,80	971,80	25	14,88	68,78	1,0265
2500	21,00	71	26,70	971,60	28	21,56	72,89	1,0265
3000	24,14	77	26,80	971,60	36	24,79	79,06	1,0267
3500	28,56	79	26,90	972,30	36	29,31	81,06	1,0261
4000	31,00	76	26,90	972,30	36	31,81	77,98	1,0261
4500	34,78	73	27,00	972,20	36	35,70	74,93	1,0264
5000	37,95	72	27,00	972,20	35	38,95	73,90	1,0264
5500	39,01	70	27,10	972,30	35	40,04	71,86	1,0265

Tab. 32 Hodnoty získané ze zkoušky pro celé spektrum otáček motoru při použití paliva E85

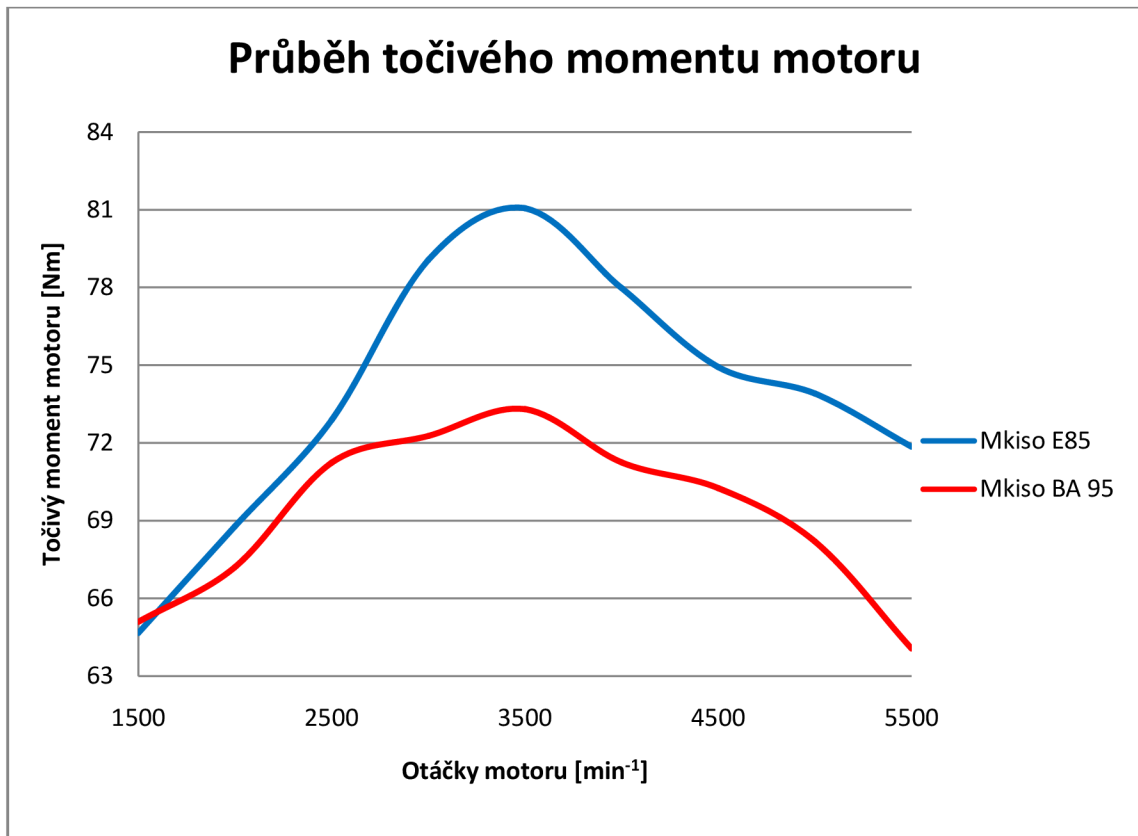
## 7.5.4 Grafické vyhodnocení zkoušky

## 7.5.4.1 Vyhodnocení průběhu výkonu motoru paliv BA95 a E85



Graf. 22 Průběh výkonu motoru paliv BA95 a E85 v celém rozsahu otáček motoru

## 7.5.4.2 Vyhodnocení průběhu točivého momentu motoru paliv BA95 a E85



Graf. 23 Průběh točivého momentu motoru paliv BA95 a E85 v celém rozsahu otáček motoru

## 7.5.5 Shrnutí výsledků zkoušky

V porovnání s ostatními zkouškami je tato zkouška jediná, na které lze demonstrovat i laické veřejnosti rozdíly obou paliv. Křivky nárůstu výkonu v grafu **Graf. 22** mají opět velmi podobný průběh, ale je viditelné, že díky E85 se výkon zvýšil v celém rozsahu otáček zhruba o stejnou velikost. Maximálního výkonu pro palivo BA95 bylo dosaženo při otáčkách motoru 5500 za minut a hodnota činila 37,68 kW. Pro E85 byl maximální výkon při stejných otáčkách, ale jeho hodnota se zvýšila na 40,04 kW. To znamená nárůst výkonu zhruba o 6,3%. U motoru, na kterém jsem zkoušku prováděl, se jedná o zvýšení pouze o 2,36 kW, ale pokud by se zkouška měla opakovat například u 150 kW motoru, zvýšení výkonu by bylo o dost citelnější.

Naproti tomu, z grafu **Graf. 23** je výrazný velký nárůst točivého momentu při provozu na E85. Pokud si uvědomíme, že točivý moment je součin síly a ramene, je jasné, z jakého důvodu k nárůstu došlo. Díky zvýšení tlaku plynů od expandujících spalín se zvýšila i síla působící těmito plyny na dno pístu.

## 7.6 Spotřeba paliva

Spotřeba paliva je jeden z velmi důležitých parametrů motoru. Mnoho uživatelů automobilů se například podle tohoto údaje rozhodují pro koupi daného vozu. Průběh spotřeby v závislosti na době provozu, může poukázat i na zvyšující se opotřebení motoru. U automobilů v běžném provozu se udává spotřeba na 100 kilometrů, u zkušebního motoru, který je používán ve stacionárním provozu se spotřeba vypočítává hodinově.

### 7.6.1 Metodika zkoušky

1. Zvolit druh zkoušeného paliva BA95 nebo E85. Zvolené palivo připojit k palivovému systému motoru.
2. Nastavit hodnoty řídicí jednotky pro zvolené palivo.
3. Spustit motor na volnoběžné otáčky a minimální zatížení. Vyčkat v tomto chodu motoru až do okamžiku zahřátí provozních kapalin na stanovené teploty provozu.
4. Nastavit autoregulaci množství dodávaného paliva tak, aby hodnota lambda byla rovna jedné pro benzín a pro E85 lambda rovna 0,92.
5. Zvýšit počáteční otáčky motoru na  $1500 \text{ min}^{-1}$ .
6. Nastavit maximální zatížení motoru, tedy škrtící klapku otevřít na 100%.
7. Vyčkat do ustálení okolních hodnot teplot a tlaku a z počítače pro ovládání řídicí jednotky zapsat dobu otevření vstřikovacího ventilu.
8. Zvýšit otáčky motoru od  $500 \text{ min}^{-1}$
9. Opět vyčkat do ustálení okolních hodnot a zapsat danou dobu otevření vstřikovacího ventilu.
10. Opět zvýšit otáčky motoru o stejný krok a zapsat stejnou hodnotu. Takto pokračovat až do maximálních otáček motoru  $5500 \text{ min}^{-1}$ .
11. Po ukončení zkoušky s jedním palivem, vypnout motor a připojit k palivovému systému druhé palivo.
12. Zkoušku co nejpřesněji opakovat podle bodů 1. až 11.

### 7.6.2 Postup zkoušky

Při této zkoušce jsem opět své měření začal s palivem natural 95, které jsem připojil k palivovému systému motoru. V programu pro ovládání řídicí jednotky jsem zvolil takzvanou mapu s hodnotami pro chod motoru na toto palivo. Motor jsem nastartoval a nechal běžet na volnoběžné otáčky bez zatížení až do chvíle, než se provozní kapaliny dostatečně zahrály.

Po tomto volnoběžném režimu jsem přešel k počátku zkoušky. Zvýšil jsem otáčky motoru na 1500 za minutu a škrtící klapku otevřel na maximum, aby motor byl plně zatížen. Po ustálení okolních podmínek měření jsem z programu pro ovládání řídicí jednotky odečetl hodnotu čas otevření vstřikovacího ventilu. Po zapsání této hodnoty jsem zvýšil otáčky motoru o 500 za minutu a měření opakoval. Zkoušku jsem ukončil až po dosažení maximálních otáček 5500 za minutu.



### 7.6.3 Výpočet spotřeby

Z kapitoly 6.2.1 jsem spočítal maximální průtočné množství daným vstřikovacím ventilem. Tuto hodnotu nyní opět použiji, abych vypočítal množství vstříknutého paliva za jeden cyklus motoru a následně přepočítal na hodnoty, které jsou více informativní.

Délka otevření vstřikovacího ventilu je uváděna v milisekundách, proto je nejprve nutné celkové průtočné množství vstřikovacího ventilu přepočítat na množství protečené za milisekundu:

$$m_{\text{paliva}} = 217,5 \text{ g/min} = 3,625 \text{ g/sec} = 0,003625 \text{ g/ms}$$

Následně vypočítám za vztahu (5) množství paliva vstříknutého do válce za jeden cyklus motoru, výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce *Tab. 1*:

$$m_{\text{vstřiku}} = \tau_1 \cdot m_{\text{paliva}} [\text{g} \cdot \tau^{-1}] \quad (5)$$

Hodnoty  $m_{\text{vstřiku}}$  nejsou příliš vypovídající, proto podle vztahu (6) přepočteme na množství dodaného paliva v gramech za minutu. Množství  $m_{\text{vstřiku}}$  je do válce dodáváno jednou za dvě otáčky motoru, proto tuto hodnotu vynásobíme polovinou otáček a získáme tak množství dodaného paliva za minutu. Vypočítané hodnoty jsou uvedeny v tabulce **Tab. 33** pro palivo BA95 a v tabulce **Tab. 33** pro palivo E85.

$$m = m_{\text{vstřiku}} \cdot (n/2) \quad (6)$$

### 7.6.4 Získané hodnoty ze zkoušky potřebné pro výpočet spotřeby

#### 7.6.4.1 Tabulka délky otevření vstřikovacího ventilu a dané spotřeby BA95

n [min <sup>-1</sup> ]	τ [ms]	m <sub>vstřiku</sub> [g·τ <sup>-1</sup> ]	m [g·min <sup>-1</sup> ]	m [l·hod <sup>-1</sup> ]
1500	12,99	0,0471	35,3166	2,8253
2000	10,84	0,0393	39,2950	3,1436
2500	11,84	0,0429	53,6500	4,2920
3000	11,18	0,0405	60,7913	4,8633
3500	14,46	0,0524	91,7306	7,3385
4000	13,80	0,0500	100,0500	8,0040
4500	13,61	0,0493	111,0066	8,8805
5000	13,52	0,0490	122,5250	9,8020
5500	13,30	0,0482	132,5844	10,6068

Tab. 33 Hodnoty otevření vstřikovacího ventilu a spotřeby natural 95

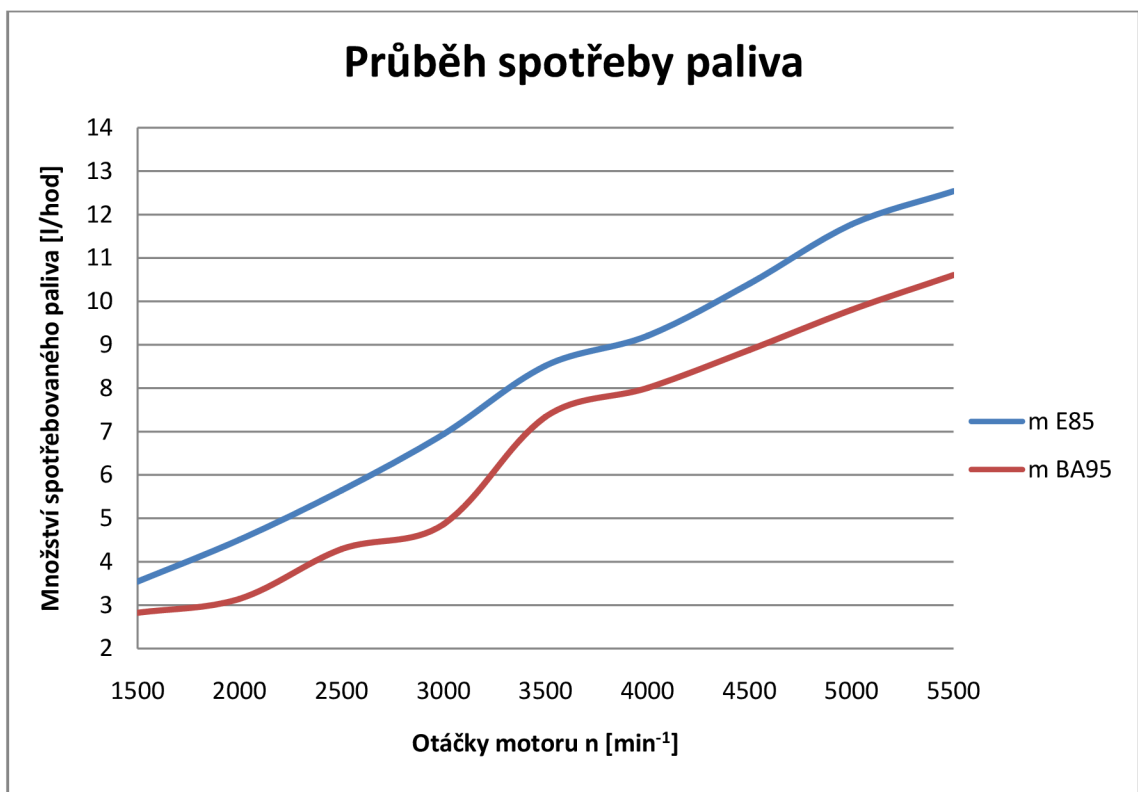
## 7.6.4.2 Tabulka délky otevření vstřikovacího ventilu a dané spotřeby E85

$n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	$\tau$ [ms]	$m_{\text{vstřiku}}$ [ $\text{g} \cdot \tau^{-1}$ ]	$m$ [ $\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$ ]	$m$ [ $\text{l} \cdot \text{hod}^{-1}$ ]
1500	17,01	0,0617	46,2459	3,5438
2000	16,23	0,0588	58,8338	4,5083
2500	16,25	0,0589	73,6328	5,6424
3000	16,65	0,0604	90,5344	6,9375
3500	17,52	0,0635	111,1425	8,5167
4000	16,57	0,0601	120,1325	9,2056
4500	16,65	0,0604	135,8016	10,4063
5000	16,95	0,0614	153,6094	11,7708
5500	16,41	0,0595	163,5872	12,5354

Tab. 34 Hodnoty otevření vstřikovacího ventilu a spotřeby E85

## 7.6.5 Grafické vyhodnocení zkoušky

## 7.6.5.1 Závislost spotřebovaného paliva na otáčkách motoru



Graf. 24 Množství dodaného paliva do spalovacího prostoru motoru v gramech za minutu

### 7.6.6 Shrnutí výsledků zkoušky

Výsledky z této zkoušky jsou spíše informativní a poukazují na fakt v rozdílu spotřeby, který již byl několikrát v této práci zmiňován. Jedním z hlavních důvodů, proč nelze tuto zkoušku brát objektivně je ten, že hodinovou spotřebu žádný výrobce osobních, či nákladních automobilů neuvádí. Proto tento výsledek, kdy spotřebu přepočítávám na litry za hodinu nelze s žádným jiným údajem od výrobce porovnat. Druhý důvod je ten, že počítám s množstvím vstříkovaného paliva za délku otevření vstříkovacího ventilu, avšak tento čas neodpovídá délce plného otevření ventilu. Je důležité brát v potaz, že než se ventil plně otevře, tak aby mohl mít maximální průtok, uplyne určitá doba. Při uzavírání je tento případ totožný. Proto tedy průtok vstříkovacím ventilem za jeho dobu otevření není konstantní. Výsledné množství dodaného paliva v litrech za hodinu do spalovacího prostoru motoru, bude od skutečného spotřebovaného množství paliva lehce odlišné. Tato chyba vnesená do výpočtu však bude u obou měření stejná, proto výsledky lze mezi sebou porovnávat.

Na průběhu grafu *Graf. 24* je pozorovatelný nárůst spotřebovaného E85 oproti BA95. Dodávku paliva E85 je nutno navýšit o takové množství, aby výhřevnost odpovídala výhřevnosti dodaného množství BA95. Je také nutné, aby řídicí jednotka korigovala množství vstříkovaného pliva tak, aby po smíchání s nasátým vzduchem ve spalovacím prostoru, byla vytvořena takzvaná stechiometrická směs. Díky vyšší spotřebě, ale menšímu stechiometrickému poměru E85 (9.9 : 1), není nutné žádným způsobem dimenzovat sací trakt, protože množství nasávaného vzduchu je o něco menší než je zapotřebí nasát pro hoření naturalu 95.

Při dnešních aktuálních cenách pohonných hmot by hodina provozu na maximální výkon zkušebního motoru vyšla na 342,8 korun, při ceně BA95 32,32 Kč za jeden litr. Pro provoz na E85 by za stejných provozních podmínek vyšel na 282 korun, při ceně za litr E85 22,50 Kč.

## 7.7 Indikace tlaku ve válci

Tato zkouška indikace tlaku ve válci byla provedena jako poslední, protože její příprava byla jedna z nejnáročnějších. Nejprve se musel na motor namontovat tlakový snímač, který je velmi citlivý na manipulaci a také velmi drahý. Kvalitní datový kabel, zesilovač napětí, dataloger, vyhodnocovací zařízení, vše muselo být pečlivě propojeno s počítačem a kalibrováno.

### 7.7.1 Metodika zkoušky

1. Zvolit druh zkoušeného paliva BA95 nebo E85. Zvolené palivo připojit k palivovému systému motoru.
2. Nastavit hodnoty řídicí jednotky pro zvolené palivo.
3. Spustit motor na volnoběžné otáčky a minimální zatížení. Vyčkat v tomto chodu motoru až do okamžiku zahřátí provozních kapalin na stanovené teploty provozu.
4. Nastavit autoregulaci množství dodávaného paliva tak, aby hodnota lambda byla rovna jedné pro benzin a pro E85 lambda rovna 0,92.
5. Zvýšit počáteční otáčky motoru na  $2000 \text{ min}^{-1}$ .
6. Nastavit maximální zatížení motoru, tedy škrtící klapku otevřít na 100%.

7. Nastavit ukládání hodnot tlaku ve válci do datalogeru po 1° od 0° do 719° otočení klikového hřídele.
8. Zapnout ukládání hodnot tlaku ve válci do datalogeru a vyčkat, než se data o tlaku ve válci načtou a uložit na disk počítače.
9. Zvýšit otáčky motoru o 1000 min<sup>-1</sup>
10. Opět zapnout ukládání hodnot tlaku a po načtení uložit do počítače.
11. Opět zvýšit otáčky motoru o stejný krok a zapsat stejnou hodnotu. Takto pokračovat až do maximálních otáček motoru 5000 min<sup>-1</sup>.
12. Po ukončení zkoušky s jedním palivem, vypnout motor a připojit k palivovému systému druhé palivo.
13. Zkoušku co nejpřesněji opakovat podle bodů 1. až 12.

### 7.7.2 Postup zkoušky

Tuto zkoušku jsem započal s palivem natural 95, který jsem připojil k palivovému systému motoru. Motor jsem nastartoval a nechal zahřát na provozní teploty. Zkoušku jsem zahájil na otáčkách 2000 za minutu a plným zatížení motoru. Zařízení na indikaci tlaku ve válci je velmi křehké a proto je nutné při jeho manipulaci dávat velký pozor, aby nedošlo k jeho poškození. Pomocí programu pro ovládání tohoto zařízení, lze nastavit, po jakém úhlu pootočení klikového hřídele se hodnoty tlaku ve válci mají zaznamenávat do datalogeru. Pro mé měření bylo důležité zjistit pouze maximální tlak dosažený při expandování hořící směsi. Proto jsem jako krok pro zapisování hodnot tlaku zvolil 1°. Celé měření proběhlo pro 2 otáčky klikového hřídele, tedy pro 720°. Jakmile se hodnoty uložily na disk počítače, mohl jsem zvýšit otáčky motoru o 1000 za minutu a indikaci opakovat. Konečné otáčky pro tuto zkoušku byly nastaveny na 5000 za minutu.

Následně jsem po odstavení motoru připojil druhé palivo E85 k palivovému systému a zkoušku celou opakovat. Z naměřených hodnot jsem získal maximální tlak ve válci při daných otáčkách a graficky vyhodnotil a porovnal v následující podkapitole 8.7.3.

### 7.7.3 Naměřené hodnoty ze zkoušky

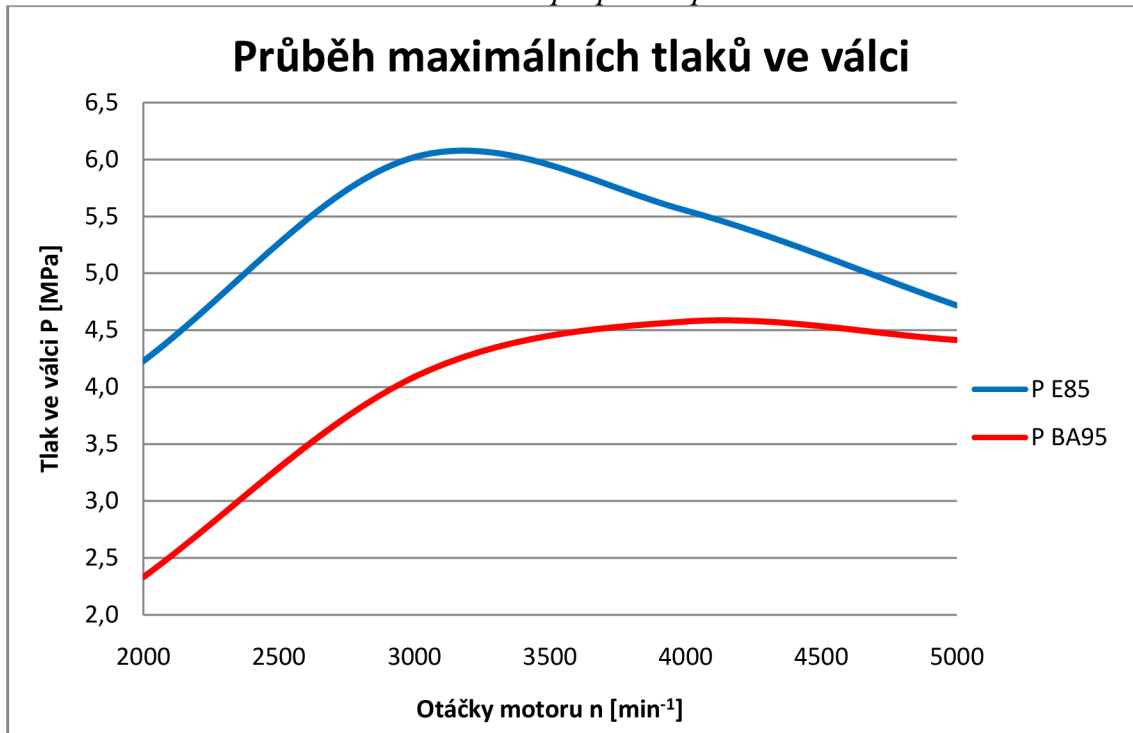
#### 7.7.3.1 Tabulky tlaků při optimálním předstihu zážehu pro BA95 a E85

BA95			E85		
Otáčky motoru [min <sup>-1</sup> ]	Tlak ve válci [MPa]	Předstih $\delta$ [°]	Otáčky motoru [min <sup>-1</sup> ]	Tlak ve válci [MPa]	Předstih $\delta$ [°]
2000	2,33	15	2000	4,23	25
3000	4,09	26	3000	6,02	36
4000	4,58	30	4000	5,55	36
5000	4,41	30	5000	4,72	35

Tab. 35 Hodnoty indikovaných tlaků při otáčkách motoru od 2000 do 5000 za minutu při použití paliv BA95 a E85

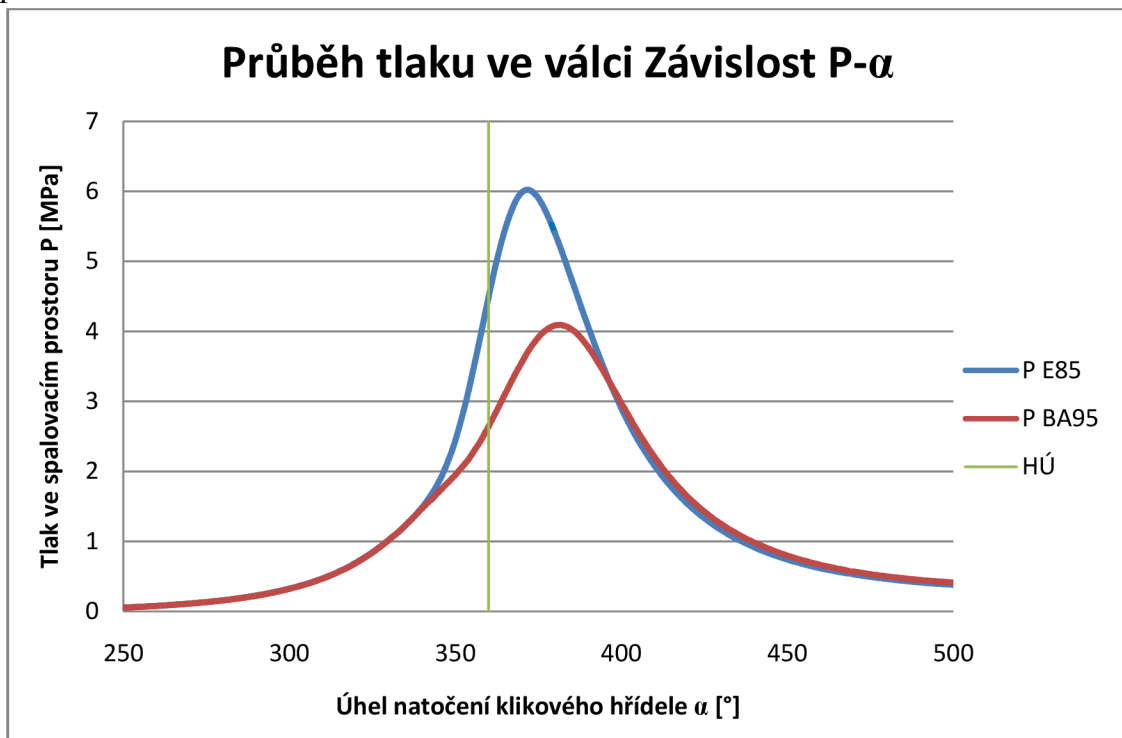
## 7.7.4 Grafické vyhodnocení zkoušky

### 7.7.4.1 Průběh maximálních tlaků ve válci při použití paliv BA95 a E85



Graf. 25 Porovnání maximálních tlaků ve válci obou paliv BA95 a E85

### 7.7.4.2 Průběh tlaku ve válci v závislosti na pootočení klikového hřídele pro obě paliva při otáčkách motoru $3000 \text{ min}^{-1}$



Graf. 26 Závislost P- $\alpha$  pro otáčky motoru  $3000 \text{ min}^{-1}$  a paliva E85 a BA95

### 7.7.5 Shrnutí výsledků zkoušky

Tlak ve spalovacím prostoru se u zážehového motoru iniciuje přeskočením jiskry mezi elektrodami zapalovací svíčky. Nárůst tlaku je opožděný od okamžiku zážehu o několik stupňů pootočení klikové hřídele, protože nejprve dochází k postupnému šíření plamene po okrajích homogenní směsi a až následnému celkovému prohoření a strmému nárůstu tlaku ve válci.

Na grafu **Graf. 25** jsou oba průběhy maximálních tlaků ve válci při otáčkách motoru od 2000 do 5000 za minutu. Nastavení motoru pro tyto zkoušky bylo zvoleno tak, aby předstihy zážehu pro jednotlivé režimy byly co nevhodnější z hlediska průběhu výkonu při použití daného paliva, tak jak je uvedeno v kapitole 8.1. Zvýšení tlaků při spalování u paliva E85 oproti BA95 je způsobeno právě rozdílnou hodnotou předstihu. Po zažehnutí paliva, dojde k postupnému prohořívání směsi ve válci a uvolňování tepla. Hořící plyny expandují a tím dochází k nárůstu tlaku ve válci. Ze stavové rovnice (7), můžeme vyjádřit tlak  $P$ . Z tohoto následného vztahu (8) je patrné, že velikost tlaku závisí mimo jiné i na velikosti objemu.

$$P \cdot V = m \cdot r \cdot t \quad (7)$$

$$P = \frac{m \cdot r \cdot t}{V} \quad (8)$$

Úhel zážehu u E85 je mnohem vyšší, než u paliva BA95 při stejných otáčkách. To způsobí, že směs paliva a vzduchu začne expandovat dříve před horní úvratí a tím je maximální vývin tepla posunut těsně za horní úvratí, ve chvíli, kdy se píst již pohybuje směrem k dolní úvratí. Rozdíl tedy oproti benzínu je v tom, že k maximálnímu rozpínání plynu, vlivem hoření, dochází oproti BA95 v mnohem menším prostoru, který je tvořen dnem pístu a spalovacím prostorem nad pístem.

Průběh nárůstu tlaku v závislosti na poloze klikového hřídele je znázorněn v grafu **Graf. 26**. Za nejideálnějších podmínek, by bylo nejvhodnější, aby nárůst tlaku byl pouze ve chvíli, kdy je píst v horní úvratí. V této poloze je prostor spalovacího prostoru nejmenší, tím by došlo k maximálnímu možnému nárůstu tlaku a tím vytvoření největší možné síly, která následně posouvá píst do směru k dolní úvratí. Bohužel v této poloze klikového ústrojí by nárůst maximálního tlaku měl neblahý vliv na životnost celého ústrojí.

Na tomto grafu je také patrné, jaký vliv má na výkon okamžik zážehu. Je výhodné z hlediska průběhu tlaku ve válci, zážeh posunout co nejdále od horní úvratě, ale z hlediska průběhu výkonu je hodnota předstihu volena spíše blíže k horní úvratí. Tlak vyvinutý před horní úvratí působí na pohyb pístu v opačném směru, což z výsledného výkonu motoru ubírá.

## 8 Závěr

Tuto práci jsem rozdělil do několika hlavních částí tak, aby o bioetanolu jako palivu pro pohon automobilů bylo řečeno co nejvíce. V první části jsem shrnoval informace, které jsou již o bioetanolu známy. Zaměřil jsem se na vývoj v globálním měřítku, ale i na území dnešní České republiky. Používání etanolu pro automobilní účely je známé již od první republiky, kdy bylo nezbytné v dobách finančních krizí zvolit jiné možnosti náhrady automobilového benzínu. Tento vývoj posléze zastavila druhá světová válka a s následnou obnovou vývoje biopaliv obecně se začalo až v průběhu druhé poloviny 20. století.

Aplikace bioetanolu jako paliva pro automobily není zcela jednoduchá. Oproti dnešním fosilním palivům, která v této vyspělé době skýtají značný komfort v používání, představuje bioetanol jako palivo pro běžného uživatele značný zásah do takového komfortu. Hlavním rozdílem oproti benzínu a naftě jsou právě jeho fyzikálně-chemické vlastnosti. Nízká výhřevnost způsobuje zvýšení spotřeby a zkrácení dojezdu. Chemická stavba etanolu zvyšuje riziko poškození pryžových částí motoru a schopnost vázat vodu způsobuje korozi kovových komponentů. Avšak každá z těchto vlastností se dá konstrukčně odstranit, použitím jiných odolnějších materiálů. I dojezd vozidla se dá kompenzovat zvýšením objemu palivové nádrže. Zásadnější nevýhodou, kvůli které se bioetanol jako palivo prozatím nikterak rychle nerozšiřuje je fakt, že do dnešního dne je v České republice vybudováno pouze 26 čerpacích stanic, které prodávají palivo E85. Je to také i špatná politika našeho státu, který se k otázkám spojených s biopalivy staví spíše bázlivě, nýbrž aby těmto palivům vybudoval pevné a dostatečné podmínky pro to, aby se biopaliva dostala do podvědomí provozovatelů motorových vozidel jako palivo konkurenceschopná stávajícím fosilním pohonným hmotám.

To že je bioetanol palivo s velkými ambicemi, dokazuje i fakt, že renomovaná společnost, jakou je Lotus engineering, vkládá značné jmění do vývoje mnoha projektů a automobilů, pohánějící právě motory na bioetanol.

Cena bioetanolu je stanovena výkupní cenou suroviny, ze které se vyrábí. Tato cena je oproti ceně ropy velmi stabilní a není proto náchylná na sezónní výkyvy.

### 8.1 Vyhodnocení užití bioetanolu jako paliva pro automobily

V druhé části své diplomové práce jsem sepisoval možnosti, jakým způsobem lze bioetanol jako palivo v automobilech využívat. Bioetanol lze uplatňovat jako palivo pro spalovací motory automobilů v mnoha modifikacích. Úplně tím nejjednodušším použitím je nízkoprocentní přimíchávání do automobilního benzínu a motorové nafty. Tento způsob je již několik let známý v zemích Evropské unie, ale i dalších zemích světa. Řidiči většinou ani nemají šanci poznat rozdíl v chování svého vozidla, protože tato příměs je jen několik procent. Avšak pro stát i těchto pár procent bioetanolu představuje obrovské množství v celoroční spotřebě. V České republice se nyní setkáváme u čerpacích stanic s 5% příměsí bioetanolu ve všech kapalných pohonných hmotách. Pro spalování této směsi není zapotřebí žádných konstrukčních ani softwarových změn.

Další možností uplatnění bioetanolu je zvýšení procentuální příměsi v benzínu až na maximální hranici 22%. Pro kterou není zapotřebí žádných úprav motoru. Spalovat takovéto palivo lze ve stávajících zážehových motorech bez problémů, ale provozovatel se bude muset smířit s faktem, že za předpokladu stejné dodávky paliva jako u čistého benzínu, dojde k mírnému poklesu výkonu. To je způsobeno nižší výhřevností etanolu.

Další zvyšování příměsi bioetanolu do benzínu již vyžaduje jisté změny v nastavení softwaru řídicí jednotky pro úpravu zapalování a množství dodávaného paliva. Bioetanol má vysoké oktanové číslo, což umožňuje posunout zážeh směsi dále před horní úvrať a dosáhnout tak vyššího tlaku a tím i vyššího výkonu a točivého momentu motoru. Celková výhřevnost směsi bioetanolu a benzínu se se zvyšujícím procentem příměsi bioetanolu snižuje, proto je nutné zvyšovat dodávku paliva do motoru tak, aby hodnota výhřevnosti stále odpovídala minimálně hodnotě výhřevnosti benzínu.

Pro aplikaci stoprocentního bioetanolu v zážehovém motoru je nutná nejen změna nastavení řídicí jednotky, ale i zásadní konstrukční změny. Samozřejmě je možné provozovat běžný zážehový motor na palivo E100 bez jakýchkoliv úprav, ale pokud bychom chtěli využívat maximum z potenciálu bioetanolu je vhodné ke konstrukčním změnám přistoupit. Jedná se především o dimenzování vstřikovacích ventilů a zvýšení kompresního poměru motoru. Ten lze posunout až k hranici 15:1. Díky takovéto změně docílíme lepšího využití energie paliva a tím i následné snížení spotřeby. Stoprocentní etanol je s těmito úpravami využíván ve světě závodních automobilů již od nepaměti. Avšak na druhou stranu tak velké zvýšení kompresního poměru znemožňuje zpětné použití klasického benzínu. Proto pro dnešního uživatele je spíše výhodné zachovat stávající konstrukci zážehového motoru, ale pro větší využití energie bioetanolu použít přeplňování motoru. Zvýšením nasávacího tlaku a posunutí předstihu zážehu, lze efektivně využít vysoké antidetonační schopnosti bioetanolu a docílit velké zvýšení výkonu motoru.

Aplikace bioetanolu ve vznětových motorech je mnohem komplikovanější než u motorů zážehových. Nízká procentuální příměs etanolu chodu vznětového motoru nevádí, ale při zvýšené příměsi nastávají zásadní problémy. Hlavním je velmi malé cetanové číslo. To způsobuje, že se bioetanol velmi snadno vzněcuje při zvyšující se teplotě kompresního zdvihu a nelze tedy regulovat chod motoru. Další velmi špatnou vlastností bioetanolu je jeho nežádoucí odmašťovací schopnost. Motorová nafta má relativně dobré mazací schopnosti, kterých se využívá pro mazání pohybujících se částí vstřikovacích ventilů a palivového čerpadla. Proto lze bioetanol pro vznětové motory aplikovat buďto jen jako příměs v motorové naftě do několika málo procent nebo použít bioetanol jako jedinou složku paliva, ale jeho vlastnosti co nejvíce přiblížit vlastnostem motorové nafty. Toto palivo je pak označováno jako E95.

## 8.2 Porovnání E85 s benzínem

V další části své práce jsem prováděl praktické zkoušky s palivem E85, které je složené z 85% bioetanolu a 15% naturalu 95, a BA95 na motorové zkušebně v podmínkách ÚADI FSI. Tato část byla stěžejní pro moji práci. Vytvářel jsem návrh metodiky jednotlivých zkoušek s palivem E85, tak aby tyto zkoušky mohly být



zařazeny v následujících letech do osnov praktické výuky pro studenty magisterského studia na Ústavu automobilního a dopravního inženýrství. Celkem jsem provedl sedm zkoušek s oběma palivy. Zkoušky jsem volil takové, aby v celkovém výsledku byl patrný rozdíl v kvalitách obou paliv. Podmínky zkoušek byly nastaveny tak, aby se jednotlivé informace získané ze zkoušek daly mezi sebou porovnávat. Volil jsem zkoušky zaměřené na emise výfukových plynů, výkonnostní parametry a parametry spojené s chodem motoru.

V první části všech zkoušek bylo nutné zjistit základní parametry pro chod motoru při použití paliva E85 (předstih zážehu, hodnotu lambda a délku otevření vstřikovacího ventilu). Protože bioetanol má oproti automobilovému benzínu odlišné vlastnosti, je i provoz spojený s palivem E85 za odlišných podmínek. Množství dodaného paliva E85 bylo zvýšeno v celém rozsahu otáček o 30%, protože výhřevnost oproti benzínu je zhruba o 30% nižší. Nejprve bylo nutné motor provozovaný na E85 nastartovat. Bez zatížení nebyl problém motor na E85 při nastavení parametrů řídicí jednotky pro benzín uvést do chodu a začít zjišťovat informace pro chod motoru na toto palivo a ukládat je do řídicí jednotky.

Proto jsem provedl první zkoušku pro zjištění optimálního nastavení předstihu zážehu. E85 má oproti benzínu vyšší oktanové číslo, proto je možné využít jeho antidetonačních schopností k tomu, aby se počátek zážehu posunul dále před horní úvrať. Optimální hodnota úhlu zážehu je taková, při které je výkon motoru nejvyšší, ale velikost předstihu dostatečně daleko od hranice detonačního hoření. Tyto hodnoty byly následně uloženy do řídicí jednotky a používány v dalších zkouškách. Díky zvýšení předstihu zážehu pro E85 oproti BA95 došlo k zvýšení výkonu motoru, což je patrné na grafu **Graf. 2**.

Druhá zkouška byla provedena tak, aby se dala ověřit správnost výpočtu hodnoty lambda. Maximálního výkonu motoru není dosahováno při hodnotě lambda rovno jedna, ale tato hodnota je posunuta dále do bohaté směsi. Výsledek zkoušky potvrdil, že vypočtená hodnota lambda pro E85 je správná a tato hodnota byla uložena do řídicí jednotky a v dalších zkouškách používána. Z výsledků získaných při této zkoušce je patrný rozdíl v naměřených hodnotách výkonnostních parametrů, kdy při použití E85 došlo k nárůstu výkonu i točivého momentu motoru.

Následující zkoušky zaměřené na množství prvků ve výfukových plynech při provozu na dané palivo ukázaly, že produkce CO, NO<sub>x</sub> a CO<sub>2</sub> jsou za všech podmínek zhruba stejná. I za předpokladu, že dojde ke změně nastavení řídicí jednotky, u paliva E85, z nastavení parametrů chodu motoru pro benzín za nastavení parametrů řídicí jednotky pro optimální provoz na E85. Rozdíl byl pouze v množství spotřebovaného paliva E85, které je o třetinu vyšší než u benzínu. Závěrem těchto zkoušek porovnávající kvalitu výfukových plynů je tedy, že i přesto, že došlo k výraznému zvýšení spotřebovaného paliva E85 oproti BA95, jsou výsledné emise ve většině případů velmi podobné pro obě paliva. To poukazuje na určitý stupeň zlepšení kvality hoření u paliva E85 a pakliže by se nám podařilo určitými konstrukčními změnami motoru snížit spotřebu E85, zlepšily by se i emise výfukových plynů a tím by se i zlepšily životní podmínky obyvatel planety.

V poslední části všech provedených zkoušek se zaměřuji na výkonnostní parametry motoru. Tyto zkoušky jsou pro vyhodnocení kvality daných paliv nejvíce vypovídající i pro laika. Na grafech **Graf. 22** a **Graf. 23** jsou průběhy výkonu a točivého momentu motoru. Pro palivo E85 je z těchto grafů vidět nárůst o několik procent. Zvýšení výkonu

a točivého momentu motoru je důsledkem zvýšení tlaku spalin ve válci. Porovnání průběhů tlaků při spalování je na grafu **Graf. 26**.

Jednotlivé experimentální zkoušky s palivem E85 byly vytvořeny tak, aby studenti v následujících ročnících, mohli rozšířit své vědomosti a poznatky při praktických cvičení na motorové zkušebně ÚADI FSI o další palivo, které se postupně rozšiřuje a nachází uplatnění v automobilním průmyslu. Rozdílné výsledky všech zkoušek ukazují, že palivo E85 je palivem kvalitnějším než benzín a při provozu na E85 lze docílit lepších parametrů motoru. Hlavním důvodem, proč je provoz na toto palivo kvalitnější, je vyšší oktanové číslo, vysoký podíl kyslíku obsažený v molekule etanolu, ten způsobuje dokonalejší hoření. Dále výparné teplo, zlepšující nasávací účinnost a nakonec i odlišné složení molekuly etanolu, které při hoření se vzduchem vytváří menší množství škodlivých prvků výfukových plynů.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] *Finance.cz* [online]. 17.9.2008 [cit. 2010-04-08]. Ropa - nejdůležitější komodita současnosti. Dostupné z WWW: <<http://www.finance.cz/zpravy/finance/190093-ropa-nejdulezitejsi-komodita-soucasnosti/>>.
- [2] *TZB info* [online]. 14.12.2009 [cit. 2010-04-25]. Emise CO2 v souvislostech. Dostupné z WWW: <<http://energie.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=6123>>.
- [3] SÝKORA, Petr. *Dlouhodobá strategie využití biopaliv v České republice* [online]. Liberec, 2009. 26 s. Předkládací zpráva. Liberec. Dostupné z WWW: <[www.download.mpo.cz/get/26605/26641/295747/priloha001.doc](http://www.download.mpo.cz/get/26605/26641/295747/priloha001.doc)>.
- [4] *Paliva a maziva*. Brno : František Vlk, 2006. 376 s.
- [5] *JČU DATABÁZE FYTOMASY* [online]. 2009 [cit. 2010-03-03]. Bioetanol. Dostupné z WWW: <<http://www.fytomasa.cz/cz/page/185/bioethanol.html>>.
- [6] SMETÁK, P. Vyhodnocení využitelnosti alternativních paliv. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2006. 55 s.
- [7] Etanol In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 1996, 2010 [cit. 2010-05-02]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Etanol>>.
- [8] LAURIN, Josef. MOTORY NA PALIVA S KVASNÝM LIHEM. *International conference of Czech and Slovak Universities' Departments and Institutions Dealing with the Research of Combustion Engines*. 2006, 5, s. 8.
- [9] *KVASNÝ LÍH V MOTOROVÝCH PALIVECH V ČESKÉ REPUBLICE*. Liberec : Liberec, 2007. 12 s.
- [10] *Agroetanol TTD* [online]. 2010 [cit. 2010-02-11]. Cukrovary a lihovary TTD. Dostupné z WWW: <<http://www.cukrovaryttt.cz/agroetanol-ttd/cerpaci-stanice/#>>.
- [11] *Stations E85* [online]. 2007 [cit. 2010-03-23]. Stations E85. Dostupné z WWW: <[http://www.korridor.se/aryan/acadiane/E85/stationsadmin/stations\\_search.shtml](http://www.korridor.se/aryan/acadiane/E85/stationsadmin/stations_search.shtml)>.
- [12] *Scania OmniLink Etanol* [online]. 2009 [cit. 2010-04-27]. BUS Portál. Dostupné z WWW: <<http://www.busportal.cz/modules.php?name=article&sid=6637>>.
- [13] *Autorizovaný servis Saab* [online]. 2008 [cit. 2010-03-23]. Saab. Dostupné z WWW: <[http://www.vikingcars.cz/saab\\_cars/95sportcombi/specifikace.html](http://www.vikingcars.cz/saab_cars/95sportcombi/specifikace.html)>.
- [14] *LN Auto* [online]. 2005 [cit. 2010-04-27]. Lidovky.cz. Dostupné z WWW: <[http://auto2.zpravy.cz/clanek\\_lidovky.php?id\\_clanek=1194](http://auto2.zpravy.cz/clanek_lidovky.php?id_clanek=1194)>.
- [15] *Lotus Engineering* [online]. 2008 [cit. 2010-02-11]. Lotus. Dostupné z WWW: <<http://www.lotusfuturethinking.com/>>.
- [16] ŠEBOR, Gustav; POSPÍŠIL, Milan; ŽÁKOVEC, Jan . *Technicko – ekonomická analýza vhodných alternativních paliv v dopravě*. Praha : Praha, 2006. 201 s.
- [17] *BioAlcohol Fuel Foundation* [online]. 2009 [cit. 2010-05-10]. BAFF. Dostupné z WWW: <<http://www.baff.info/>>.
- [18] *AUTA V LIHU* [online]. 2005 [cit. 2010-05-10]. EKONOM. Dostupné z WWW: <[http://ekonom.ihned.cz/1-10000725-16704780-400000\\_d-4e](http://ekonom.ihned.cz/1-10000725-16704780-400000_d-4e)>.

## Seznam použitých zkratk a symbolů

BA95	- automobilový benzín natural 95
CO <sub>2</sub>	- oxid uhličitý
CNG	- Compressed Natural Gas - stlačený zemní plyn
CO	- oxid uhelnatý
CH <sub>4</sub>	- metan
DME	- dimetyleter
DEE	- dietyleter
EEŘO	- etylester řepkového oleje
EURO	- norma stanovující limity výfukových plynů
ETBE	- etyl-terc.-butyl-éter
E85	- směs 85% etanolu a 15% automobilového benzínu natural 95
E95	- směs 95% etanolu a 5% aditiv
E100	- stoprocentní etanol
E50	- směs 50% etanolu a 50% automobilového benzínu natural 95
FFV	- flexi fuel vehicle
HC	- nespálené uhlovodíky
k <sub>iso</sub>	- korekční faktor [-]
LPG	- Liquefied Petroleum Gas – zkapalněný ropný plyn složený
MEŘO	- metylester řepkového oleje
MTBE	- metyl-terc.-butyl-éter
Mt	- točivý moment [N.m]
Mt <sub>iso</sub>	- točivý moment přepočítaný podle normy ISO [N.m]
m	- hmotnost [kg]
m <sub>paliva</sub>	- hmotnost spotřebovaného palivo [g/sekunda]
m <sub>vstřiku</sub>	- hmotnost dodaného paliva za jeden cyklus [g/cyklus]
NO <sub>x</sub>	- oxidy dusíku
N <sub>2</sub> O	- oxid dusný
PM	- pevné částice
ppm	- parts per milion – část z milionu (10 <sup>-6</sup> )
p	- tlak [Pa]
p <sub>atm</sub>	- atmosférický tlak [Pa]
Pe	- okamžitý výkon motoru [kW]
Pe <sub>iso</sub>	- okamžitý výkon motoru přepočítaný podle normy ISO [kW]
TAME	- terc. amyl-metyl éter
TAEE	- terc. amyl-etyl éter
t	- teplota [°C]
t <sub>vzduchu</sub>	- teplota nasávaného vzduchu [°C]
V	- objem [m <sup>3</sup> ]
λ	- lambda [-]
α	- úhel natočení klikového hřídele [°]
δ	- úhel zážehu směsi paliva a vzduchu [°]
ρ	- hustota [kg/m <sup>3</sup> ]
τ	- doba otevření vstřikovacího ventilu [ms]