

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

OPTIMALIZACE PROVOZNÍCH REŽIMŮ ZÁŽEHOVÉHO MOTORU

SI ENGINE PERFORMANCE TUNING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Bc. MARTIN BERAN
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. DAVID SVÍDA
SUPERVISOR

BRNO 2008

Abstrakt

Martin BERAN
Optimalizace provozních režimů zážehového motoru
DP, ÚADI, 2008, str. , obr. .

Diplomová práce je zaměřena na optimalizaci provozních režimů zážehového motoru pomocí elektronické řídící jednotky. Zabývá se procesy probíhajícími při řízení motoru, popisem a vysvětlením jednotlivých signálů zpracovávaných a generovaných řídící jednotkou. Návrhem měřícího řetězce a nejvhodnějších postupů pro měření, na jejichž základě byla sestavena nejvhodnější metodika vedoucí k následné optimalizaci jednotlivých provozních režimů motoru.

Klíčová slova:

Optimalizace provozních režimů motoru, řídící jednotka, měřicí řetězec

Abstrakt

Martin BERAN
Engine Performance Tuning
DP, IAE, 2008, pp., fig.

The main scope of this thesis is the four stoke petrol engine performance tuning by ECU. The thesis analyses processes during engine management, describes and explains singular signals processed and generated by ECU. Designs measuring strings and optimal procedures for measuring on whose basis has been assembled optimal methodology leading to the optimalization of single operating mode of engine.

Key words:

Engine performance tuning, electronic control unit, measuring string

Bibliografická citace

BERAN, M. *Optimalizace provozních režimů zážehového motoru.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. Vedoucí diplomové práce Ing. David Svída.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího diplomové práce pana Ing. Davida Svídy a s použitím uvedené literatury.

V Brně dne : . . . . . .

Poděkování

Za pomoc, cenné připomínky a rady při zpracování diplomové práce tímto děkuji vedoucímu mojí diplomové práce panu **Ing. Davidu Svídovi**.

Zvláště bych chtěl poděkovat svým rodičům za podporu a trpělivost během celé doby mého studia.

1 Úvod 10
2 Popis motoru Škoda 1.0 MPI 11
2.1 Popis a funkce 11
2.2 Technické údaje 12
2.3 Popis mechanické části: 13
2.4 Příprava směsi - vstřikování a zapalování: 13
3 Rozbor funkcí a požadavků kladených na současné ŘJ 15
3.1 Úvod do problematiky motormanagmentu, základní fakta řízení motoru prostřednictvím ŘJ 15
3.1.1 Co je to motormanagment systém 15
3.1.2 Řízení vstřikování 15
3.1.3 Řízení zážehu 19
3.2 Zpracování provozních údajů 22
3.2.1 Princip funkce řídící jednotky 22
3.2.2 Vstupní signály 23
3.2.3 Zpracování signálů 23
3.2.4 Programová paměť 23
3.2.5 Datová paměť 24
3.2.6 Výstupní signály 24
3.2.7 Rozhraní k řídicím jednotkám jiných systémů 25
3.2.8 Adresování podle obsahu (asociační adresování) 26
3.2.9 Přidělování sběrnice 26
3.2.10 Integrovaná diagnostika (On-Board-Diagnose) 27
3.3 Programovatelné vs. neprogramovatelné systémy řízení motoru 27
4 Popis použité programovatelné řídicí jednotky 28
4.1 Stručný popis 28
4.2 Hardware 29
4.3 SOFTWARE 31
5 Volba vhodných snímačů a akčních členů, návrh kabelového svazku 34
5.1 Volba vhodných snímačů 34
5.2 Funkce a konstrukční popis zvolených snímačů, jejich signály a zpracování řídící jednotkou 35
5.2.1 Indukční snímač otáček motoru a polohy referenční značky 35
5.2.2 Snímač úhlu natočení škrtící klapky 39
5.2.3 Snímače teploty motoru (chladící kapaliny) a nasávaného vzduchu 40
5.2.4 Zapalovácí soustava 41
5.2.5 Ovládání a funkce vstřikovacích ventilů, elektromechanika ventilu 47
6 Měřicí řetězec 52
6.1 Sestavení měřicího řetězce a volba měřících přístrojů 52
6.2 Popis pracoviště a měřící techniky 53
6.2.1 Zkušební stanoviště V 125 53
6.2.2 Zařízení na měření indikace tlaků ve válci 57
6.2.3 Diagnostický komplet BOSCH FSA 750 65
6.2.4 Lambda Controller 66

6.2.5 Angle Controller ... 68
6.3 Měřicí řetězec pro měření sériového motoru ... 69
6.4 Měřicí řetězec použitý při optimalizaci jednotlivých provozních režimů motoru ... 70
6.5 Metodika měření ... 71
7 Měření sériového motoru ... 72
7.1 Cíle měření ... 72
7.2 Způsob měření ... 72
7.3 Naměřené výsledky ... 74
7.4 Získané poznatky ... 81
7.5 Závěr a zhodnocení měření ... 81
8 Aplikace programovatelné řídicí jednotky ... 82
8.1 Zapojení, kalibrace a nastavení základních vstupních hodnot. ... 82
8.2 Výpočet základních vstupních údajů pro řídicí jednotku ... 83
8.3 Měření a optimalizace provozních režimů motoru s pomocí programovatelné řídicí jednotky ... 90
8.3.1 Cíle měření ... 90
8.3.2 Způsob měření ... 90
8.3.3 Naměřené výsledky ... 91
8.3.4 Zhodnocení naměřených výsledků, získané poznatky ... 96
8.4 Porovnání výsledků ... 96
8.5 Návrh nejvhodnější metodiky měření a postupů při optimalizaci jednotlivých provozních režimů motoru ... 100
9 Indikace tlaků ve válci ... 101
10 Závěr ... 108
Seznam použitých zdrojů ... 111
Seznam použitých zkratek a symbolů ... 112
Seznam příloh ... 113

1 Úvod

Od samého počátku vývoje spalovacího motoru se současně rozvíjelo a zdokonalovalo také jeho řízení, tak aby vyhovovalo neustále stoupajícím nárokům a požadavkům, které jsou dnes stále zvyšovány, jak z hlediska výkonových parametrů motoru, tak také z hlediska ochrany životního prostření. Z počátku vývoje se spalovací motory řídily velmi primitivním způsobem a vrcholem regulace bylo řízení přípravy směsi v karburátoru a přímé řízení předstihu zážehu odstředivým a podtlakovým regulátorem. Jak ovšem historie ukazuje, takovéto primitivní řízení postačovalo téměř celé století vývoje motorů, ale z dnešního pohledu je však naprosto nedostatečné.

Od 80. let se začaly prosazovat elektronické systémy pro řízení zapalování a současně také docházelo k zavádění katalytického spalování výfukových plynů. To však vyžadovalo mnohem přesnější přípravu palivové směsi, než umožňovaly sebelepší karburátory. První systémy elektronického vstřikování paliva byly jednobodové a později vícebodové pro individuální vstřik do každého válce. Tyto systémy umožnily přípravu palivové směsi s vysokou přesností a reprodukovatelností pro každý termodynamický cyklus. Přesné dávkování paliva značně snížilo množství škodlivin ve výfukových plynech a postupně tak umožnilo takovou přísnost exhalačních limitů současných automobilů, jaká by ještě před 15 lety byla nepředstavitelná. Tyto revoluční změny při řízení spalovacích motorů by bez průmyslového nástupu integrované elektroniky, přesného výkonového spínání, vývoje bezpečného softwaru a vyspělé technologie nemohly nikdy nastat.

Náplní této diplomové práce je provedení optimalizace jednotlivých provozních režimů motoru. Pochopení procesů spojené s řízením motoru pomocí elektronické řídící jednotky, seznámení se s problematikou dějů ve válci během spalovacího procesu prostřednictvím indikace tlaků ve válci a s tím i související osvojení práce s měřící technikou a následným zpracováním a vyhodnocením naměřených dat.

Měření bylo provedeno na motoru Škoda 1.0 MPI, na kterém byly provedeny drobné konstrukční úpravy zejména pro umístění snímačů.

2 Popis motoru Škoda 1.0 MPI

2.1 Popis a funkce

Řadový čtyřválec, zážehový kapalinou chlazený s rozvodem OHV, s dvěma ventily pro každý válec, uložený vpředu napříč před hnací nápravou, vybavený třícestným řízeným katalyzátorem a lambda sondou. Splňuje emisní předpis EU IV.



Obr.2.1 Motor Škoda 1.0 MPI

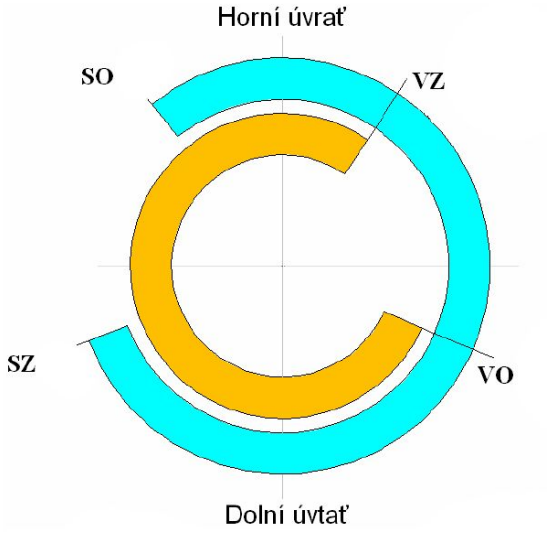
2.2 Technické údaje

Kód motoru	ARV
Zdvihový objem (ccm)	996
Počet válců:	4
Vrtání/zdvih:	72/61,2
Kompresní poměr:	9,8
Počet ventilů na válec:	2
Počet ložisek klikového hřídele:	3
Výkon při 4500 min^{-1} (kW):	34
Točivý moment při 3000 min^{-1} (Nm):	72
Pořadí zapalování:	1-3-4-2
Palivový systém (výrobce a typ)	SIMOS 3PA elektronické vícebodové vstřikování paliva (MPI)
Vstřikovací ventily	Bosch 280 155 731H
Průtok paliva vstřikovačem při 100% šířce pulsu (cc/min)	96,21
(g/min)	69,22
Palivo:	bezolovnatý benzin o.č. 95
Tlak paliva (bar)	3
Zapalování soustava:	Dvoujiskrové elektronicky řízené zapalování se selektivní regulací klepání
Svíčky:	Champion RC, BRISK DR 15 TC, vzdálenost elektrod 0.8mm, Mu = 30Nm, interval výměny 60 000km

Časování (parametry) vačkové hřídele:

SO:	17° před HÚ
SZ:	40° po DÚ
VO:	44° před DÚ
VZ:	13° po HÚ

SO – Sací ventil otevírá
SZ – Sací ventil zavírá
VO – Výfukový ventil otevírá
VZ – Výfukový ventil zavírá



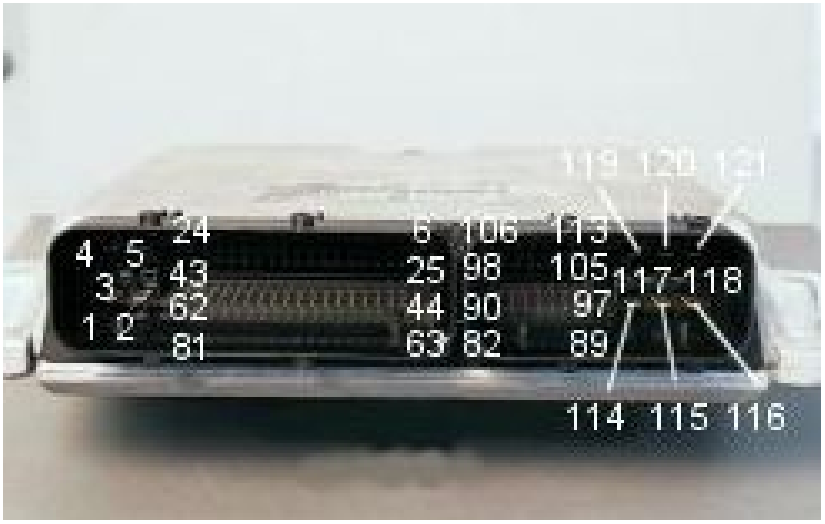
Obr.2.2 Diagram časování vačkové hřídele

2.3 Popis mechanické části:

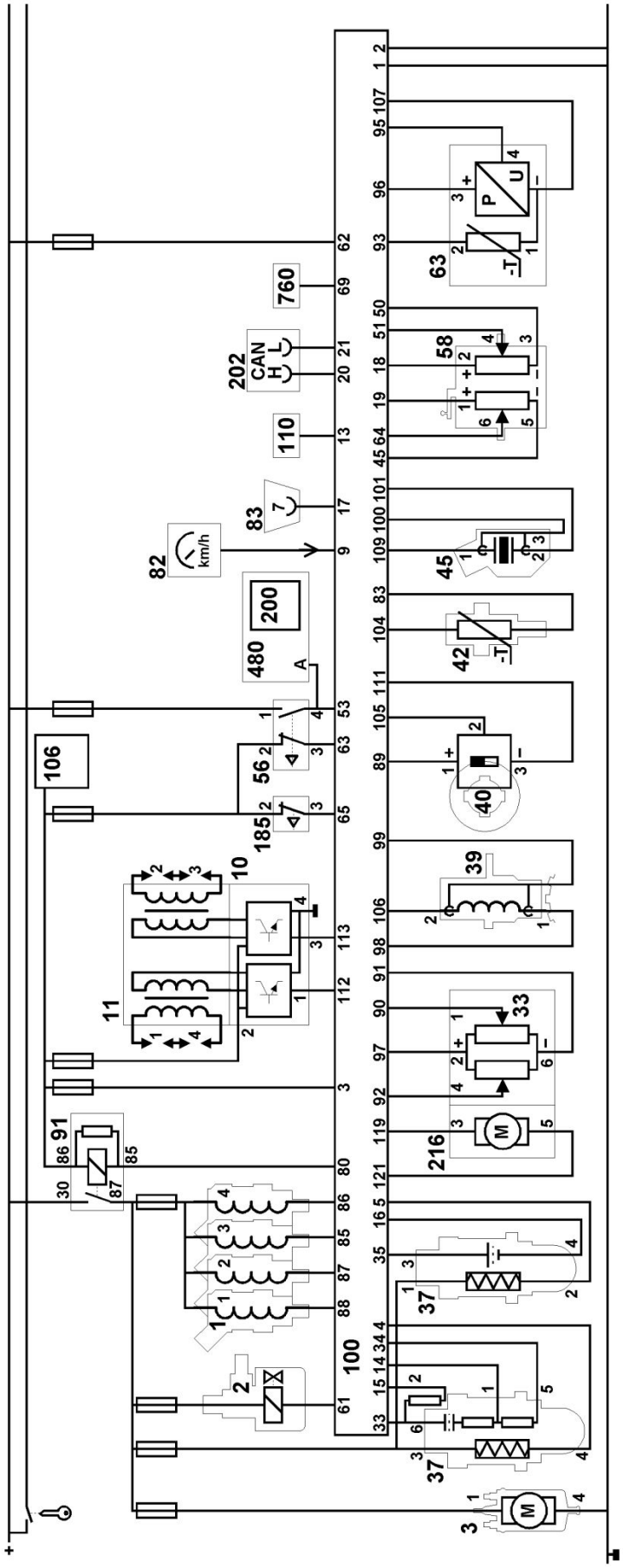
Blok motoru je z hliníkové slitiny s vloženými vyměnitelnými ocelovými vložkami válců, které jsou v přímém styku s chladicí kapalinou . Kliková hřídel je ocelová kovaná, vybavená 8 vývažky je uložena ve třech ložiskách (prostřední ložisko je širší a jeho pánve jsou odlišné od pánví krajních ložisek). Ložisková víka jsou spojena společným litinovým rámem.Osmikanálová hlava bloku válců je stejně jako blok motoru z hliníkové slitiny. Hlava má protiproudovou cirkulaci chladicí kapaliny.Vačková hřídel je umístěna v bloku motoru a je poháněna od klikové hřídele ozubenými koly a dvouřadým řetězem.

2.4 Příprava směsi - vstřikování a zapalování:

Zapalování a vstřikování paliva ovládá elektronická řídicí jednotka SIMOS 3PA nebo SIMOS 3PB (SIMOS = Siemens Motor Steuerung, 3.PA = 3. generace). Řídicí jednotka motoru SIMOS reguluje dobu a množství vstřikovaného paliva a zapalování v závislosti na okamžitém zatížení motoru a dalších hodnotách dodávaných snímači. K výpočtu doby trvání vstřiku a okamžiku zážehu bere řídicí jednotka v úvahu i korekční činitele, tj. selektivní regulaci klepání, lambda regulaci, regulaci běhu motoru naprázdno a regulaci nádobky s aktivním uhlím. Dalšími signály, které řídicí jednotka zpracovává jsou zejména signál polohy spojkového i brzdového pedálu a signál od spínače tlaku posilovače řízení. Nastavování polohy škrticí klapky se provádí elektricky. Na sacím potrubí je umístěno čidlo tlaku a čidlo teploty nasávaného vzduchu, jednotka ovládání škrticí klapky, rozdělovací lišta paliva se vstřikovacími ventily a regulátor tlaku paliva. Na každý válec připadá jeden elektromagnetický vstřikovací ventil ústící do sacího potrubí.



Obr.2.3 Pohled na konektor řídicí jednotky Simos P3A (číslování jednotlivých pinů)



1. vstřikovací ventil
2. elmag. ventil pro regeneraci nádobky s aktivním uhlím
3. palivové čerpadlo
10. zapalovací modul
11. zapalovací cívka
33. snímač polohy škrtící klapky
37. lambdasonda
39. indukční snímač na klikové hřídeli
40. Hallův / MRE senzor na vačkové hřídeli
42. snímač teploty chladící kapaliny
45. snímač klepání
56. spínač brzdového pedálu
58. spínač polohy pedálu plynu
63. snímač teploty vzduchu a senzor absolutního tlaku v potrubí (MAP)
82.tachometr
83. diagnostická zásuvka
91. relé palivového čerpadla
100. řídící jednotka
110. alternátor
185. spínač spojky
200. ABS - řídící jednotka
202. CAN – systém
216. Motor ovládání škrtící klapky

Obr.2.4 Schéma zapojení systému Simos 3PA [7]

3 Rozbor funkcí a požadavků kladených na současné ŘJ

3.1 Úvod do problematiky motormanagmentu, základní fakta řízení motoru prostřednictvím ŘJ

3.1.1 Co je to motormanagment systém

Moderní systém řízení motoru (motormanagment) zajišťuje aby motor běžel čistě a efektivně v širokém rozsahu provozních podmínek. Je spolehlivý a vyžaduje malou nebo téměř žádnou údržbu. Základem je elektronická řídící jednotka dále jen ŘJ která snímá požadované fyzikální veličiny o stavu motoru a svými výstupy ovládá motor za všech provozních podmínek tak, aby se splnila zvolená kritéria kvality řízení. Hlavní snímané veličiny jsou otáčky motoru, zatížení a teplota motoru, na jejichž základě pak ŘJ poskytuje přesnou dávku paliva a zajišťuje zažehnutí směsi ve správný okamžik pro aktuální provozní podmínky motoru. V podstatě lze tedy ŘJ rozdělit na dva oddělené subsystémy, systém vstřikování paliva a systém zapalovací soustavy. Vlastní řízení zapalovaní tak i vstřikování je ovládáno prostřednictvím zapalovací charakteristiky popř. charakteristiky vstřikování takzvané datové mapy uložené v paměti ŘJ, dále však upravené na základě dalších korekčních charakteristik a regulačních režimů. ŘJ dnes vytváří i rozhraní (datovou sběrnici CAN) pro řídicí jednotky ostatních systémů a pro diagnostiku automobilu. Tak vzniká možnost přenosu dat i mezi dalšími elektronickými systémy, např. systémem regulace prokluzu pohonu (ASR), elektronickým řízením převodovky (GS) nebo elektronickým programem stability vozidla (ESP).

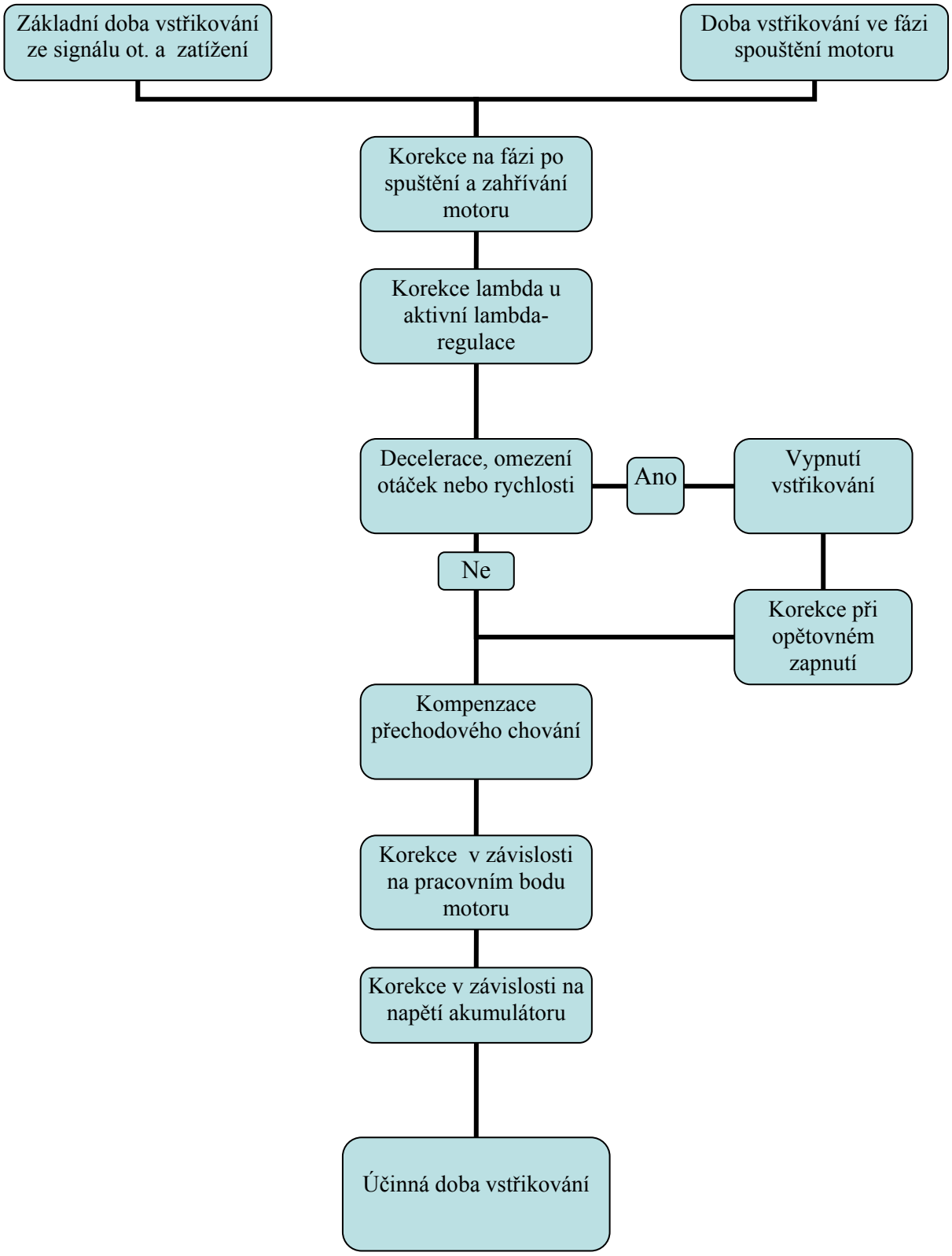
Přes veškeré složitosti funkcí řízení motoru jsou patrné dvě základní funkce:

1) dodávat motoru potřebné palivo v požadovaném množství
2) provést zažehnutí směsi v požadovaný optimální čas

3.1.2 Řízení vstřikování

Při elektronickém vstřiku dávky paliva se pro každý termodynamický cyklus motoru vypočítá množství nasátého vzduchu do konkrétního válce na základě informace signálu od snímače tlaku v sacím potrubí, eventuelně jiného typu snímače zatížení (měřič hmotnosti nasávaného vzduchu). Pro výpočet doby vstřikování se dále zpracovávají informace o otáčkách motoru, poloze škrticí klapky, teploty nasávaného vzduchu, teploty chladicí kapaliny nebo oleje, dalších pomocných veličin jako EGR (Exhaus Gas Recirculation), indikace klepání motoru a výběr kriteriální funkce.

U výpočtu doby vstřikování se rozlišuje základní doba vstřikování a účinná doba vstřikování. Základní doba vstřikování (základní množství paliva) se vypočítává přímo ze signálu zatížení a otáček. Účinná doba vstřikování se získává ze základní doby vstřikování započtením korekčních veličin (např. teplota motoru a vzduchu, odchylka od $\lambda = 1$, napětí akumulátoru, všechny způsoby obohacování). Tyto korekční hodnoty se vypočítávají příslušnými speciálními procesy v řídicí jednotce a berou v úvahu různé pracovní podmínky a režimy motoru (viz obr.3.1).



Obr.3.1 Výpočet účinné doby vstřikování.

Na základě těchto informací se vypočítá odpovídající doba vstřikovaní, která prostřednictvím využití pulzní šířkové modulace aktivuje vstřikovací ventil přesně na dobu, za kterou se přesné odpovídající množství paliva tlakově vystříkne před sací ventil daného válce. Palivo je dopraveno palivovým čerpadlem do prostoru, ve kterém se reguluje tlak paliva na konstantní tlakový spád (rozdíl tlaku paliva a podtlaku v sacím traktu). Přebytky paliva z tohoto prostoru se zpětným potrubím vedou zpět do palivové nádrže. Tím se zajistí, že v tomto tlakovém prostoru je palivo vždy v kapalné fázi, neboť je recirkulací neustále ochlazováno. Pomocí elektromagnetických ventilů (vstřikovačů) je stlačené palivo z tohoto prostoru přivedeno do jednotlivých válců otevřením příslušného vstřikovače. Při konstantním tlakovém spádu je množství vstřikovaného paliva funkcí doby otevření tohoto vstřikovacího ventilu. Při rychlém otevření dochází k atomizaci paliva a v proudu nasávaného vzduchu se palivové mikrokapičky dokonale promísí do zápalné směsi s přesným poměrem mezi vzduchem a palivem. Dokonalé spalování nastává při stechiometrickém poměru - vzduch/palivo 14,7:1 Pokud je ve směsi více paliva, je směs bohatá, zatímco při přebytku vzduchu je chudá. Poměr mezi skutečným poměrem vzduch/palivo a stechiometrickým poměrem se označuje λ a je důležitým ukazatelem kvality spalování. Při bohaté směsi ($\lambda < 1$) lze v určitém rozsahu maximalizovat výkon motoru, ovšem výfukové plyny obsahují více nespálených uhlovodíků a nebezpečný plyn CO. Řízení v této oblasti vede k maximálnímu výkonu (speciální motory, sportovní vozidla apod.). Pro běžná vozidla se používá řízení směsi tak, aby byl na minimum omezen obsah škodlivých látek ve výfukových plynech. To nastává při $\lambda = 1$. Při tomto řízení je sice ve výfukových plynech nejvíce oxidů dusíku (NOx), ale třícestný katalyzátor má právě při tomto řízení nejvyšší účinnost. Takto řízené motory splňují všechny evropské i americké normy pro vozidla na veřejných komunikacích.

Charakter vstřikování dále také odpovídá použitému typu řízení vstřikovacích ventilů. Zatímco dříve existovala vstřikovací zařízení, která pracovala mechanicky a prováděla elektronicky řízené dodatečné funkce, jako byl např. systém KE-Motronic, který vstřikoval kontinuálně (nepřerušovaně, trvale), jsou dnešní moderní vstřikovací zařízení řízena výhradně elektronicky a vstřikují palivo intermitentně (přerušovaně). U přerušovaného nepřímého vstřikování se rozlišují následující tři typy řízení vstřikovacích ventilů (obr. 1):

- simultánní vstřikování;
- polosekvenční, resp. skupinové vstřikování;
- sekvenční vstřikování.

Simultánní vstřikování

Jde o nejjednodušší typ ovládání. Řídicí jednotka motoru má pouze jeden koncový stupeň (výkonový) a dává všem vstřikovacím ventilům současně během dvou otáček klikové hřídele dvakrát impulz ke vstřiku poloviny požadovaného množství paliva. Bez ohledu na dobu otevření sacích ventilů a pořadí zapalování motoru. Tak u válců, u kterých je sací ventil zavřený, dochází ke vzniku nerovnoměrné směsi, u jiných zase ke vstřikování během taktu sání. Nevýhodou tohoto typu ovládání je nerovnoměrnost délky doby tvorby směsi v jednotlivých válcích motoru a tím i vyšší podíly škodlivin ve výfukových plynech.

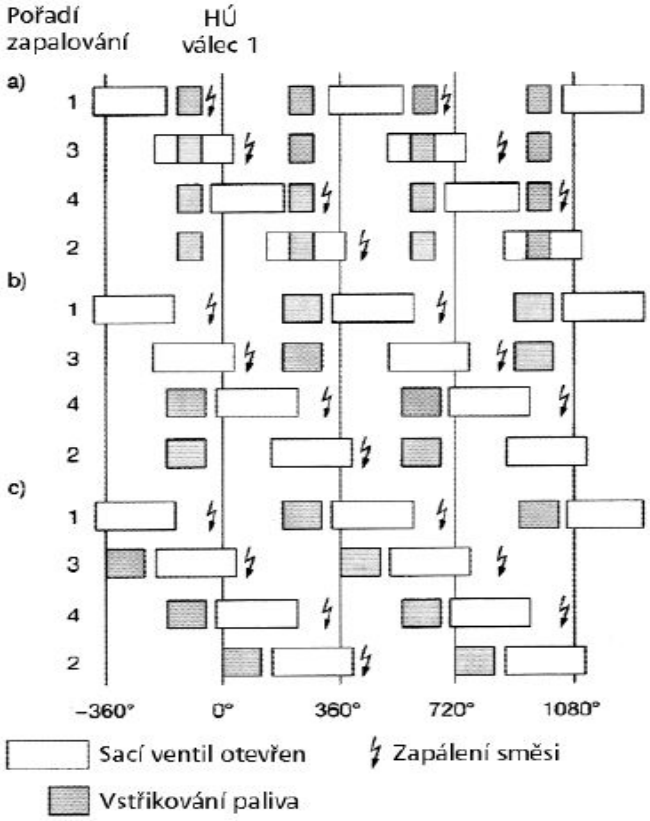
Polosekvenční

Skupinové vstřikování. V tomto případě se vstřikovací ventily podle pořadí zapalování spínají ve dvou skupinách (I a II), které se střídavě uvádějí do činnosti dvěma koncovými stupni řídicí jednotky motoru a vstřikují jednou v každém pracovním cyklu (po dvou otáčkách

klikové hřídele). Okamžik vstřiku je naprogramován tak, aby se palivo vstřikovalo vždy předčasně před zavřené sací ventily (nerovnoměrná směs). Skupinu ventilů I tvoří například vstřikovací ventily válců 1 a 3 a skupinu ventilů II vstřikovací ventily válců 2 a 4.
Výhodou tohoto typu řízení vstřikovacích ventilů je, že se palivo vstřikuje zásadně před zavřené sací ventily. Tím sice vzniká nerovnoměrná směs, ale o to více zbývá času k odpaření vstříknutého množství paliva. Je tu však i nevýhoda. Doba předčasného vstřiku je různě dlouhá, a proto se do plynného stavu dostává různé množství paliva. Tvorba směsi i její spalování jsou už podstatně lepší než u simultánního vstřikování. Platí to i o podílu škodlivin ve výfukových plynech.

Sekvenční vstřikování

Při tomto řízení se vstřikovací ventily otvírají podle pořadí zapalování. Každý vstřikovací ventil má v řídicí jednotce motoru svůj vlastní koncový (výkonový) stupeň. Do činnosti je uveden vždy pouze jeden, a to vždy po dvou otáčkách klikové hřídele. Okamžik vstřiku je možné naprogramovat libovolně a nastavuje se na konci taktu výfuku krátce před otevřením sacího ventilu motoru. Velkou výhodou tohoto typu řízení je, že ve všech válcích je vstřik proveden ve stejný okamžik (vzhledem k úhlu otočení klikové hřídele a poloze pístu ve válci), což dává lepší předpoklady k tomu, aby se dosáhlo optimálního spalování s nízkým obsahem škodlivin ve výfukových plynech. Jde o typ řízení vstřikovacích ventilů, který se používá u všech modernějších elektronicky řízených vstřikovacích zařízení.

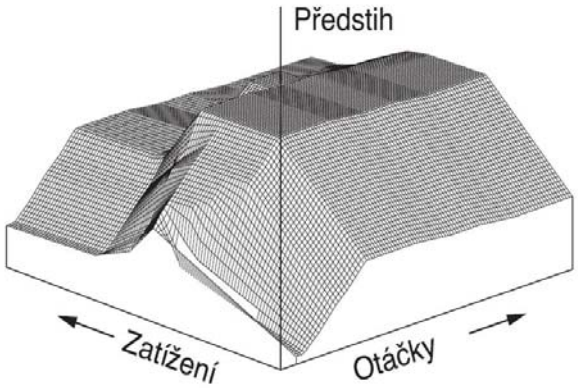


Obr.3.2 Typy řízení vstřikovacích ventilů [5]
a)simultánní vstřikování;
b)skupinové (polosekvenční) vstřikování;
c)sekvenční vstřikování.

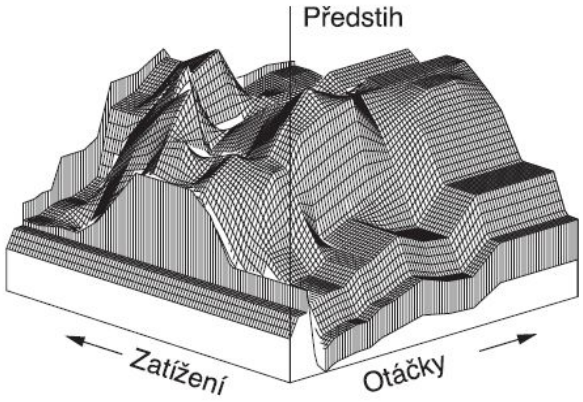
3.1.3 Řízení zážehu

Zapalovací systémy dnes téměř bezvýhradně pracují bez rozdělovače vysokého napětí a požadovaná jiskra se zaručenou energií pro zážeh směsi se generuje induktivním, nebo kapacitním způsobem. Úhel předstihu zážehu je složitou funkcí mnoha proměnných (rychlosti otáčení, zatížení, bohatosti směsi, teploty vzduchu i chladicí kapaliny, oktanového čísla paliva a dalších) a zásadně ovlivňuje dynamické vlastnosti motoru i složení výfukových plynů. Výpočet úhlu předstihu pro konkrétní podmínky je velmi nesnadná a časově náročná operace, protože požadovaná funkce není obvykle dostatečně přesně analyticky vyjádřena. Řídicí systém by vyžadoval vysoký výpočetní výkon a proto se pro výpočet časové funkce pro generování zážehové jiskry používá metody přímého řízení, kdy v paměťovém prostoru jsou pro všechny možné stavy motoru zapsány hodnoty předstihu ve formě mapy řízení. Stejný princip se používá i systémech přípravy směsi.

Pro představu, jak vypadá průběh předstihu v závislosti na otáčkách a zatížení motoru, jsou na obrázku 3.3 a 3.4 uvedeny charakteristiky pro mechanickou regulaci a regulaci elektronickou. Z obrázku 3.3 je vidět, že mechanická regulace nabízí jen poměrně jednoduchý průběh regulační charakteristiky. Ten pak nepředstavuje optimální hodnoty předstihu pro nejrůznější režimy, tj. různé otáčky a zatížení motoru. Mechanická odstředivá a podtlaková regulace v rozdělovači není z principu své činnosti ani schopna lepší charakteristiku vytvořit. U elektronického systému zapalování je tomu jinak. To je ostatně vidět na první pohled z tvaru trojrozměrné charakteristiky na obr.3.3 přičemž každá jednotlivá hodnota předstihu byla pro danou hodnotu otáček a zatížení optimalizována za účelem dosažení požadovaných vlastností chodu motoru (točivý moment, spotřeba, emise,zabránění klepání, …). Řídicí jednotka pak při provozu motoru podle okamžité hodnoty otáček a zatížení vybírá příslušnou hodnotu předstihu. Po porovnaní obou charakteristik, mechanické regulace předstihu (odstředivá a podtlaková regulace v rozdělovači) viz. obr.3.3 a charakteristiky předstihu elektronického zapalování obr.3.4 je tedy zřejmé, že nelze klasickým mechanickým způsobem řízení zážehu v žádném případě docílit takovéto optimalizace hodnot předstihu zážehu, pro jednotlivé provozní režimy motoru, jako je tomu u současných elektronických systémů řízení zapalování.

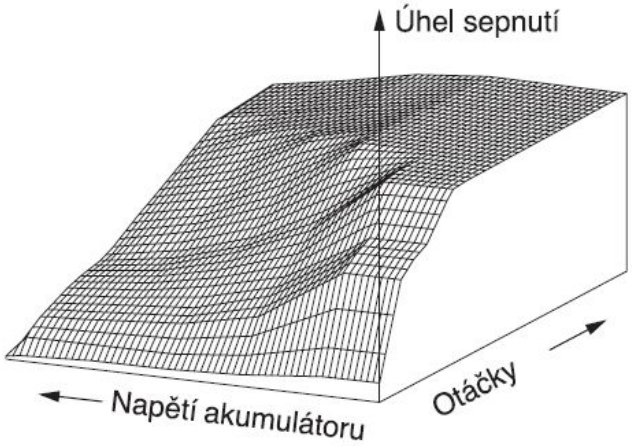


Obr. 3.3 Pole charakteristik mechanické regulace předstihu. [5]

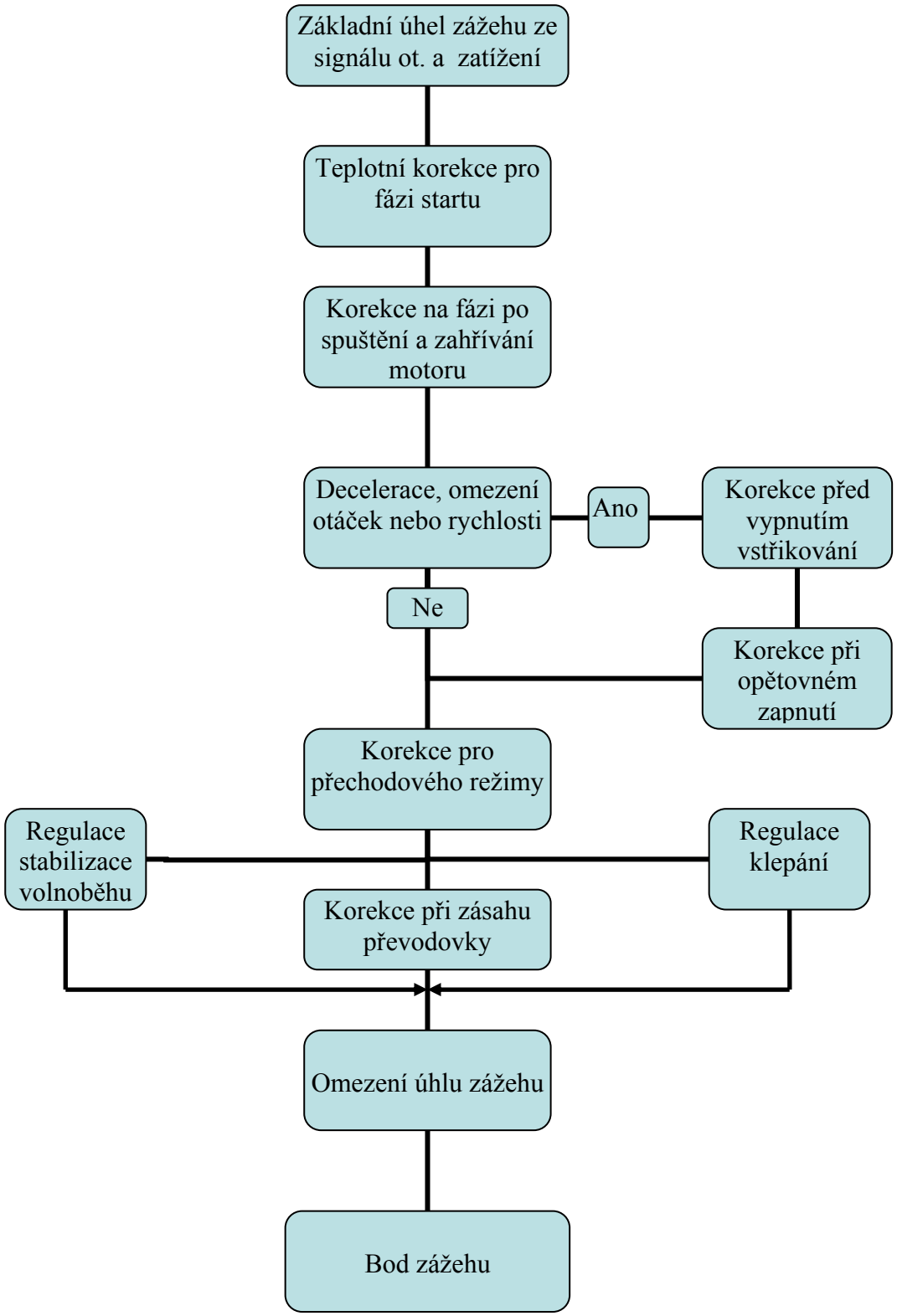


Obr.3.4 Optimalizované pole předstihu elektronického zapalování. [5]

U elektronických systémů řízení zapalování rovněž probíhá regulace úhlu sepnutí. Důvodem je, aby byla zapalovací cívka v celém rozsahu otáček motoru nabíjena vždy správnou dobu pro získání dostatečné energie pro jiskru. V řídicí jednotce je uloženo další pole charakteristik, a sice pole charakteristik úhlu sepnutí. Ukázka takového datového pole je na obr.3.5 Určujícími veličinami zde jsou otáčky a napětí akumulátoru. Je logické, že při nízkém napětí akumulátoru, a tedy i napájecím napětí cívky, je třeba zvětšit úhel sepnutí, neboť při nízkém napájecím napětí narůstá proud v cívce pomaleji. K dosažení požadované maximální hodnoty primárního proudu je potřeba delší čas. To, že úhel sepnutí musí rovněž narůstat s otáčkami je zřejmé, neboť se vzrůstajícími otáčkami při konstantním úhlu sepnutí by se pak zkracovala doba nabíjení cívky a ta by pak nemusela být dostatečně nabita energií pro bezpečný přeskok jiskry.



Obr.3.5 Pole charakteristik úhlu sepnutí elektronického zapalování [5]



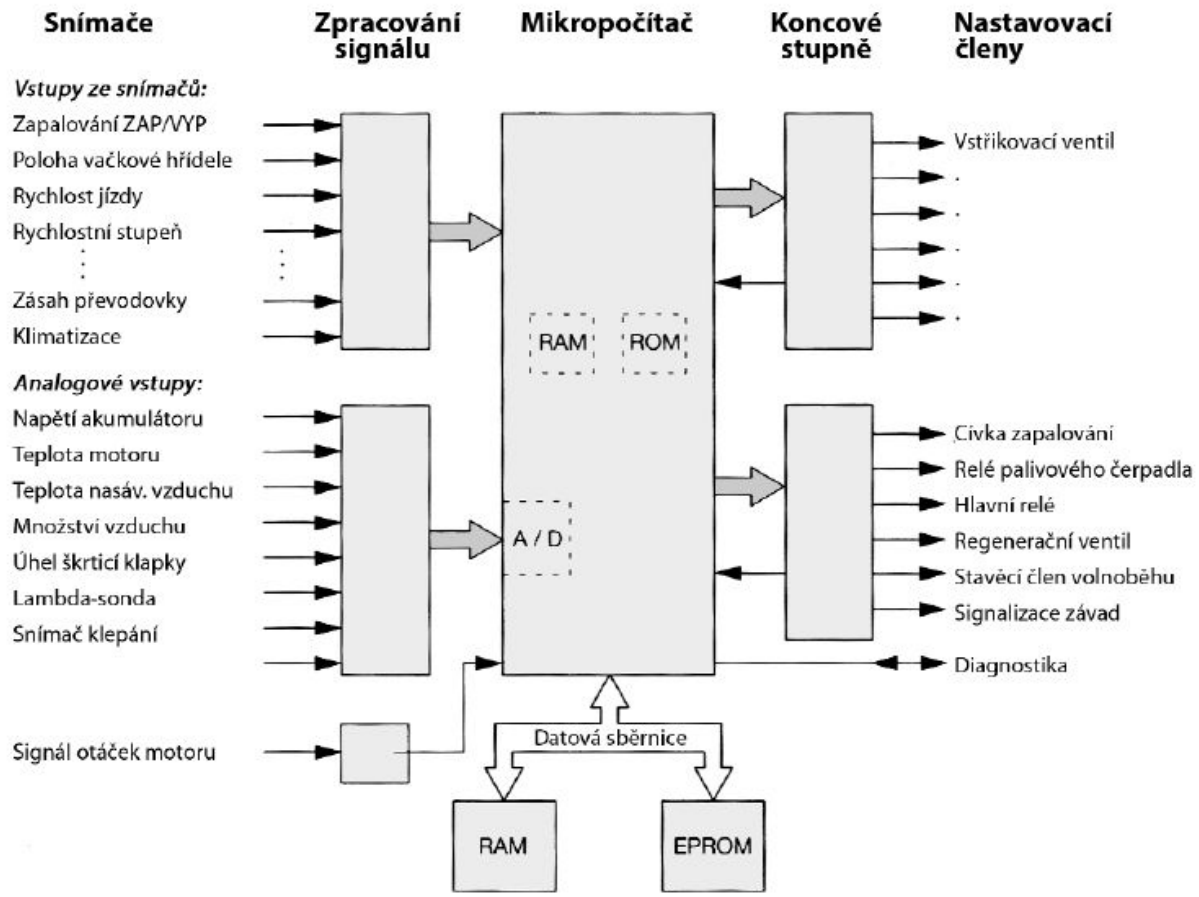
Obr.3.6 Výpočet bodu zážehu

3.2 Zpracování provozních údajů

3.2.1 Princip funkce řídící jednotky

ŘJ zpracovává signály(data) z různých snímačů viz. blokové schéma obr.3.7 Z nich vyhodnocuje pracovní režim motoru a v závislosti na něm počítá výstupní (řídicí) signály, kterými se prostřednictvím výkonových koncových stupňů přímo nebo nepřímo (pomocí relé) ovládají příslušné nastavovací členy (výkonné prvky). Koncové stupně řídicí jednotky potom na základě těchto řídících signálů připojují tyto nastavovací členy (výkonné prvky) k zápornému pólu akumulátoru (např. vstřikovací ventily, nebo zapalovací trafo u kterého koncové stupně ŘJ spínají primární vinutí cívky na kostru). Tyto nastavovací členy (výkonné prvky) jsou trvale po zapnutí zapalování („klíčku“ sv.15) připojeny ke kladnému palubnímu napětí (12V). Elektronická část řídicí jednotky potom pracuje s konstantním napájecím napětím 5 V.

Řídicí jednotka kromě toho vytváří i rozhraní (datová sběrnice CAN) k řídicím jednotkám dalších systémů a k diagnostice vozidla. Vstřikovací systém je přitom plně zapojen do systému diagnostiky automobilu, a plní tak všechny požadavky OBD (On-Board-Diagnose), resp. E-OBD (European On-Board-Diagnose).



Obr.3.7 Blokové schéma funkce ŘJ [5]

3.2.2 Vstupní signály

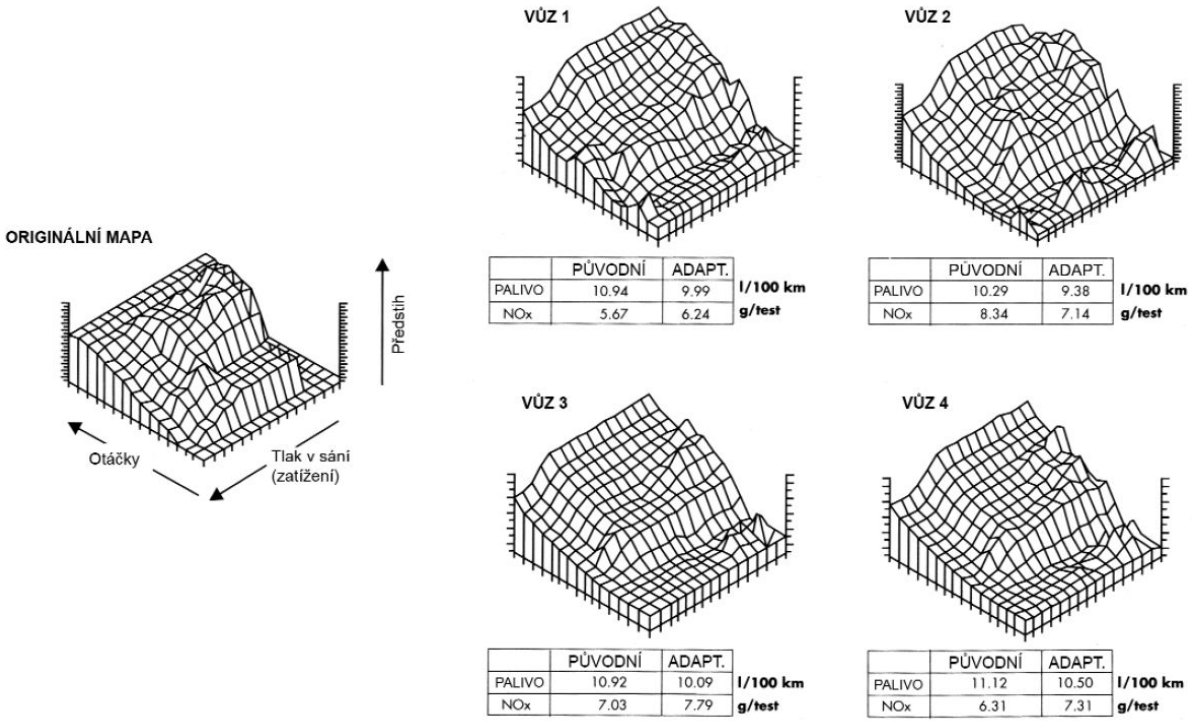
Elektrické signály ze snímačů, které se do řídicí jednotky přivádějí kabelovým svazkem a konektorem řídicí jednotky, mohou mít různé formy – např. analogové, digitální nebo impulzní. Analogové vstupní signály jsou signály, které snímače vysílají jako různé hodnoty napětí uvnitř daného rozpětí. Jsou to fyzikální veličiny, které jsou řídicí jednotce předávány jako analogové naměřené hodnoty (např. množství nasávaného vzduchu, tlak v sacím potrubí a přeplňovaní tlak, atmosférický tlak, napětí akumulátoru, teplota chladicí kapaliny, teplota nasávaného vzduchu a teplota paliva). Tyto analogové hodnoty se musí v analogově digitálním měniči (A/D převodník) v mikropočítači řídicí jednotky převádět na digitální hodnoty. Digitální vstupní signály jsou signály obdélníkového tvaru. Mají jen dvě hodnoty – „vysoká“ a „nízká“ nebo „zapnuto“ a „vypnuto“. Tento typ signálů vysílá např. Hallův snímač jako snímač polohy vačkové hřídele nebo rychlosti otáčení. Mikropočítač řídicí jednotky je může zpracovávat bez jakéhokoliv převádění. Impulzní signály vysílají např. indukční snímače otáček zpracovávají se ve vlastním vloženém obvodu řídicí jednotky a následně převádějí na obdélníkové signály.

3.2.3 Zpracování signálů

V řídicí jednotce se nachází ústřední spínací stanice pro všechny sledy funkcí. Základním prvkem je mikropočítač s programovou a datovou pamětí. V něm probíhají všechny algoritmy řízení a regulace (výpočtové postupy). Jako vstupní signály slouží vstupní hodnoty (parametry), které jsou získávány ze snímačů a rozhraní (řídicí jednotky jiných systémů). Vstupní hodnoty zatížení a počet otáček jsou hlavními vstupními hodnotami (základními hodnotami), které ovlivňuje řidič pomocí akceleračního pedálu. Ostatní parametry (např. teplota chladicí kapaliny a vzduchu, atmosférický a přeplňovaní tlak atd.) slouží ke korekcím, a proto se nazývají korekčními parametry. Po vyhodnocení dodaných signálů mikropočítač pomocí programu z pevné paměti a uložených charakteristik a polí charakteristik daného motoru počítá výstupní signály.

3.2.4 Programová paměť

Program (aplikace), který mikropočítač potřebuje pro svou práci, je uložen v jeho pevné paměti, označované jako ROM nebo EPROM. V této paměti se navíc nacházejí i charakteristiky a pole charakteristik specifické pro daný motor, které jsou potřeba pro jeho řízení. V energeticky nezávislé přepisovatelné paměti, označované jako EEPROM, se ukládají jednak údaje pro zablokování vozidla proti neoprávněnému odjetí, hodnoty vyladění a hodnoty nastavené ve výrobě a jednak závady a adaptované hodnoty (hodnoty odvozené a naučené ze sledování stavu motoru a jeho pracovních režimů, obr.3.8 Aby byl počet konstrukcí řídicích jednotek u jednoho výrobce automobilů co nejmenší, mají řídicí jednotky kódování variant. Pomocí tohoto kódování je možné, aby si výrobce (na konci výroby daného typu) nebo autoservis vybral příslušné pole charakteristik uložené v EPROM a mohl tak provádět určité požadované funkce.



Obr.3.8 Vliv adaptace ŘJ na změnu pole charakteristik zapalování. Porovnání originálního pole s adaptovanými poli čtyř vozidel s identickým motorem. [5]

3.2.5 Datová paměť

Datová paměť je dočasná přepisovatelná paměť (označovaná RAM). Její pomocí se zaznamenávají a znovu načítají data proměnlivých hodnot, jako jsou např. hodnoty signálů nebo hodnoty vypočtené. Aby mohla RAM fungovat, musí být trvale napájena proudem. Pokud se při vypnutí zapalování vypne i napájení řídicí jednotky, veškerá data uložená v RAM se ztratí.

3.2.6 Výstupní signály

Mikropočítač pomocí vysílaných výstupních signálů ovládá buď koncové stupně, které jsou jako výkonové koncové stupně přímo spojeny s nastavovacími (výkonnými) členy, nebo koncovými stupni ovládá jenom relé, která obstarávají napájení nastavovacích členů. Výstupní signály se vysílají buď jako signály k sepnutí – výkonné členy se tím jen zapínají a vypínají – nebo jako signály modulované šířkou impulzů (signály PWM), tzn. jako obdélníkové signály s konstantním kmitočtem (periodou), ale s proměnnou dobou zapnutí.
Koncové stupně v řídicí jednotce jsou chráněny proti krátkému spojení na kostru nebo na napětí akumulátoru a proti elektrickému přetížení. Tato ochrana identifikuje případné závady a ohlásí je mikropočítači řídicí jednotky.

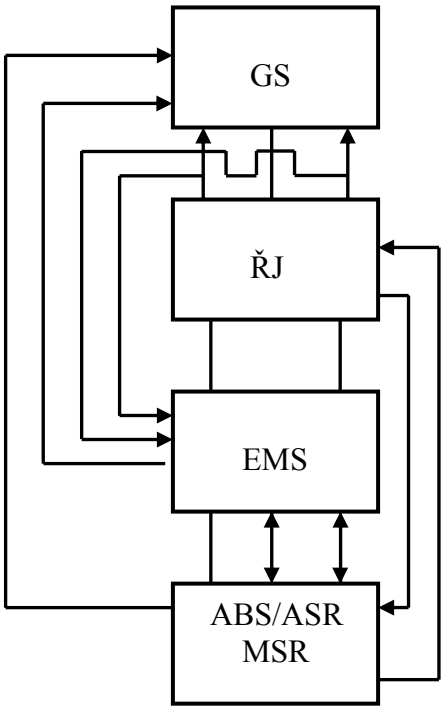
U některých řídicích jednotek se při zastavení motoru, při odpojení svorky 15 (vypnutí zapalování), udržuje pomocí hlavního relé uzavřený přidržovací obvod ještě tak dlouho, dokud se nedokončí zpracování právě běžícího programu.

3.2.7 Rozhraní k řídicím jednotkám jiných systémů

Rostoucí využívání elektronických řídicích systémů v automobilech vyžaduje jejich propojení v síti. Vzájemné předávání dat mezi těmito systémy potřebuje menší počet snímačů a zlepšuje využití jednotlivých systémů. Rozhraní (místa propojení sítí) se dělí na:

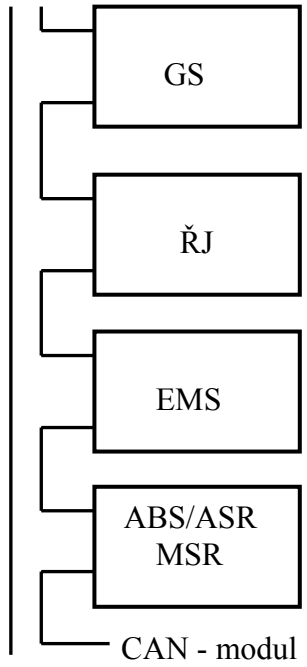
- Konvenční rozhraní (přenos dat) – každému signálu je přiděleno samostatné vedení. Přenos dat mezi řídicími jednotkami různých systémů probíhá prostřednictvím jednotlivých vedení, tzn. že každý signál se vysílá jediným vedením obr.3.9.

- Sériový přenos dat, např. CAN (Controller Area Network = datová sběrnice místní sítě), ve kterém se všechna data přenášejí jedním datovým vedením. U sériového přenosu dat se signály všech řídicích jednotek, které mají sériové rozhraní (propojení řídicích jednotek) přenášejí jednou sběrnicí (busem) viz. obr.3.10, s tou výhodou, že se signál jednoho snímače může zpracovávat ve všech připojených řídicích jednotkách. Rychlosti přenosu však při tomto přenosu musí být natolik vysoké, aby se dosahovalo dokonalého zachování reálného času, tj. aby nedocházelo k časové ztrátě. Tyto přenosové rychlosti se pohybují mezi 125 kbit/s a 1 Mbit/s. V tomto principu je lineární strukturou sběrnice vzájemně spojeno několik řídicích jednotek se stejným oprávněním. Při výpadku jedné řídicí jednotky se přenos dat pro všechny ostatní zachovává. Výhodou sériového přenosu dat v porovnání s konvenčními rozhraními je, že se mohou vysokou rychlostí bez zatížení centrálních řídicích jednotek přenášet všechny signály (analogové, digitální, impulzní).



GS – řízení převodovky
ŘJ – řídící jednotka motoru
EMS – elektronické řízení výkonu motoru
ABS – antiblokovací systém brzd
ASR – regulace prokluzování pohonu
MSR – řízení zpožďování zapalování motoru

Obr.3.9 Konvenční přenos dat mezi ŘJ.



GS – řízení převodovky
ŘJ – řídící jednotka motoru
EMS – elektronické řízení výkonu motoru
ABS – antiblokovací systém brzd
ASR – regulace prokluzování pohonu
MSR – řízení zpožďování zapalování motoru

Obr.3.10 Řídící jednotky se stejným oprávněním spojené sběrnicovou strukturou

3.2.8 Adresování podle obsahu (asociační adresování)

V sběrnicovém systému CAN (Controller Area Network) jsou informace (zprávy) vždy adresovány podle svého obsahu. Za tím účelem je každé zprávě pro její identifikaci přiřazen jedenáctibitový „identifikátor“. Tímto identifikátorem je charakterizován obsah zprávy (např. otáčky motoru). Stanice v daném sběrnicovém systému pak vyhodnocují jen data, jejichž identifikátor je uložen v seznamu přijímaných zpráv (kontrola na příjmu). V systému CAN je tak adresování stanic pro přenos dat zbytečné.

3.2.9 Přidělování sběrnice

Je-li datová sběrnice (Bus – Bitserielle universelle Schnittstelle) volná, může každá stanice (systém) začít s vysíláním své nejdůležitější informace. Pokud začne současně vysílat více stanic, použije se k tomu přesně definované schéma. V tomto schématu prochází vždy nejprve informace s nejvyšší prioritou, u které nedochází k žádné ztrátě času nebo obsahu (bitů). Pokud některá stanice nemůže svou informaci předat dále, protože je sběrnice obsazena, stává se vždy automaticky přijímačem, tzn. že svou informaci opět přijme, a opakuje svůj pokus o její vyslání, jakmile se sběrnice uvolní.

3.2.10 Integrovaná diagnostika (On-Board-Diagnose)

Vlastní diagnostika (OBD II) existuje u všech moderních systémů. Přitom se OBD přizpůsobená evropským poměrům označuje jako E-OBD. Tato diagnostika sleduje celý systém, porovnává průběh funkcí s příkazy řídicí jednotky i informacemi jednotlivých snímačů a hodnotí jejich hodnověrnost. Tato kontrola probíhá nepřetržitě po celou dobu provozu motoru. Identifikované závady ukládá řídicí jednotka do paměti a zároveň zaznamenává, za jakých podmínek k nim došlo. Při inspekční prohlídce pak mohou pracovníci autoservisu pomocí testovacího přístroje daného systému nebo i pomocí volně zakoupeného testeru přes normalizované diagnostické rozhraní (CARB) tyto závady přečíst. Tato normalizace byla předepsána organizací Californian Air Resources Board, což je kalifornský úřad pro životní prostředí (CARB). Hlášení závad probíhá tak, že ŘJ ohlásí vzniklou závadu pomocí signální žárovky a pro pozdější vyhodnocení ji zaznamená do paměti závad. Při hlášení závady může signálka podle typu závady trvale blikat, trvale svítit nebo trvale zhasnout. Pokud se objeví více vážných závad, má blikání přednost před trvalým rozsvícením. Podle závažnosti závady na další provoz motoru je možná i změna barvy signálky (oranžová/červená). Při blikání se objevují závady, které při daném provozním režimu mohou způsobit např. poškození katalyzátoru. Při trvalém rozsvícení jde zpravidla o závady, které zhoršují emisní hodnoty výfukových plynů. Malé závady, které se vyskytují občas (sporadicky), se sice zaznamenávají do paměti, nejsou však signalizovány varovnou žárovkou. Po svém prvním vymizení se jejich výskyt sleduje počitadlem četnosti. To účinkuje tak, že se nastaví určitá četnost (např. 40), která se při každém spuštění o jednu sníží. Pokud se daná závada po 40 spuštěních už neobjevuje, je z paměti vymazána. OBD II musí podle kalifornského úřadu životního prostředí sledovat všechny součásti, které při své závadě mohou způsobit významné zvýšení škodlivin ve výfukových plynech.

3.3 Programovatelné vs. neprogramovatelné systémy řízení motoru

Řídící jednotky používané v sériové produkci vozidel nejsou programovatelné, to znamená, že datové mapy a pole charakteristik určující řízení motoru jsou uloženy v pevné nepřepisovatelné paměti označované jako RAM nebo EPROM viz. kapitola 3.3.4. To dává smysl z výrobního hlediska ve velkosériové výrobě, kdy pak motor pracuje v přípustných parametrech s ohledem na emise motoru, ekonomiku provozu a optimální životnost. Tedy pro účely velkosériové výroby je motor prvotně optimalizován a naladěn na požadované parametry na tzv. vývojových ŘJ a poté jsou data naprogramovány do ŘJ optimalizovaných pro velkosériovou výrobu. Motor je tedy řízen přesně podle naprogramovaných parametrů řídící jednotkou, která je uzpůsobená jak konstrukčně tak technologicky přesně na konkrétní požadavky motoru a tipu vozidla. Tento postup je logický a v podstatě nezbytný pro účely sériové výroby. Ovšem v určitých úzkých specializovaných oblastech použití jako např. oblast motorsportu, nelze tyto ŘJ použít, neboť jak již bylo zmíněno, jejich data jsou optimalizovány na hodnoty, které jsou optimální pro dané konstrukční parametry a použití motoru a nelze je dodatečně měnit v širším potřebném rozsahu. V těchto případech je nezbytné použití tzv. vývojové programovatelné ŘJ, které nejsou uzpůsobeny k řízení pouze konkrétního motoru, ale jsou koncipovány jak hardwarově tak softwarově k širokému a různorodému spektru požadavků řízení motoru.

4 Popis použité programovatelné řídicí jednotky

4.1 Stručný popis

Pro optimalizaci provozních režimů zážehového motoru pomocí elektronické řídící jednotky, byla zvolena plně programovatelná ŘJ, která umožňuje přesné 3D mapování (optimalizaci dat) pro řízení nejčastějších typů atmosférických i přeplňovaných morů. ŘJ může řídit až šestiválcový motor, plně elektronické zapalovaní až pro tři zapalovací cívky typu DFS (Doppelfunken-Spule – dvoujiskrová cívka) a je schopna sekvenčně ovládat až šest vstřikovacích ventilů. Disponuje datovým rozhraním CAN (controller area network) pro komunikaci s ostatními systémy a mnoha dalšími doplňkovými funkcemi vhodnými pro řízení motoru. Je založena na 32-bitovém procesoru a programovém vybavení pracujícím pod systémem Windows. Pro paměť programu a kalibrací je k dispozici celkem až 1MB paměti, která je součástí čipu procesoru. Pro záznam přechodných dějů a změny nastavení při ladění během chodu motoru je osazena paměť RAM 512KB. Pro záznam závad a událostí je určena paměť EEPROM s kapacitou do 256KB. ŘJ je vybavena osmi kanálovým záznamem dat se vzorkovací frekvencí až 20 snímků za 1s při kterém jsou trvale monitorovány a průběžně zapisovány pevně přiřazené i uživatelsky zvolené parametry motoru.



Obr.4.1 Použitá programovatelná řídící jednotka motoru

4.2 Hardware

Specifikace

Obecné	**Motory**	1 ~ 6 Válec, atmosféricky nebo přeplňovaný do 15,500 ot/min
	Mapování	2 - dimenzionální 3 - dimenzionální 3 - volitelné nezávislé mapy
	Komunikace	1 x Sériové rozhrani RS 232 1 x CAN 2.0b
Fyzikální vlastnosti	**Rozměry**	110m x 190mm x 44mm (š x d x tl)
	Hmotnost	491g
	Napájení	6,5V ~ 18V
	Obal	CNC obráběný AL, vodotěsný
Vstupy	**Snímač otáček vačky**	Indukční nebo digitální
	Snímač otáček kliky	Indukční nebo digitální, volitelně nastavitelný systém a spoušť
	Teplota vzduchu	Standardní Bosch nebo volně nastavitelná charakteristika
	Teplota vody	Standardní Bosch nebo volně nastavitelná charakteristika
Vstupy	**Zatížení**	Potenciometr nebo MAP 0 ~ 5V signál
	Lambda sonda	0 ~ 1V nebo 0 ~ 5V signál
	Rychlost	Ano
	Další	Kódovaný imobilizér , teplota výfukových plynů, Volně programovatelné vstupy mohou být přiřazeny pro teplotu oleje, klimatizace, regulace plnícího tlaku, kontrola prokluzu kol, libovolný spínač apod.

Výstupy	**Zapalovací cívka**	3 x, možnost nastavení DFS
	Vstřikovací ventil	6 x sekvenčně nebo 2 vstřikovače na válec simultánně
	Další	2-st spínaní ventilátorů , palivové čerpadlo, hlavní relé , programovatelný tacho, lambda sonda - vyhřívání, signalizace optimálních otáček k přeřazení, regulační ventil plnícího tlaku, proměnné řízení vačky, servomotor volnoběhu, CAN - komunikace, volně programovatelné výstupy, 5V a 8V napájení snímačů
Software	**Windows XP**	M3D Control 1.1 rev. 7.

Tab.4.1 Parametry použité programovatelné ŘJ



Obr.4.2 Použitá programovatelná řídící jednotka motoru

4.3 SOFTWARE

Kontrolní software pracuje pod systémem Windows a je uzpůsoben k širokému a různorodému spektru požadavků řízení motoru. Souží pro komunikaci s ŘJ, programování jejich dat, prostřednictvím kterých jsou pak spínány a ovládány jednotlivé koncové stupně, které přímo řídí požadované akční členy. Software je koncipován tak, že jednotlivé data pro řízení motoru mohou být měněny „LIVE“ , tedy za chodu motoru a umožňují nám tak sledovat okamžité odezvy, (např. výkonové parametry, nebo složení směsi) způsobené na základě změn hodnot těchto konkrétních dat (např. doba vstřiku, předstih zážehu).

Strukturu softwaru lze teoreticky velmi zjednodušeně rozčlenit na několik základních bloků:

- Hlavní konfigurace ŘJ, nastavení typu a parametrů hlavních snímačů (např. snímač polohy KH - indukční, typ impulsního kola 60- 2, reference 120° před HÚ), charakter vstřikování, nastavení typu řídících impulsů pro zapalovací cívky, otáčkové limity, hlavní parametry motoru (počet válců, pořadí zapalování, taktnost motoru, počet vstřikovačů na válec a další).

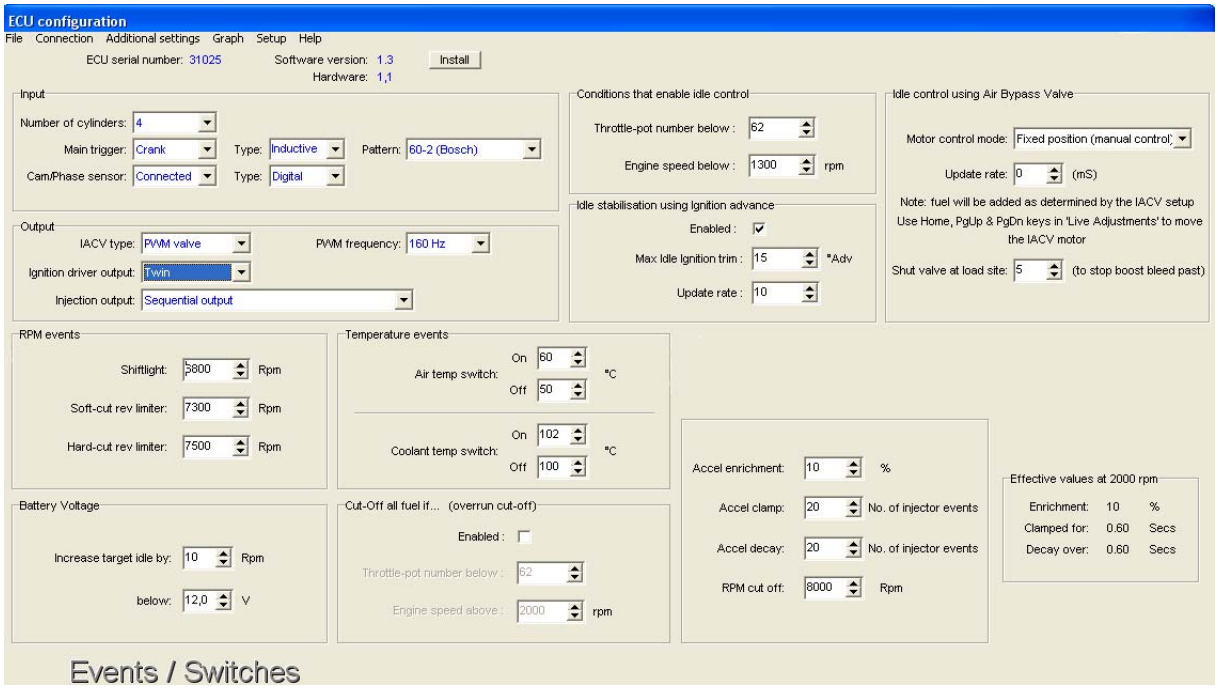
- Nastavení a kalibrace jednotlivých snímačů (nastavení rozsahu potenciometru škrtící klapky, kalibrace umístění polohy referenční značky otáčkového signálu, nastavení charakteristik teplotních snímačů, Map senzoru atd.).

- Hlavní datové mapy (pole charakteristik řízení předstihu zážehu a dávky paliva)

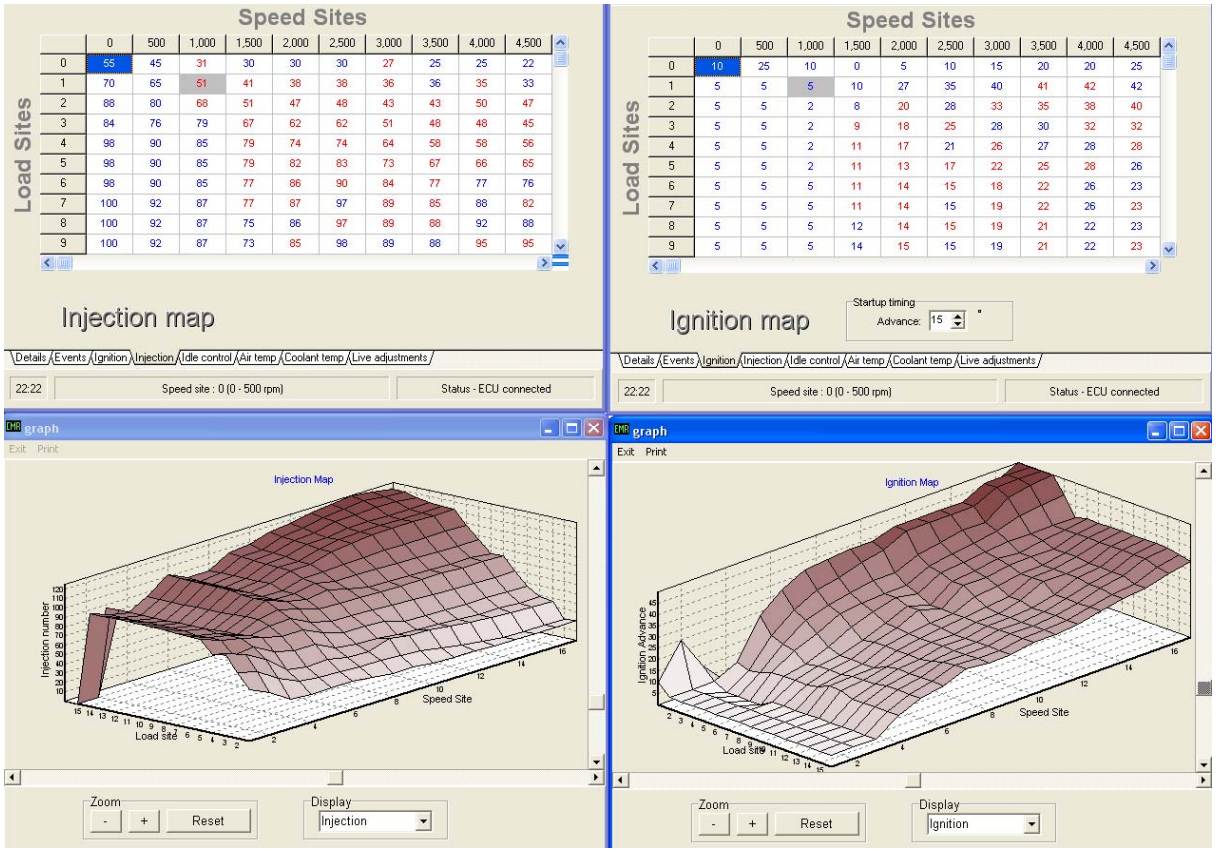
- Vedlejší datové mapy a korekční činitele (charakteristiky pro korekce hlavní mapy např. v závislosti na teplotě motoru, nasávaného vzduchu, akcelerace, stabilizace volnoběhu, mapy fáze startování atd.)

- Prostředí aktivního mapování a zobrazení aktuálních hodnot

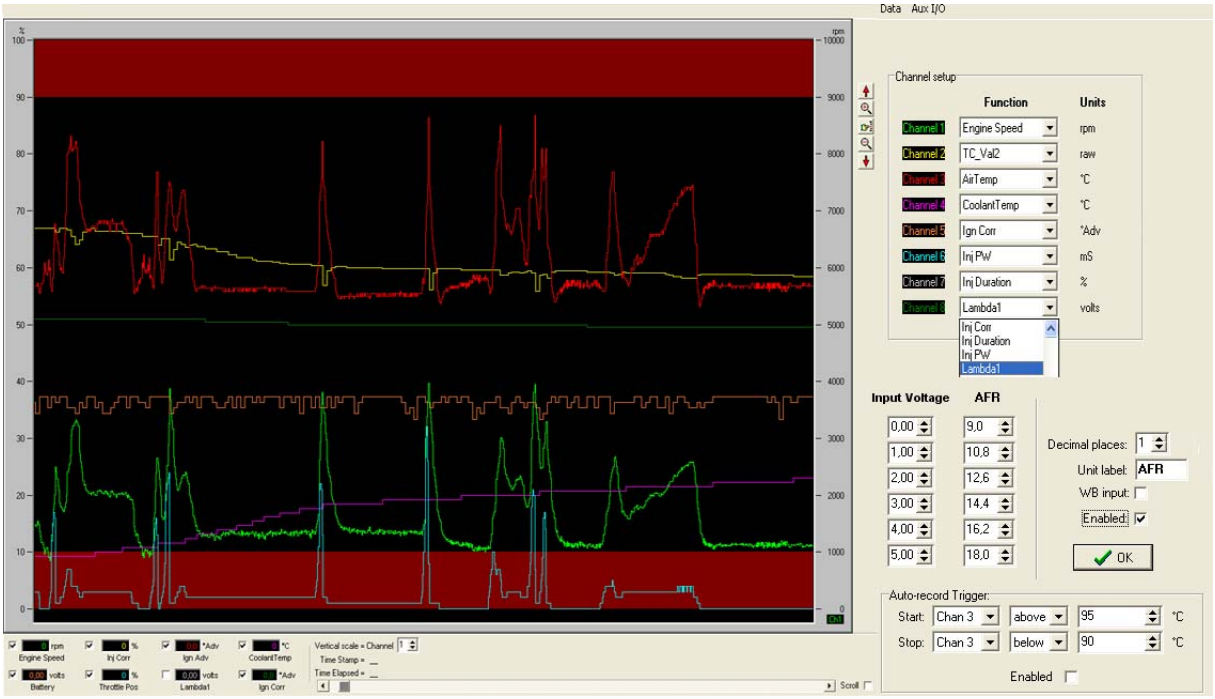
- Dataloger – prostředí pro zobrazení a záznam dat, ve kterém jsou trvale monitorovány a průběžně zapisovány pevně přiřazené i uživatelsky zvolené parametry motoru.



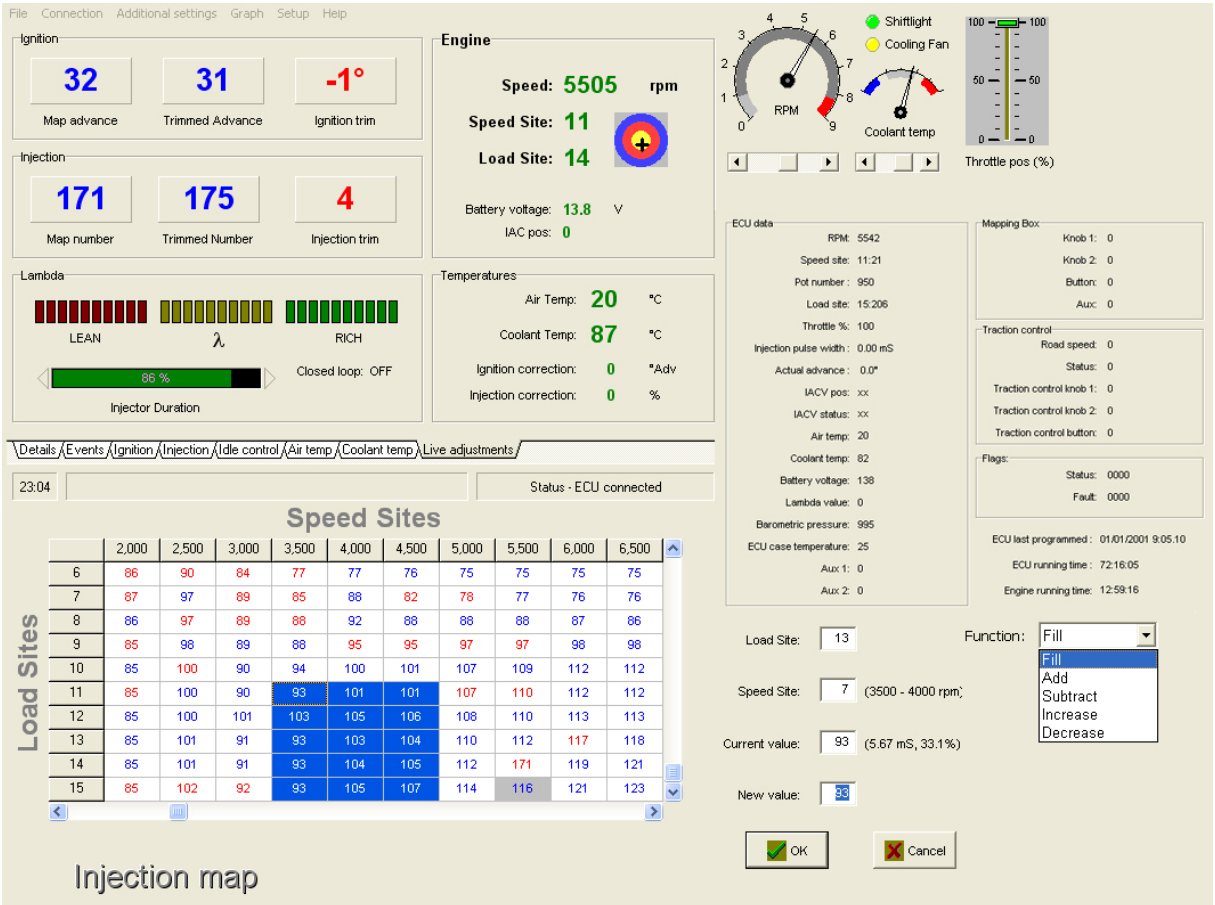
Obr.4.3 Softwarové prostředí ŘJ – hlavní konfigurační nastavení ŘJ



Obr.4.5 Softwarové prostředí ŘJ – hlavní datové mapy



Obr.4.6 Softwarové prostředí ŘJ - zobrazení a záznam dat v reálném čase

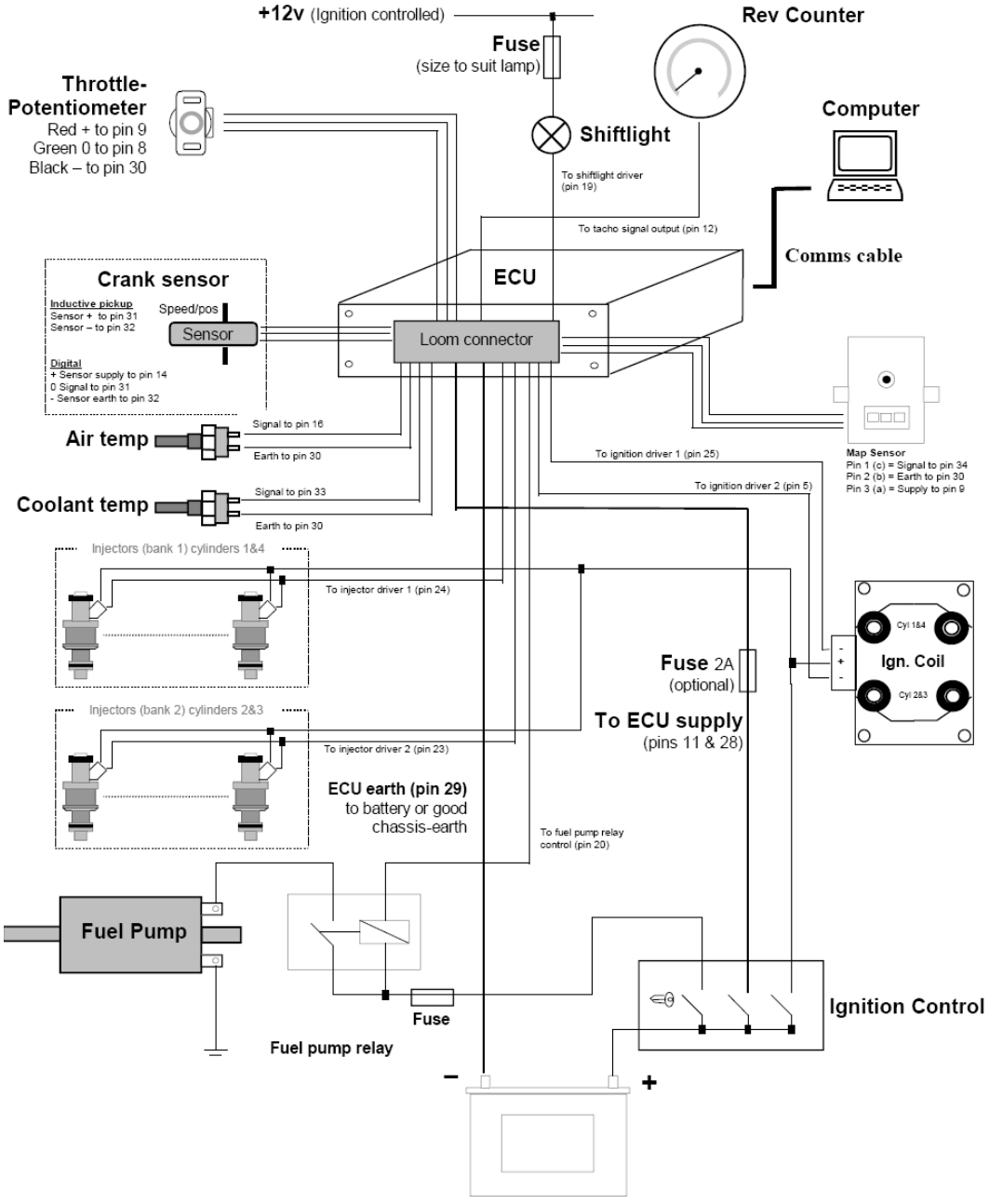


Obr.4.7 Softwarové prostředí ŘJ – prostředí aktivního mapování a zobrazení aktuálních hodnot

5 Volba vhodných snímačů a akčních členů, návrh kabelového svazku

5.1 Volba vhodných snímačů

Na základě jak hardwarových požadavků ŘJ, tak požadavků pro potřeby řízení motoru byly zvoleny nejvhodnější snímače a akční členy, které budou následně popsány včetně příslušných signálů a jejich zpracování ŘJ. Podle blokového schéma na obr.5.1 byla zhotovena kompletní kabeláž, jenž byla následně aplikovaná na motor pro měření s programovatelnou ŘJ.

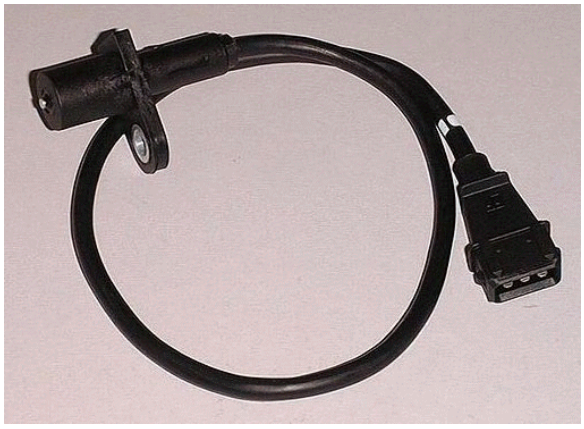


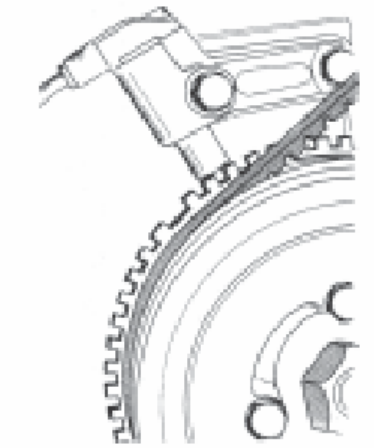
Obr.5.1 Blokové schéma zapojení elektroinstalace systému řízení motoru [8]

5.2 Funkce a konstrukční popis zvolených snímačů, jejich signály a zpracování řídící jednotkou

5.2.1 Indukční snímač otáček motoru a polohy referenční značky

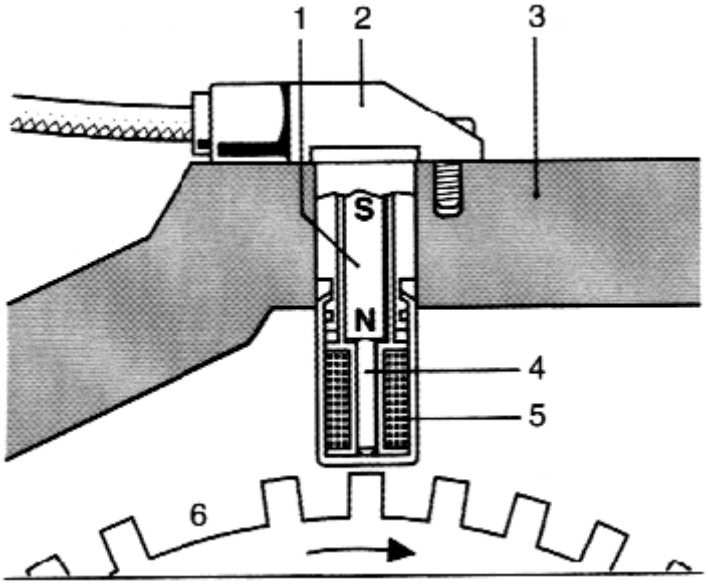
Signál ze snímače otáček motoru a polohy referenční značky je základní signál pro ŘJ.Jako snímač otáček byl zvolen indukční snímač Bosch s impulsním kolem typu 60-2, který bezdotykově sleduje otáčky motoru a zároveň jako snímač referenční značky informuje o poloze klikové hřídele. Tímto snímačem byl již motor od výrobce osazen a zároveň se také, vzhledem k jeho vlastnostem a výstupnímu signálu, jeví jako nejvhodnější pro snímání otáček klikového hřídele. Vzhledem k tomu, že se jedná o indukční snímač, nemusí být napájen – generuje signál, který ŘJ rovnou zpracovává – nemusí být dále upravován filtrován a zesilován. Signál ze snímače je generován změnou magnetického pole, která je způsobena otáčejícím impulsním kolem (mezera - zub) z feromagnetického materiálu. Toto impulsní kolo nejčastěji bývá připevněno na klikové hřídeli uvnitř bloku motoru, nebo externě kde je součástí řemenice pro pohon alternátoru. Na měřeném motoru bylo impulsní kolo konstrukčně výrobcem řešeno jako součást setrvačníku, na kterém byly na obvodu vedle ozubeného věnce pro výsuvný pastorek startéru, vyfrézovány zuby způsobující zmíněnou změnu magnetického pole. Typ impulsního kola 60-2 znamená použití kola se 60 zuby, na kterém jsou dva zuby vynechány. Kolo snímače má tedy 60 – 2 = 58 zubů. Tím vznikne 58 impulsů, každý z nich znamená 6° natočení KH, tyto impulsy jsou později ŘJ zpracovávány k selektivní regulaci klepání a vyhodnocení změny rychlosti otáčení klikové hřídele, na základě které pak ŘJ upravuje předstih pro jednotlivé válce při stabilizaci rovnoměrnosti chodu motoru. Velká mezera mezi zuby vytvořená vynecháním zmíněných dvou zubů, je pro řídicí jednotkou impuls o zcela přesně určené poloze klikové hřídele před horní úvratí prvního válce. Z těchto impulsu ŘJ vyhodnocuje otáčky motoru a tato referenční poloha je zároveň základní referenční bod pro výpočet doby předstihu zážehu, tedy okamžiku rozepnutí zapalovacích cívek a okamžiku sepnutí vstřikovacích ventilů.





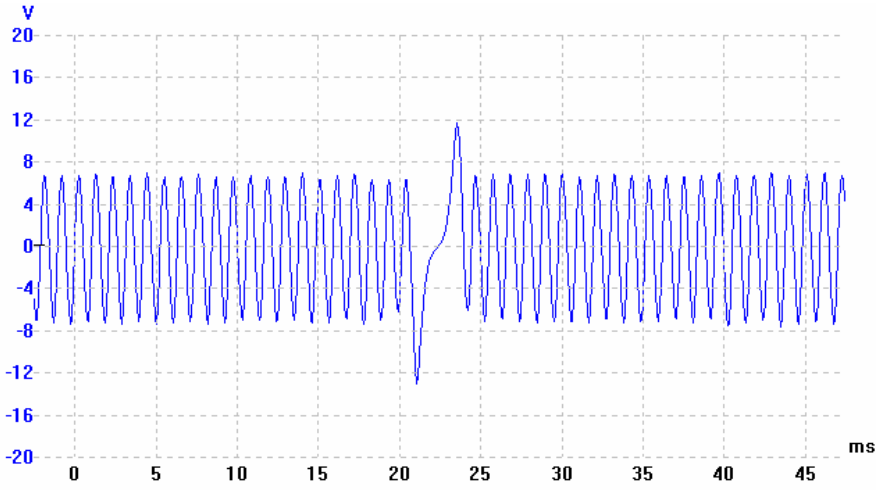
Obr.5.2, 5.3 Indukční snímač otáček a polohy referenční značky klikového hřídele Bosch [6]

Vlastní snímač představuje jádro z magneticky měkkého železa, na němž je nasunuta cívka. Toto jádro je spojeno s permanentním magnetem. Vyvolané magnetické pole se šíří železným jádrem až do ozubeného kola snímače. Hodnota vznikajícího signálu závisí na tom, zda se proti snímači nachází mezera nebo zub kola. Mezera tento magnetický tok cívkou zeslabuje, zatímco zub ho sdružuje a tím zesiluje. Na základě těchto změn magnetického toku se při otáčení kola snímače v cívce indukcí vytváří střídavý napěťový signál obr.5.5. Při výpadku tohoto signálu se motor zastaví a nelze jej ani opětovně spustit. V některých případech, kdy je motor vybaven ještě snímačem na vačkové hřídeli, je tento snímač použit jako nouzový snímač otáček, ovšem vzhledem k jeho signálu (pouze impuls o HÚ 1.válce) jej nelze použít pro selektivní regulaci klepání a stabilizaci rovnoměrnosti chodu motoru a ŘJ se tak přepne do nouzového režimu chodu motoru.



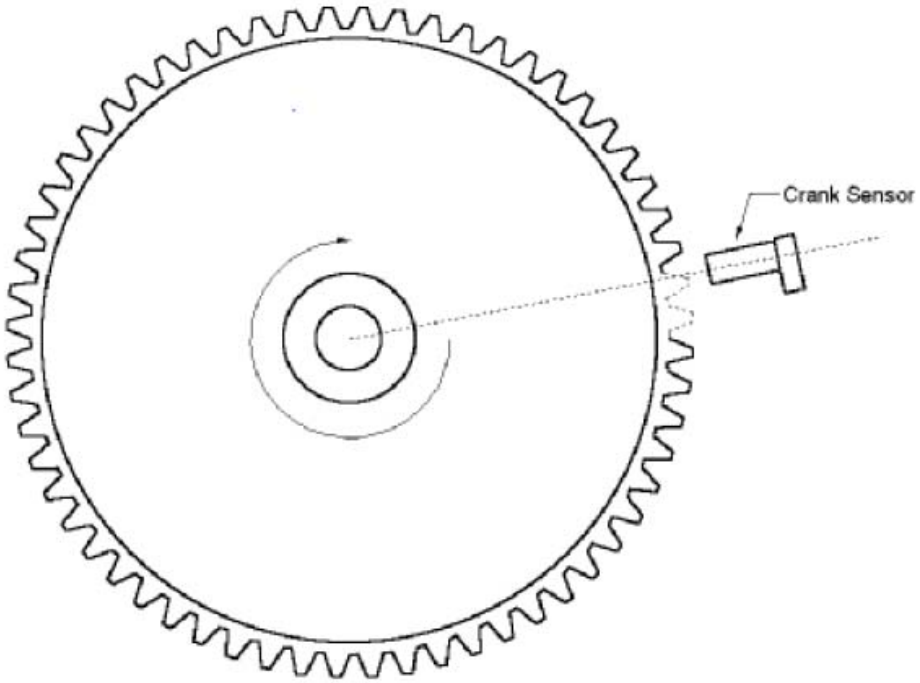
1. Permanentní magnet
2. Pouzdro
3. Skříň motoru
4. Jádro z magneticky měkkého železa
5. Vinutí – cívka
6. Impulsní kolo snímače s referenční značkou

Obr. 5.4 Indukční snímač otáček a referenční značky Bosch [6]



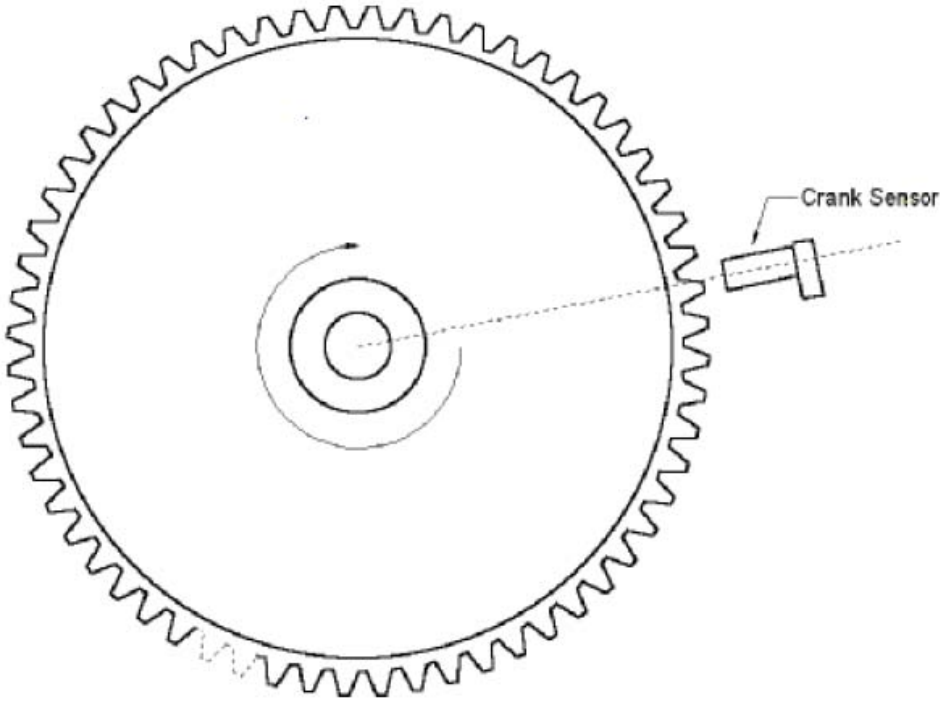
Obr.5.5 Vzorový signál z indukčního snímače Bosch s impulsním kolem 60-2.

Při bližším pohledu na referenční bod je vidět že , impuls pro ŘJ o tom , že se kliková hřídel nachází v referenční poloze, vzniká přechodem přes sestupnou hranu druhého chybějícího zubu viz. obr 5.6. Standardní pozice tohoto referenčního bodu bývá nejčastěji 120° před HU. 1.válce. Na měřeném motoru ovšem tato hodnota nebyla předem známa proto byla nejprve orientačně změřena a poté přesně zjištěna pomocí kalibračního softwaru a stroboskopické lampy.



Obr.5.6 Motor 120° před HU. 1. válce [8]

V pozici motoru v poloze HU 1. válce, tedy poté co referenční bod prošel přes snímač a dále, se snímač nyní nachází v poloze 120°, to jest na sestupné hraně 20. zubu za mezerou viz. Obr.5.7. Ačkoli pozice zubové mezery, tedy polohy referenčního bodu může být kdekoli od 0° až 360° bez ovlivnění správné funkce vstřikovacích ventilů, vzhledem k funkci zapalování je přípustné, aby se tento referenční bod pohyboval v oblasti 60° - 120° před HU Minimálně 60° proto, že tato hodnota reference musí byt nejméně o 5° větší než max. možný požadovaný předstih (zde tedy 55°), neboť těchto 5° je pro ŘJ nezbytných jako čas potřebný pro reakci systému na spouštěcí signál, následné výpočty a procesy, sepnutí a nabití cívek a v neposlední řadě také jisté zpoždění systému.

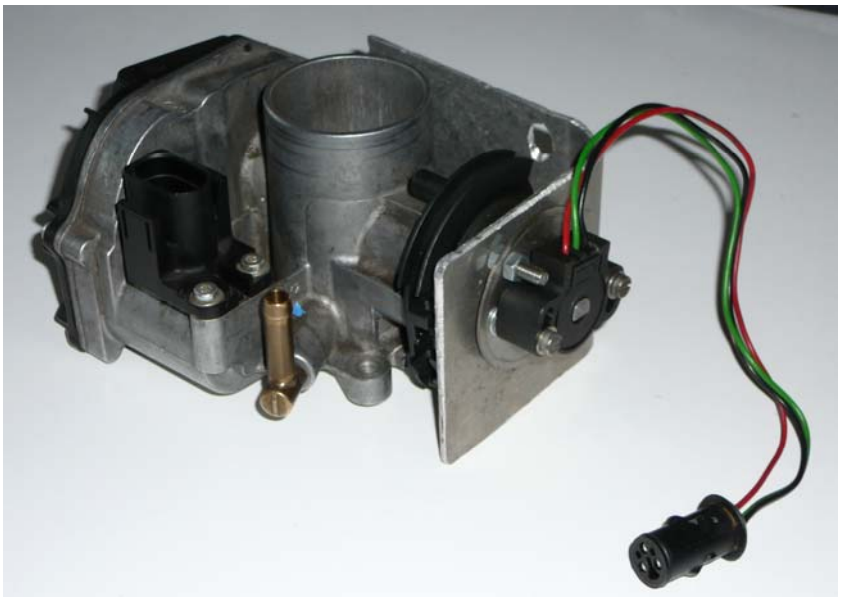


Obr.5.7 Motor v HU. 1. válce [8]

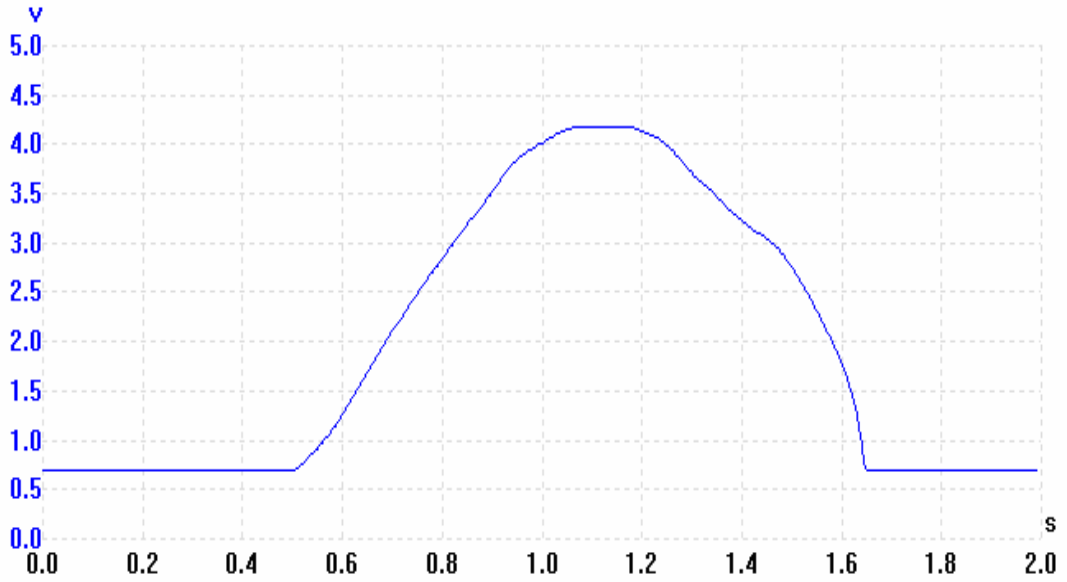
Vše v podstatě tedy funguje tak že, když je např. referenční bod 120° před HU 1. válce a aktuální hodnota požadovaného předstihu zážehu je 20° před HU, ŘJ dostane impuls, že se KH nachází v referenční poloze, následně odečte 120-20= 100, to jest 100° po obdržení referenčního signálu dá ŘJ impuls k přeskoku jiskry.

5.2.2 Snímač úhlu natočení škrtící klapky

Pro ŘJ je signál ze snímače úhlu natočení škrtící klapky druhý základní signál, který ji informuje o zatížení motoru. Pro ŘJ bylo nejvhodnější použít přesný jednodráhový potenciometr, který byl po menších konstrukčních úpravách tělesa škrtící klapky připevněn a ustaven v požadované pozici. Tento potenciometr je napájen z ŘJ 5V a jeho výstupní signál je 0 – 5V, který se lineárně mění v závislosti na natočení škrtící klapky.



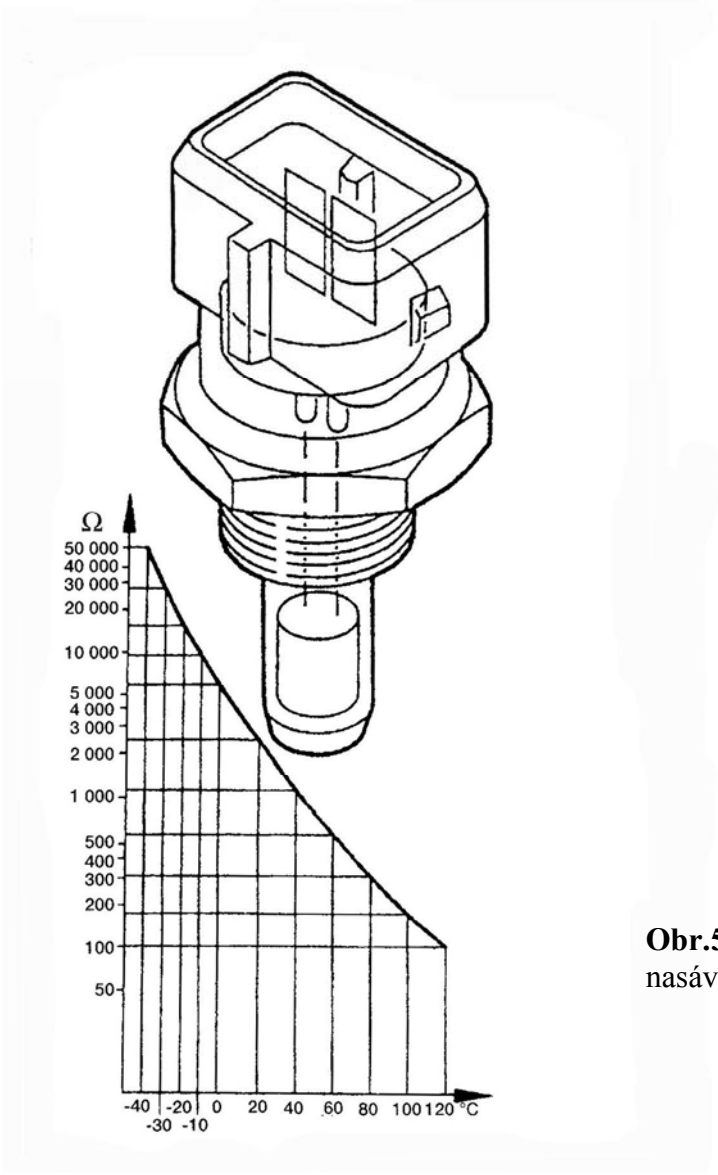
Obr.5.8 Potenciometr škrtící klapky připevněný na tělese škrtící klapky



Obr.5.9 Vzorový signál ze snímače natočení škrtící klapky při krátké akceleraci

5.2.3 Snímače teploty motoru (chladící kapaliny) a nasávaného vzduchu

ŘJ používá tyto snímače pro základní korekce doby vstřiku a předstihu zážehu.V obou případech se jedná o NTC snímače (NTC – negative temperature coefficient), to znamená že při stoupající teplotě klesá jejich odpor.



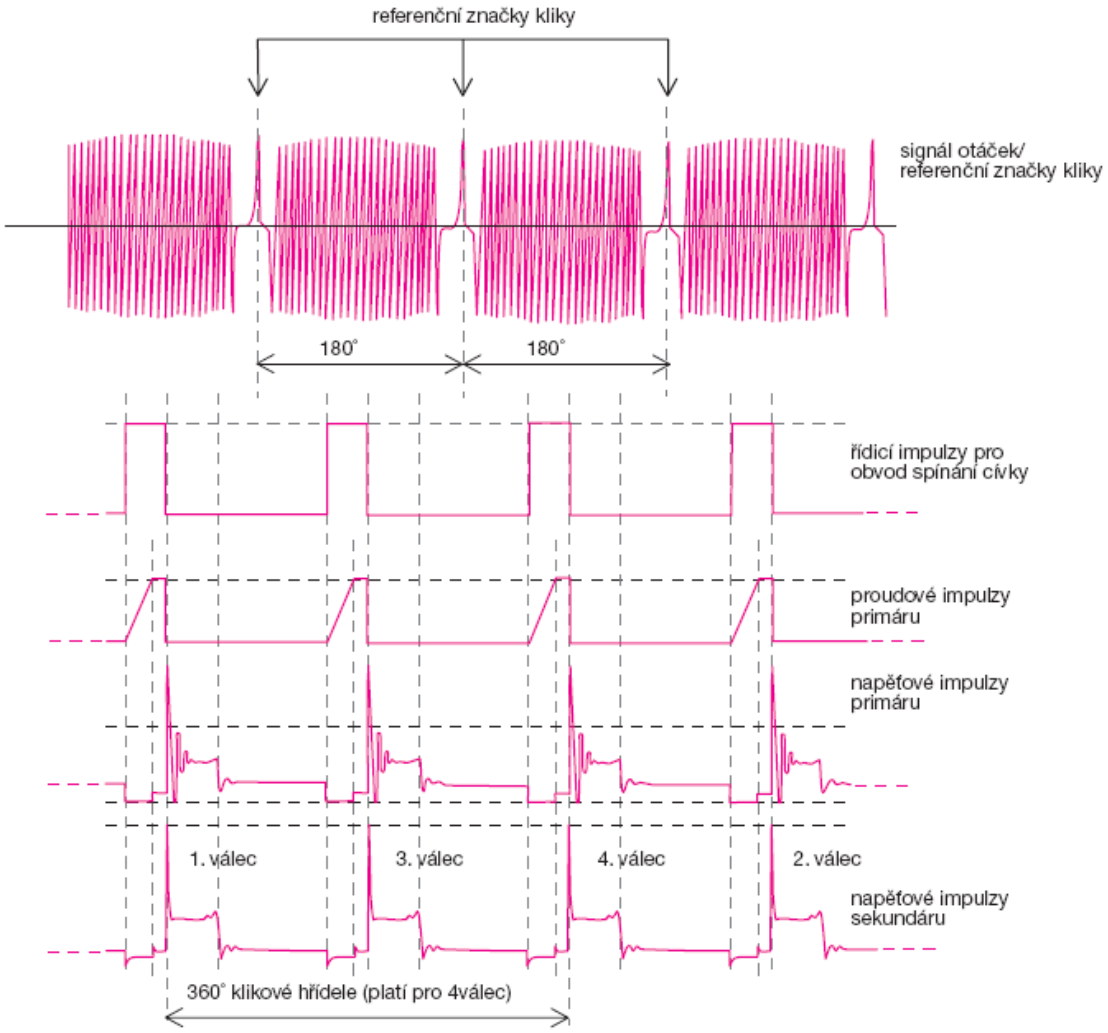
Obr.5.10 Charakteristika snímače teploty chladící kapaliny [6]



Obr.5.11 Snímač teploty chladící kapaliny a nasávaného vzduchu

5.2.4 Zapalovácí soustava

Základními výstupními signály z ŘJ jsou impulsy ovládající zapalovací cívku. Pro názornost funkce zpracování signálů zapalovací soustavy ŘJ je nejprve zobrazena pod sebou posloupnost zpracování signálu a následná reakce, klasického elektronického zapalování (s rozdělovačem vysokého napětí) . Na obr.5.12 je tedy signál otáček/referenční značky kliky, řídicí impulzy pro obvod spínání cívky, proudové impulzy primáru, napěťové impulzy primáru a napěťové impulzy sekundáru. Odshora dolů jsou tak signály uspořádány v logickém pořadí, jak odpovídá principu činnosti zapalování. Tedy od otáčkového signálu, jímž vše začíná, je v řídicí jednotce aktivován výpočet úhlu sepnutí a okamžiků zážehu. Tyto informace vycházejí z řídicí jednotky v podobě řídicího signálu pro spínací obvod. Ten spíná proud v primárním obvodu, cívka se nabíjí a v okamžiku přerušení proudu teprve vzniká napěťový impulz na primáru. Primární napětí se transformuje na vysoké napětí na sekundárním obvodu a díky němu vznikají jiskry na svíčkách.



Obr.5.12 Schematické zobrazení posloupnosti signálů elektronického zapalování [9]

Použitá programovatelná ŘJ umožňuje podle zapojení, libovolné nastavení spínání řídících impulsů pro spínání cívky, jak pro jednu zapalovací cívku a rozdělovač vysokého napětí, tak pro zapalovací cívky typu DFS (Doppelfunken-Spule - dvoujiskrová cívka) a EFS (Einzelfunken-Spule - jednojiskrová cívka, v anglické literatuře se můžeme setkat se zkratkou COP, znamenající Coil-on-Plug).

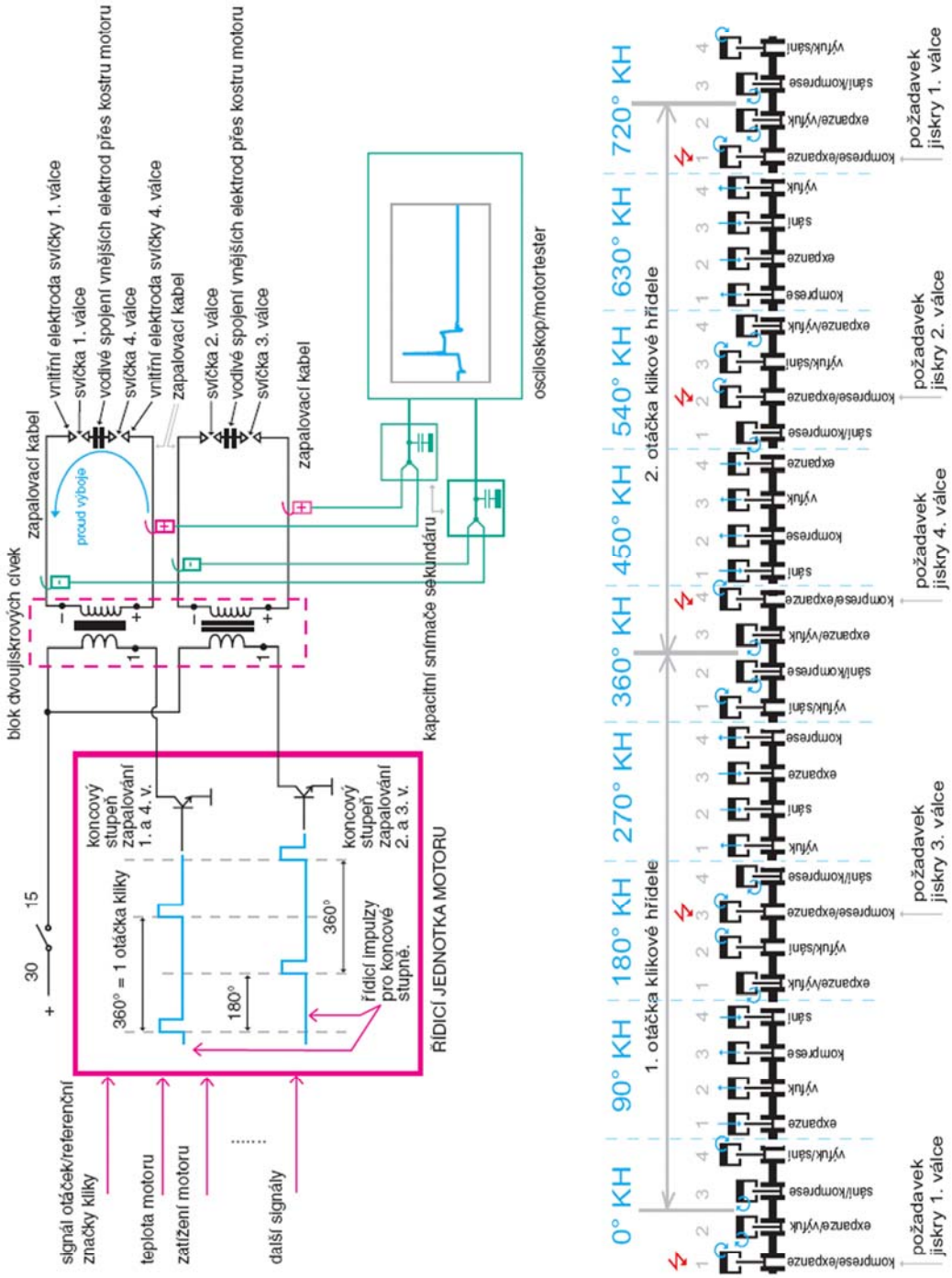
Motor byl od výrobce vybaven zapalovací cívkou typu DFS. Pro měření se tento typ zapalovací cívky jevil také jako nejvhodnější a proto také byla ŘJ softwarově nastavena a hardwarově zapojena na tento typ cívky. Původní zapalovací cívka byla však nahrazena stejným typem ovšem jiným konstrukčním uspořádáním, které bylo vhodnější pro zapojení kapacitních kleští umístěných na vysokonapětové kabely pro měření napěťových impulsů sekundáru pomocí motortesteru /osciloskopu.



Obr.5.13 Původní zapalovací cívka typu DFS a zapalovací cívka jenž byla použita pro měření (možnost připojení motortesteru a stroboskopické lampyna vysokonapěťové kabely).

Popis funkce zapalování typu DFS

Na obr.5.14 je schéma zapojení bezrozdělovačového zapalování se dvěma dvoujiskrovýmicívkami typu DFS. Prvním nápadným rysem patrným ze schématu je ta skutečnost, že žádný z konců sekundárního vinutí jednotlivých cívek není spojen ani se svorkou 1 ani se svorkou 15, jak tomu bývalo u „rozdělovačových“ zapalování. Oba konce sekundáru jedné cívky zde jsou samostatnými zapalovacími kabely spojeny se svíčkami. Ze schématu je zřejmé, že to celé může fungovat jen tak, že v určitý okamžik přeskočí jiskra na obou svíčkách současně. To je dáno zapojením svíček v sekundárním obvodu. Při dalším pohledu se na schéma, je vidět, že svíčky v sekundárním obvodu cívky tvoří sériové spojení (jsou zapojeny za sebou). Objeví-li se na sekundárním vinutí impulz vysokého napětí, rostoucí okamžité napětí impulzu působí na obě svíčky současně, prostředí mezi elektrodami jednotlivých svíček se ionizuje a je jen otázkou velmi krátkého času (řádově mikrosekundy), než napětí impulzu dosáhne takové hodnoty, kdy bude překročena elektrická pevnost prostředí mezi elektrodami svíček, a svíčkami proteče proud výboje. V jednom okamžiku se tak objevují jiskry na dvou svíčkách současně.



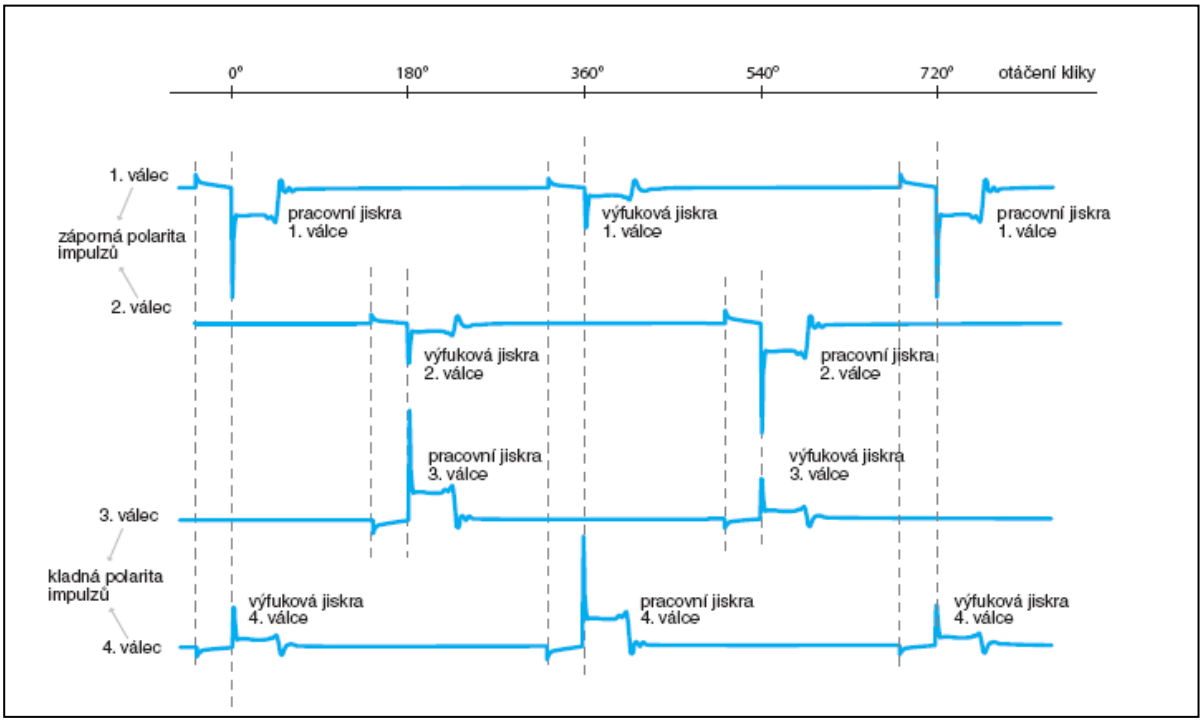
Obr.5.14 Zjednodušené schéma zapalování DFS vlevo, přeskok jiskry během dvou otáček motoru vpravo. [9]

Zapojení svíček v motoru

Nyní je třeba zamyslet se nad tím, jak tyto dvě svíčky umístit v motoru, tedy přesněji řečeno do které dvojice válců smějí být vpuštěny jiskry současně.Při úvaze, jaké děje probíhají v jednotlivých válcích. Pro jednoduchost se předpokládá čtyřdobý čtyřválec s pořadím zapalování 1-3-4-2. Je-li např. píst 1. válce v horní úvrati kompresního zdvihu, je současně také píst 4. válce v horní úvrati, ovšem zdvihu výfukového. Ve stejném okamžiku je píst 2. válce v dolní úvrati a právě vstupuje do výfukového zdvihu a píst 3. válce je rovněž v dolní úvrati, ale právě vstupuje do zdvihu kompresního. Po půlotáčce kliky, jsou písty 2. a 3. válce v horní úvrati, přičemž píst 2. válce má právě za sebou výfukový zdvih a píst 3. válce je na konci kompresního zdvihu. Teď jsou tedy písty 2. a 3. válce „nahoře“ a písty 1. a 4. válce „dole“. Po další půlotáčce jsou nahoře zase písty 1. a 4. válce, ovšem nyní je na konci kompresního zdvihu píst 4. válce a na konci výfukového zdvihu píst 1. válce. Ve zkratce tedy, písty 1. a 4. válce jsou stále spolu ve stejné poloze, s každou otáčkou se u nich střídá pracovní (kompresní) a výfukový takt. Stejně tak písty 2. a 3. válce jdou stále spolu a stejně jako u 1. a 4. válce se u nich po každé otáčce kliky střídají komprese s výfukem. Pro lepší představu jsou pohyby pístů v jednotlivých válcích, rozfázované po 90° otočení kliky, znázorněny na obr.34. Vyjděme nyní z polohy kliky 0°. V tomto okamžiku, respektive přesněji o několik stupňů dříve, vzniká požadavek na přeskok jiskry v 1. válci. Vzhledem k elektrickému zapojení cívky musí současně s jiskrou 1. válce přeskočit ještě jedna jiskra a to ve válci 4. V něm přechází píst z výfukového taktu do sání. Na konci nebo během trvání výfukového taktu lze jiskru „pustit“ bez problémů do válce, Při chodu motoru je požadavek na přeskok „pracovní“ jiskry převážně před horní úvratí kompresního zdvihu, ať již větší či menší počet stupňů, a tudíž i jiskra, současně přeskakující v jiném válci (v tomto případě ve čtvrtém), nastane před koncem výfukového taktu. Ovšem při chodu motoru mohou nastat stavy, kdy je potřeba nastavit pozápal, tedy přeskok jiskry po horní úvrati kompresního zdvihu. Uvažujme takovouto pracovní jiskru, přeskakující po horní úvrati kompresního zdvihu 1. válce. Současně s ní také přeskakuje jiskra ve 4. válci. Tam ovšem po horní úvrati výfukového taktu probíhá sání. Tato jiskra by tedy skočila do jistého objemu čerstvě nasávané směsi. To je nežádoucí. Tedy přesněji, lze takovou jiskru připustit jen do relativně malého úhlu po horní úvrati, dokud je zde nasávané směsi vzduchu s palivem zatím velmi málo. Jiskra do výfukového taktu (respektive do začínajícího sání) je zde tedy jistým negativním faktorem, omezujícím celkový rozsah přestavení předstihu. Vrátíme-li se k obrázku 1, je tedy již jasné, proč je jedna cívka spojena se svíčkami 1. a 4. válce. Analogicky to platí i pro druhou cívku, spojenou se svíčkami 2. a 3. válce. Probíhají tam stejné děje, jaké jsou výše popsány pro 1. a 4. válec, jen jsou časově (úhlově) posunuty o 180° otočení kliky. Časově (úhlově) posunutého okamžiku zážehu jisker 2. a 3. válce oproti jiskrám 1. a 4. válce je dosaženo jednoduše časovým posunem mezi řídicími impulzy pro jednotlivé koncové stupně v řídicí jednotce motoru obr.5.14.

Dvojí polarita

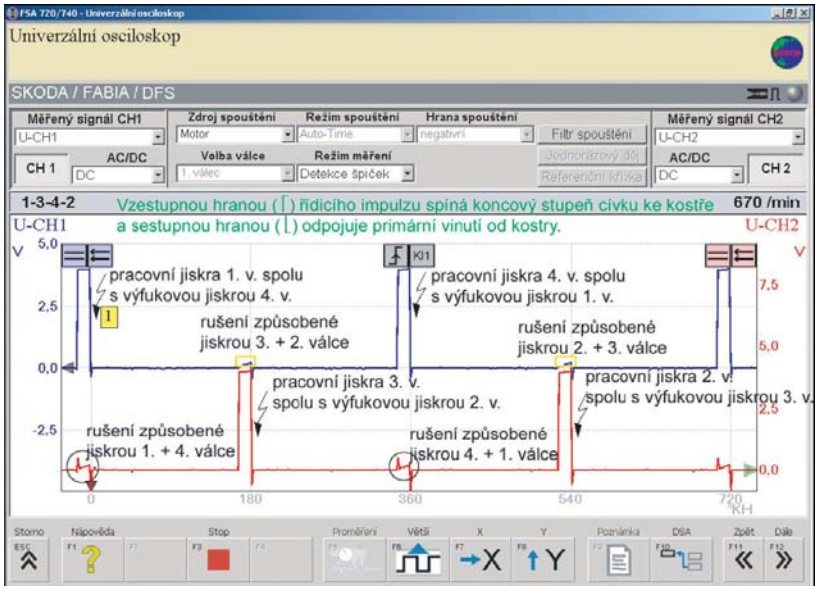
Na obrázku 5.14 je u „horní“ cívky naznačena polarita napětí na jednotlivých koncích (vysokonapěťových vývodech) sekundárního vinutí. Představme si, že na sekundárním vinutí právě vzniklo vysoké napětí a budeme předpokládat, že na vývodu vinutí, spojeném se svíčkou 1. válce, je záporná polarita napětí, jak je naznačeno v obrázku. Proud výboje (jiskry) poteče ve směru od kladného konce vinutí přes jiskřiště svíčky 4. válce do kostry motoru. Ani jeden z vývodů sekundáru však není spojen s kostrou, takže přes kostru motoru se proud k cívce vracet nebude. Proud výboje poteče dál kostrou k vnější elektrodě svíčky 1. válce a dále přes jiskřiště této svíčky a zapalovací kabel na druhý, záporný konec sekundárního vinutí. Vnější elektrody svíček, spojené prostřednictvím kostry motoru, mají potenciál 0 voltů. Na vnitřní elektrodě svíčky 1. válce (a tudíž i na zapalovacím kabelu k 1. válci) je napětí záporné polarity, na vnitřní elektrodě svíčky 4. v. a zapalovacím kabelu 4. válce je naopak polarita napětí kladná. Podobně tomu je i na druhé dvojici svíček. Je třeba ještě doplnit, že přeskoková napětí jiskry 1. válce a současně vznikající jiskry 4. válce nejsou totožná. Je třeba si uvědomit, že jiskry přeskakují v naprosto odlišném prostředí. Je-li v prvním
válci právě kompresní zdvih, je mezi elektrodami svíčky 1. válce velký tlak směsi a tomu odpovídá vysoké přeskokové napětí. Ve stejné době je ve 4. válci výfukový takt a jiskra zde přeskakuje do relativně nízkého tlaku spalin. Přeskokové napětí „výfukové“ jiskry je proto nízké (a má opačnou polaritu než „pracovní“ jiskra v 1. válci). Když se role válců po jedné otáčce kliky otočí, to znamená v 1. válci bude výfukový takt a ve 4. válci kompresní zdvih, pak „výfuková“ jiskra 1. válce bude mít stále stejnou zápornou polaritu, ale nízké přeskokové napětí, naopak „pracovní“ jiskra 4. válce bude mít stále kladnou polaritu, ale vysoké přeskokové napětí.



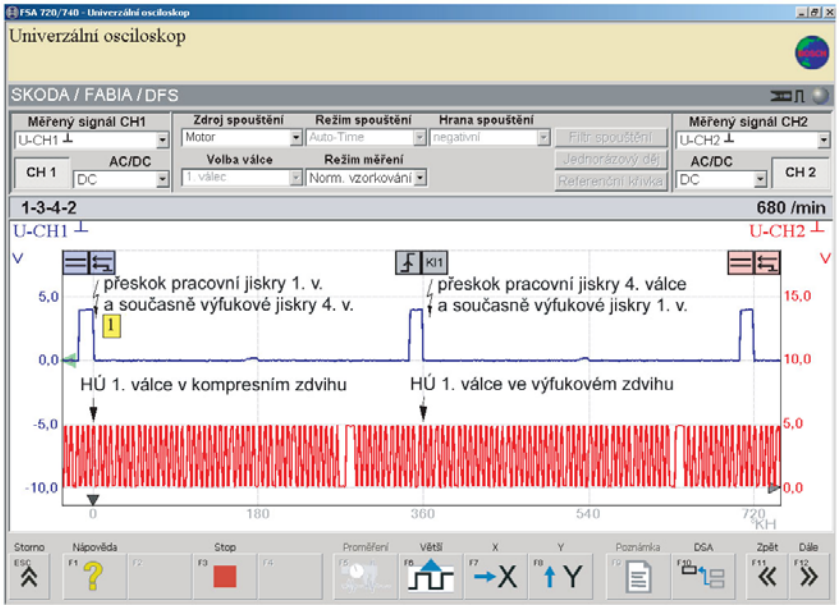
Obr.5.15 Napěťové obrazy impulzů na svíčkách jednotlivých válců (zobrazená polarita impulzů odpovídá skutečné polaritě) [9]

Otáčkový signál a řídící impulzy

Na obr.5.16 jsou vidět řídicí impulzy pro koncový stupeň primárního vinutí první cívky, jejíž sekundár je připojen ke svíčkám 1. a 4. válce (modrá křivka) a rovněž řídicí impulzy pro koncový stupeň primáru druhé cívky, spojené s 2. a 3. válcem (červená křivka). Z poznámek v obrázku jasně vyplývá, který řídicí impulz spouští kterou jiskru. Na obr.5.17 jsou pak řídicí impulzy první cívky (cívka pro 1. a 4. válec) spolu se signálem snímače otáček/referenční značky kliky. Na signálu snímače otáček jsou vyznačeny body, odpovídající horní úvrati 1. válce.



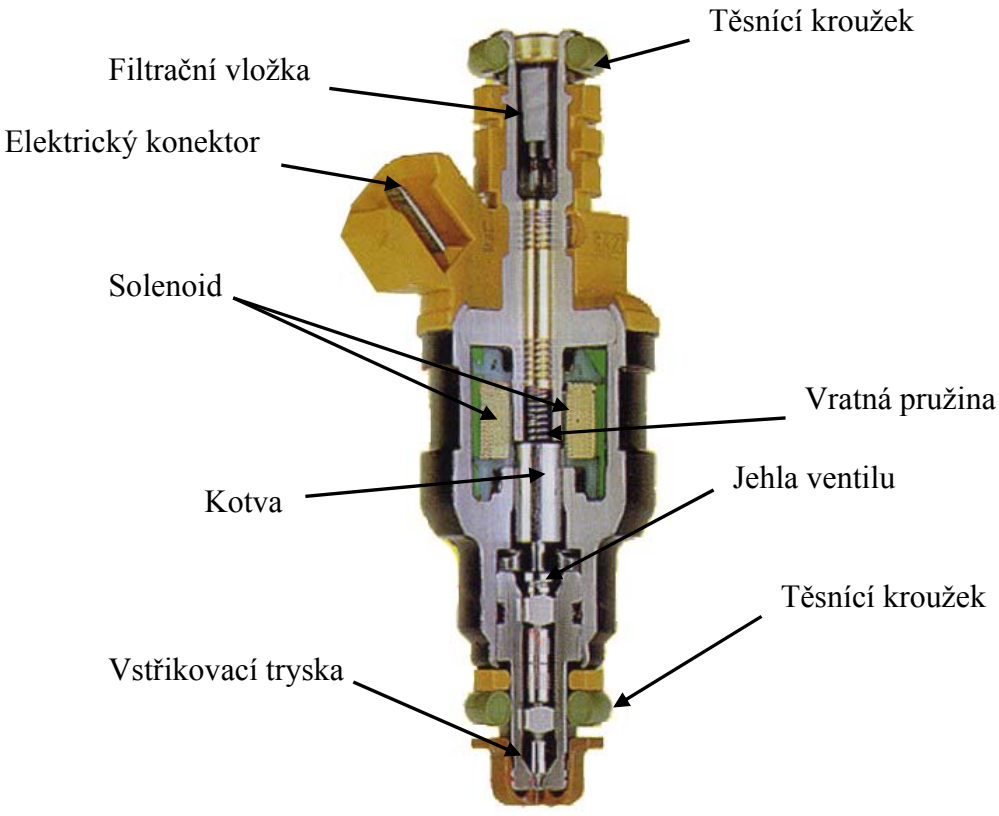
Obr.5.16 Řídící impulsy koncového stupně cívky 1. + 4.válce (modře) a 2. + 3.válce (červeně)



Obr.5.17 Signál otáček/referenční značky kliky(červeně) a řídící impulsy pro koncový stupeň cívky 1. + 4. válce (modře)

5.2.5 Ovládání a funkce vstřikovacích ventilů, elektromechanika ventilu

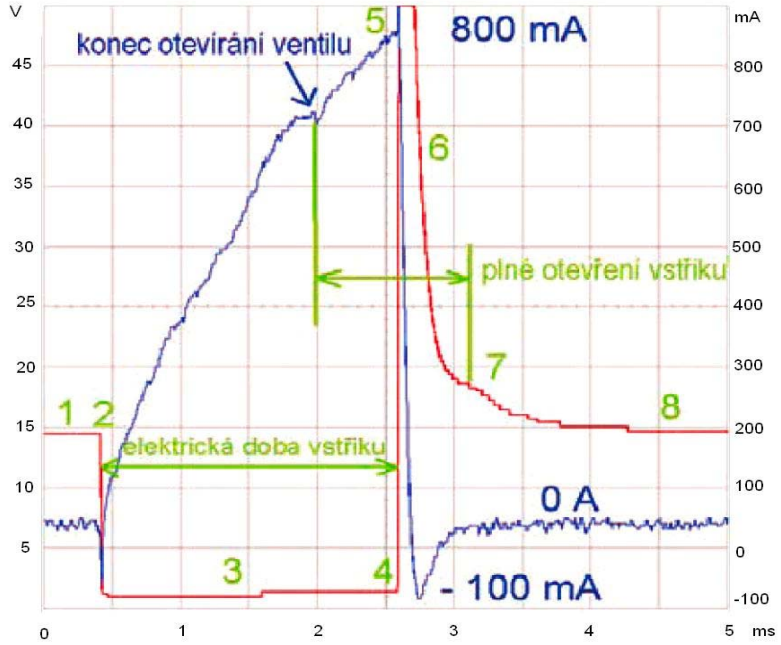
Vstřikovací ventil rozprašuje palivo do sacího potrubí hlavy motoru příslušného válce (nepřímé vstřikování). Ventily jsou napájeny palubním napětím díky relé, které řídicí jednotka aktivuje sepnutím na kostru. Otevření ventilu je dosaženo sepnutím záporné strany na kostru, čímž začne protékat elektrický proud (vzniklé magnetické pole zdvihne jehlu ventilu). Zavření ventilu je dosaženo rozepnutím záporné strany od kostry. Ventil je periodicky otevírán a zavírán s vysokou frekvencí (pracovní takty válců). Vstřikované množství paliva je řízeno změnou doby otevření vůči zavření (pevný počátek, proměnný konec vstřiku). Při deceleraci se u tohoto systémů vstřikování vypíná (ventily se nespínají na kostru).



Obr.5.18 Řez vstřikovacím ventilem

Signál vstřikovacího ventilu

Na obr.5.19 je oscilogram, který znázorňuje průběh jednoho cyklu vystřikovacího ventilu červená křivka je napěťový průběh na spínací straně a modrá je proudový průběh. Oscilogram byl pořízen při volnoběhu motoru. Časová základna 500 mikrosekund na dílek (celkem 5 ms). Červený signál 5 V na dílek (celkem 50 V). Modrý signál 100 mV na dílek (100 mV = 100 mA).



Obr.5.19 Průběh jednoho cyklu vstřikovacího ventilu při volnoběhu. Červená = napětí, modrá = proud. [9]

1) Tranzistor v ŘJ je otevřený, napájecí napětí je i za vinutím. V tento okamžik by mělo mít napájecí napětí vstřikovacího ventilu hodnotu palubního napětí, bez výrazných poklesů. Elektrický proud v tento okamžik obvodem ještě neprochází.
2) Tranzistor sepnul na pokyn řídicí jednotky, obvod je uzavřen. Projevuje se elektrický odpor vinutí, jímž proud zatím neprochází, a napětí je téměř rovno nule.
3) Magnetické pole kolem vinutí a proud tekoucí obvodem se zvětšují. Magnetické pole postupně dosáhne hodnoty, při které otevírá jehla ventilu. Napětí je již větší než nula, protože se již vytváří odpor pro elektrický proud (tranzistor, vedení).
4)Tranzistor rozepnul na pokyn ŘJ, magnetické pole začíná slábnout. Elektrický proud přestal téct, klesnutím intenzity magnetického pole vznikla samoindukce napětí ve vinutí. Okamžikem rozepnutí tranzistoru je měněna doba vstřiku ventilu.
5) Samoindukce napětí. Při sepnutí se ve vinutí zvyšovalo magnetické pole, které se při rozepnutí musí ztratit. Ztrátou magnetického pole (pohyb magnetického pole kolem vodiče = indukce) vznikne indukce tím větší, čím je změna zanikajícího magnetického pole rychlejší a čím větší byla jeho původní velikost.
6) Vybíjení napěťového potenciálu vinutí. Samoindukcí je krátkodobě vytvořen opačný tok proudu, než při sepnutí (100 mA). Vybíjením samoinduktivního napětí se tento proud zmenšuje.
7) Zavírání jehly ventilu. Nepatrné zvýšení napětí – „induktivní boule“ – je projev zastavení pohybu jehly ventilu. V tomto okamžiku ustal pohyb jehly v magnetickém poli.
8) Návrat na napájecí napětí. Magnetické pole zmizelo, jehla ventilu je zavřená bez pohybu.

Volba charakteru vstřikování a optimálních parametrů vstřikovacích ventilů

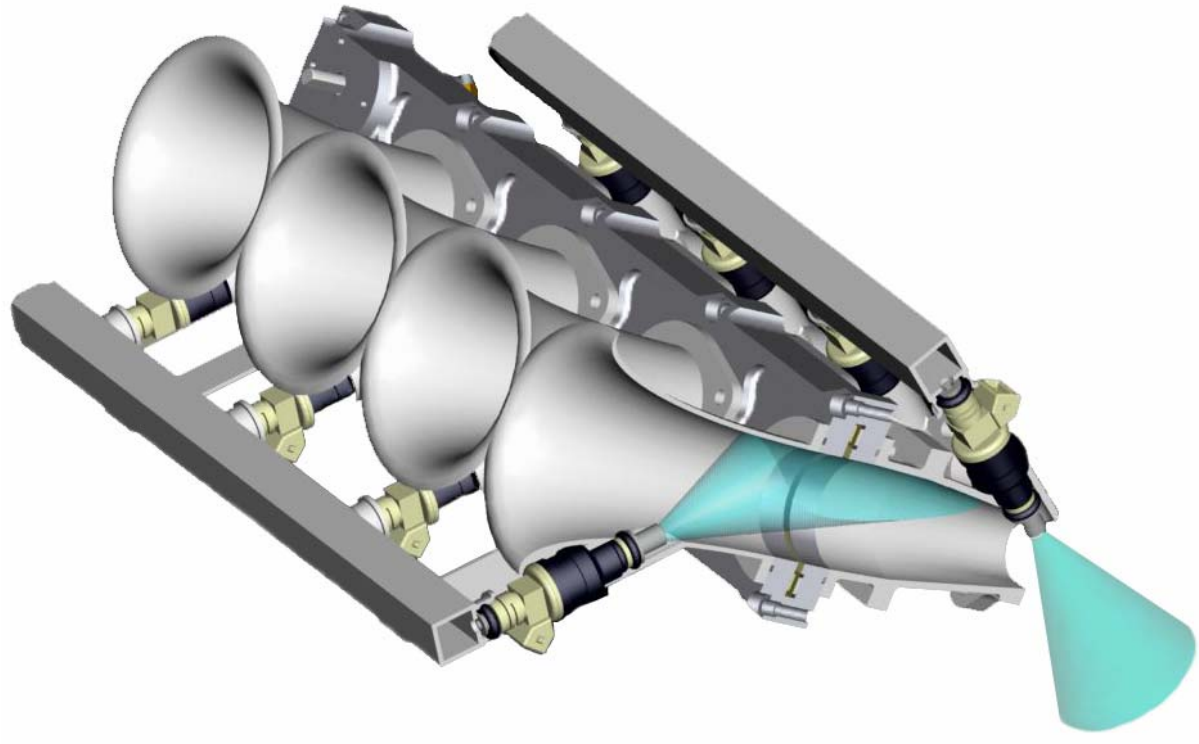
Při optimalizaci provozních režimů motoru patří správná volba vstřikovacích ventilů k jednomu z nejdůležitějších aspektů, neboť případné nedostatky, při špatné volbě jak vstřikovacích ventilů tak optimálního systémového tlaku paliva, jsou odhaleny až během mapování. Zde pak již máme podstatnou část práce za sebou a tyto nedostatky jsou jen stěží a problematicky odstranitelné bez opětovného přemapování všech již změřených a naladěných oblastí.

Je tedy potřeba citlivě volit vhodné vstřikovače, neboť při výběru vstřikovače s velkým průtokem paliva sice, bezpečně zaručíme dostatečnou dávku paliva v krátkém časovém intervalu, jak je tomu při maximálních otáčkách a zatížení, ovšem v oblastech částečných zatížení, kde je potřeba jen malá dávka paliva, mají pak takovéto vstřikovače pro vstřik tohoto malého množství paliva jen velice krátkou šířku pulsu (elektronická doba vstřiku během 1. otáčky klikového hřídele pro simultánní vstřikování a 1. pracovního cyklu motoru pro sekvenční vstřik). Tím pak vznikají značné nepřesnosti v dávkování a atomizaci (rozprášení) paliva oproti optimálním provozním podmínkám vstřikovače. Naproti tomu při volbě „malých“ vstřikovačů sice dosáhneme optimálního rozprášení a dávkovaní paliva v nízkých otáčkách a zatíženích, ovšem při maximálních otáčkách při plné dávce paliva bude dosaženo kritické hodnoty šířky pulsu a vstřikovač už dále není schopen dodávat v daném časovém intervalu dostatečné množství paliva. Pro vysvětlení tedy 100% šířka pulsu znamená, že vstřikovací ventil je plně otevřen během celé otáčky motoru (popř. pracovního cyklu). Tato situace ovšem v motoru nesmí nikdy nastat, neboť by došlo nejen k již popsaným problémům s dávkováním paliva, ale také by došlo k poškození samotného vstřikovacího ventilu.

Při volbě optimální velikosti vstřikovacích ventilů je tedy potřeba přistoupit na určitý kompromis. Nejvhodnější šířka pulsu, tedy kdy je docíleno nejlepšího rozprášení a nejpřesnějšího dávkování paliva je zhruba mezi 85 – 90% šířky pulsu.Vyšší hodnoty už jsou nepřípustné. Mohou však nastat situace kdy tento požadavek nelze splnit, jako např. u vysokovýkonných přeplňovaných motorů. Zde pak je nejvhodnější použití dvou vstřikovacích ventilů na válec s rozdílnou velikostí. Tyto funkce dnes také moderní programovatelné ŘJ umožňují, je zde ovšem potřeba zadat procentuální rozdíly mezi jednotlivými vstřikovači v dávce paliva při 100% šířce pulsu (dávka paliva při 100% šířce pulsu se používá jako tabulková hodnota udávaná výrobcem informující o „velikosti“ vstřikovače), nebo je potřeba přímo zadat průtok udávaný výrobcem. ŘJ pak provede přepočet, tak že když teoreticky v datové mapě nastavíme hodnotu požadované dávky paliva v MSPB (Micro Seconds Per Bit) nezávisle na právě použitém vstřikovacím ventilu, bude pro daný vstřikovač nastavena taková šířka pulsu, právě tak, aby výsledná dávka paliva byla stejná.(Ve zkratce tedy při stejné dávce paliva bude mít „malý “ vstřikovač vetší šířku pulsu – delší doba aktivace vstřikovače a naopak „velký “vstřikovač pro stejnou dávku paliva bude potřebovat být aktivován po kratší dobu) Toto je zejména výhodné z důvodu, že se při mapování můžeme soustředit pouze na optimální dávku paliva v daný okamžik nezávisle na provozní oblasti, tedy nezávisle na aktuálně používaném vstřikovacím ventilu. Nevzniká nám tak zbytečně nepřehledná mapa s dvěma hodnotami doby vstřiku, které by znamenaly pokaždé jinou dávku paliva. Zde je třeba dodat, že je poté potřeba ještě předem přesně specifikovat oblast ve které budou používány již zmíněné „malé“ vstřikovače a oblast použití „velkých “vstřikovacích ventilů.(např. od 80% otevření škrtící klapky a 6000 otáček/min, začne dodávat dané palivo druhá řada vstřikovacích ventilů).

Na motoru byly použity vstřikovací ventily Bosch 280 155 731H s průtokem paliva při 100% šířce pulsu 69,22 g/min při systémovém tlaku paliva 3 bar. Tímto typem vstřikovacích ventilů byl motor od výrobce vybaven. Při měření ovšem bylo dosaženo maximální přípustné hranice již zmíněné šířky pulzu, což by se při patřičných konstrukčních úpravách motoru, tedy zvýšení plnící účinnosti, mohlo jevit, jako jejich nedostatečná velikost pro potřebnou dávku paliva. Tento aspekt se dá ještě do jisté míry odstranit určitým zvýšením systémového tlaku paliva. ŘJ pak umožňuje provést přepočet již namapovaných dat, tak aby odpovídal novému vstřikovacímu tlaku a dávka paliva byla nezměněna současně při menším vytížení vstřikovacích ventilů .

Při volbě charakteru vstřikování bylo zvoleno zapojení na simultánní typ vstřikování. Bylo tak především učiněno z důvodů hardwarových možností ŘJ pro možnost použití dvou vstřikovacích ventilů na válec. To také bylo zohledněno při následné konstrukci kabelového svazku. Možnost použití dvou vstřikovačů na válec otevírá další možnosti optimalizace provozních režimů motoru. Princip je takový, že v nízkých otáčkách motoru je používán vstřikovač umístěný blíže motoru, který vstřikuje do sacího traktu těsně před sací ventil, což je pro tuto oblast ze všech hledisek nejvhodnější. Při vysokých otáčkách a plném zatížení je používán vstřikovací ventil umístěný dále od motoru, takřka na začátku vstupu vzduchu do rezonančních trubic (v některých případech např. F1 jsou vstřikovače dokonce umístěny externě před sacími rezonančními trubicemi v prostoru airboxu). Při vysokých otáčkách je zde značné proudění a zvíření vzduchu, palivo má také delší dobu na dokonalé promísení se vzduchem a vzniká tak lépe promísená homogenní směs. Ve druhém případě také dochází k ochlazení nasávaného vzduchu a tím zvýšení jeho hustoty a tedy plnící účinnosti motoru. V případě použití dvou vstřikovačů na válec je ovšem nutno následně vhodně doladit okamžik přepnutí na vzdálenější vstřiky. V některých případech (zvláště při dlouhém sacím potrubí) by po přepnutí mohlo dojít ke krátkodobému ochuzení směsi, které je odstraněno překrytím vstřiků v okamžiku přepínání (po velice krátkou dobu vstřikují oba vstřikovače zároveň – tzv. obohacovací puls). Zmíněné ochuzení vzniká při prvotním vstřiku, než se smáčí palivem doposud suché stěny sacího traktu. Kapičky na stěnách se poté začnou odpařovat a prostředí se stabilizuje.



Obr.5.20 3D model sacího potrubí využívající dvou vstřikovačů na válec

Jak již bylo zmíněno použití dvou vstřikovačů na válec otevírá další možnosti v optimalizaci provozních režimů motoru tedy zvyšování jeho výkonových parametrů. Z důvodu vyšší vypovídací schopnosti při porovnání jednotlivých měření (Použití sériové ŘJ s daty od výrobce a programovatelné ŘJ s optimalizovanými daty) bylo nakonec od použití dvou vstřikovačů na válec upuštěno, přestože by bylo dosaženo vyšších výkonových parametrů, neboť pro hodnotu naměřených výsledků bylo cennější a zajímavější porovnávat výsledky na naprosto stejném, konstrukčně nezměněném motoru.

6 Měřicí řetězec

6.1 Sestavení měřicího řetězce a volba měřících přístrojů

Sestavení měřicího řetězce a výběr měřicích přístrojů byl podmíněn souhrnem jednotlivých požadavků, které jsme stanovili pro jednotlivá měření a následné vyhodnocení a porovnání naměřených dat. Vzhledem k vysokému počtu předpokládaného množství měřených dat a konkrétních požadavků na jednotlivá měření, bylo nejprve nezbytné, důkladně promyslet co a jakým způsobem bude nejvhodnější měřit. Byl tedy nejprve sestaven základní měřicí řetězec, který byl následně na základě technických možností vybavení ústavu automobilního inženýrství a na základě nově získaných zkušeností, nápadů a vylepšení dále doplňován a optimalizován do konečné podoby, jenž byla pak aplikována pro konkrétní měření na zvoleném motoru.

Po důkladné úvaze se vlastní měření v podstatě rozdělilo na dvě základní časti.
První částí bylo měření sériového motoru, kde bylo hlavním požadavkem vhodným způsobem naměřit co největší počet potřebných dat pro následující porovnání s měřením po optimalizaci. Druhá část měření pak směřovala k aplikaci programovatelné ŘJ a optimalizaci jednotlivých provozních režimů motoru, čemuž také bylo následně podmíněno zvolené měřicí vybavení. K tomuto účelu tedy vznikly dva mírně odlišné měřicí řetězce navržené a optimalizované pro dané konkrétní požadavky jednotlivých měření.

Hlavní základ měřicího řetězce tvořila samotná brzdová zkušebna pro zkoušení spalovacích motorů s vířivým dynamometrem, ovládáním a dalším příslušným vybavením. Dalším hlavním měřicím zařízením, stanoveným již od prvopočátku pro oba řetězce bylo zařízení pro měření indikace tlaků ve válci. Dále bylo použito diagnostického kompletu Bosch FSA 750 pro měření a osciloskopickou analýzu signálů zvolených snímačů a akčních členů, který je vybaven vestavěným modulem KTS 650 pro diagnostiku a komunikaci s ŘJ motoru. Další měřicí zařízení byly využity již ve druhé části měření. Jedná se především o samotnou programovatelnou ŘJ, Lambda Controller pro měření obsahu kyslíku ve výfukových plynech pomocí širokopásmové lambdasondy, Angle Controller pro řízení úhlu natočení škrtící klapky a zařízení pro měření a analýzu snímače klepání.

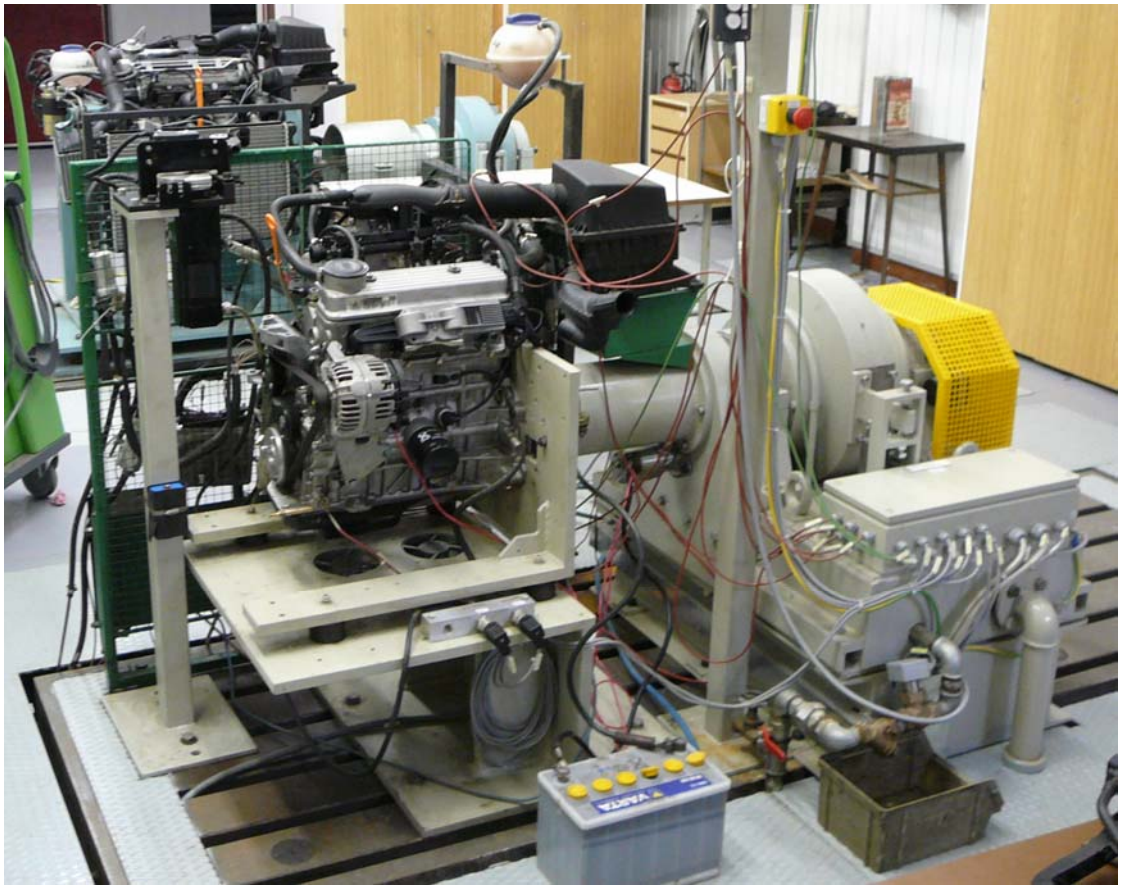
6.2 Popis pracoviště a měřící techniky

6.2.1 Zkušební stanoviště V 125

Měřicí pracoviště se zkušebnou motorů oddělené protihlukovou stěnou. Zkušební stanoviště s vířivým dynamometrem je zařízení sloužící k přesnému měření kroutícího momentu při současném měření otáček.

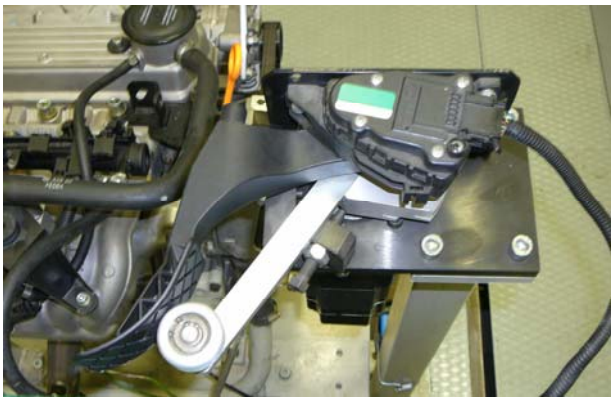
Stručný popis

Zkušební stanoviště je složeno z vířivého dynamometru (tj. vířivky V 125), řídícího rozvaděče PLC a nadřazeným PC. PLC slouží pro nízkoúrovňové řízení měniče (budiče) vířivky, sběr analogových a digitálních signálů, které se na vyšší úrovni vyhodnocují v PC programem CMSW (computer managment system work). Dynamometr řady V 125 je vybaven tenzometrickým snímačem momentu s převodníkem a inkrementálním snímačem otáčivé rychlosti. Regulaci otáček a momentu provádí přímo digitální regulační obvody měniče SIEMENS 6RA70, který je spojený přes komunikační linku PROFIBUS DP s programovatelným automatem SIMATIC S7-300. Toto spojení umožňuje předávat naměřená data na obrazovku PC (měřící systém CMSW). Výměna dat mezi PLC a PC probíhá po lince MPI nebo PROFIBUS DP.



Obr.6.1 Zkušební stanoviště v laboratořích ústavu automobilního inženýrství

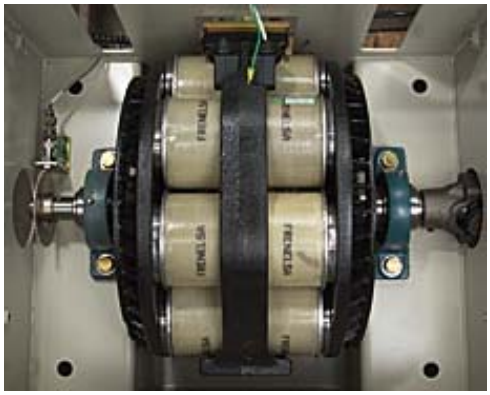
Pro ovládání zatížení (škrtící klapky) je zařízení vybaveno speciálně upraveným servopohonem. Tento servopohon dovoluje ovládat elektronický plynový pedál E-GAS např. Škoda Fabia nebo při připojení přes mechanický bovden je schopen ovládat libovolnou škrtící klapku. Zařízení je vybaveno ochranou samočinným odpojením od zdroje a doplňující ochranou pospojováním.



Obr.6.2 Ovládání škrtící klapky pomocí elektronického plynového pedálu a servopohonu

Dynamometr – popis funkce

Vířivý dynamometr využívá pro svoji funkci účinků vířivých proudů. Na základovém rámu dynamometru je ve dvou ložiskových stojanech výkyvně uložen stator, který je vyroben z materiálu o dobré magnetické vodivosti. Rotor dynamometru je ve tvaru ozubeného kola. Ve statoru je uložena budící cívka, která je napájena z regulovaného zdroje. Otáčí-li se rotor v nabuzeném statoru, vznikají v povrchové vrstvě statoru pulsace magnetického toku, které indukují vířivé proudy. Tyto proudy vyvolávají brzdný moment, který se přenáší ramenem statoru na tenzometrický snímač síly, jehož signálu se využívá pro regulační účely a pro měření kroutícího momentu. Přiváděná mechanická energie se mění v teplo, které musí být odvedeno chlazením dynamometru. Převážně je používáno vodní chlazení, kanály pro průtok upravené vody jsou ve statoru a ložiskových štítech. S ohledem na značné tepelné výkony odváděné chladícím médiem musí být zajištěna kontrola průtoku a teploty chladícího média, musí být zabezpečeno příslušné množství upravené chladící vody, včetně čerpadel, chladících věží apod.





Obr.6.3,6.4 Vířivý dynamometr

Štítkové hodnoty: dynamometru V125

Výkon [kW]	4.2	125	125
Moment [Nm]	134	478	150
Otáčky [1/min]	300	2500	8000
Budící napětí [V]	91		
Budící proud [A]	1.7		
Budící výkon [W]	155		
Tlak vody [kPa]	90		
Množství vody [1/s]	0.9		
Teplota vody vstup [^{o}C]	max. 25		
Teplota vody výstup [ºC]	max. 65		
Moment setrvačnosti[kgm^2]	0.4		
Hmotnost [kg]	550		

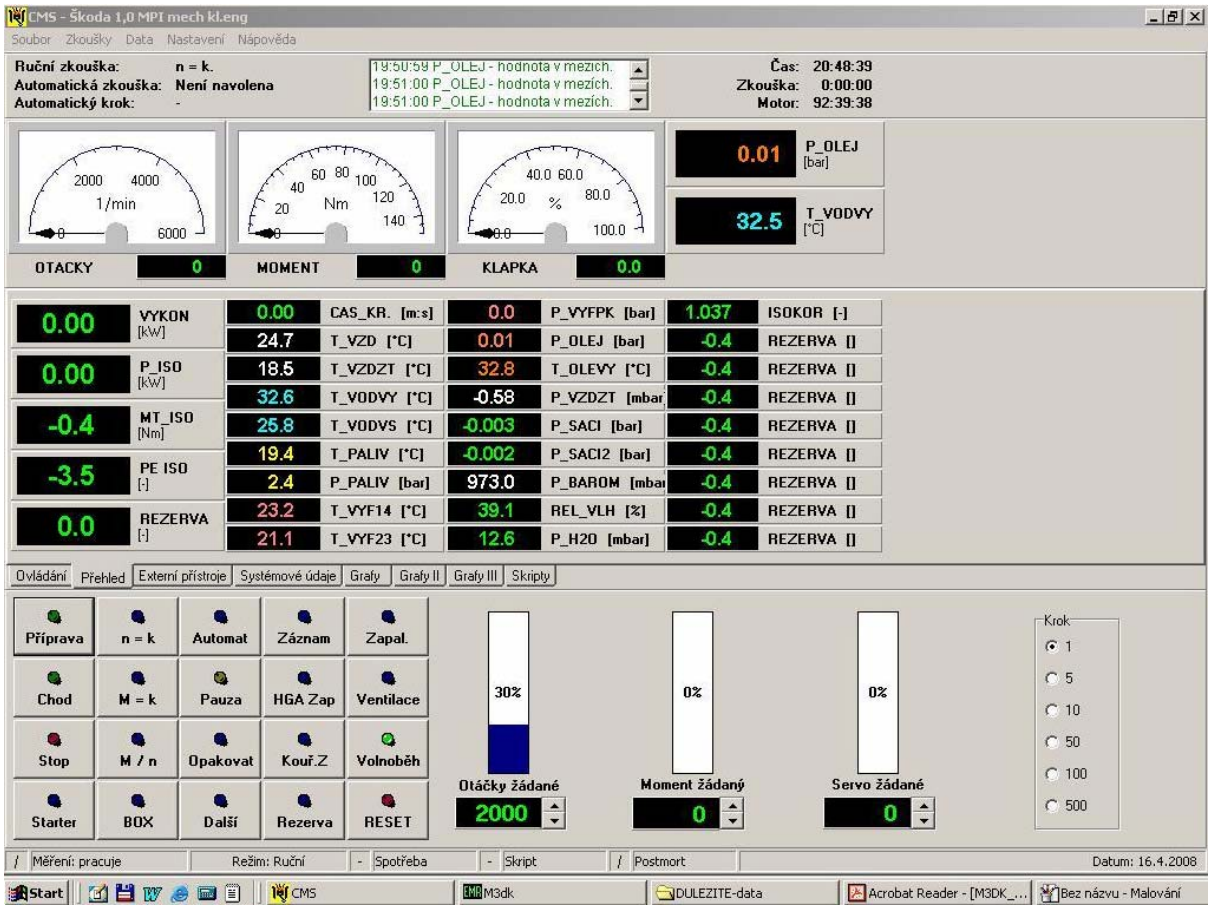
Tab.6.1 Parametry dynamometru

Fyzikální veličina		Měřící rozsahy	Garantovaná přesnost [%]
Moment [Nm]		0÷500	0,5
Otáčky [1/min]		0÷8000	0,2
Teploty [°C]	Pt 100	0÷100; 0÷200	1
	Termočlánky	0÷1000	1,5
Tlaky [Bar]		-1÷0; 0÷1; 0.9÷1.1; 0÷2; 0÷10	

Tab.6.2 Parametry dynamometru – měřicí rozsahy

Program CMSW

Účelem programu CMSW (computer managment system work) je zjednodušení práce při ovládání brzdového stanoviště. CMSW zajišťuje sběr dat, jejich archivaci a vyhodnocení. Dále umožňuje automatizovat opakující se měření na brzdovém stanovišti pomocí tzv. automatických zkoušek . Zajišťuje také nepřetržitou kontrolu všech měřených veličin a při správné konfiguraci zaručí okamžitou a správnou reakci na překročení kterékoliv z měřených veličin, čímž se předejde poškození testovaného motoru.

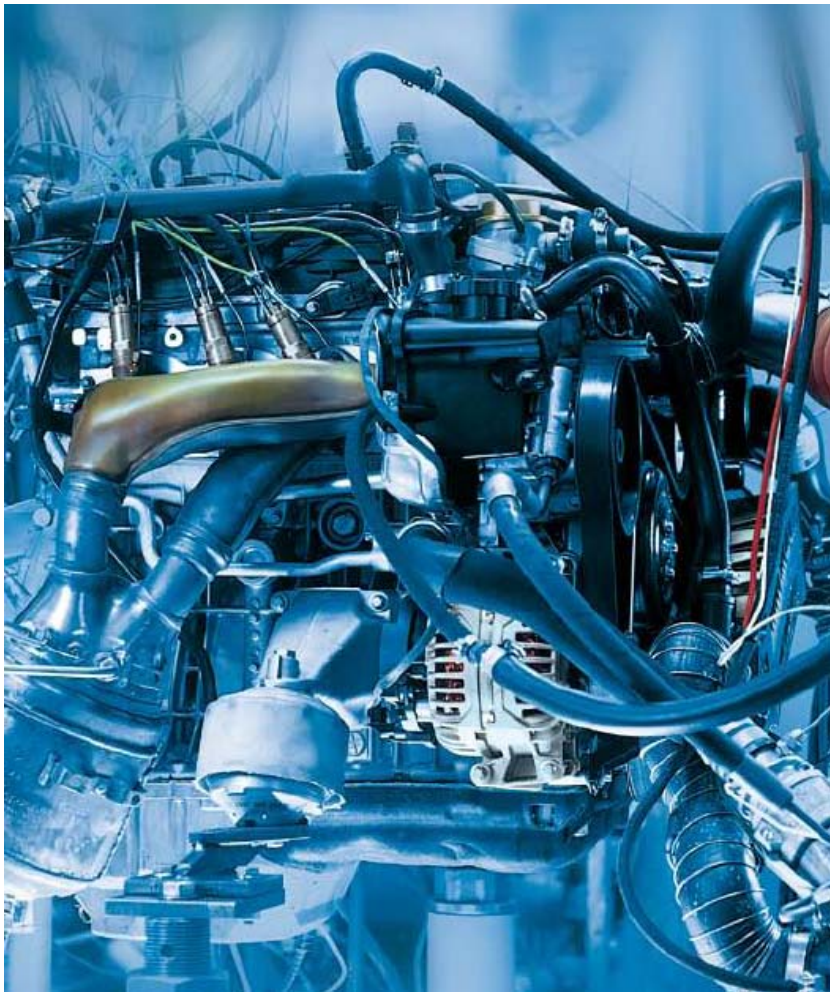


Obr.6.5 Prostředí programu CMSW sloužícího k ovládání brzdového stanoviště a sběr dat

6.2.2 Zařízení na měření indikace tlaků ve válci

Vývoj a optimalizace moderních spalovacích motorů jsou nepředstavitelné bez znalosti dějů ve spalovacím procesu. Měření a analýza změny tlaku ve válci je jediný zdroj dat potřebných k tomu aby byla optimalizována efektivnost a výkon motoru, emise a v neposlední řadě také životnost.

Měřicí systémy pro měření spalovacích tlaků, průběhu hoření ve válci, jsou tedy jedny z nejdůležitějších součástí při vývoji spalovacích motorů. Nabízí nám tak možnost nahlédnout do spalovacího procesu a zkoumat a analyzovat probíhající děje, které zásadně ovlivňují chování motorů. Jsou neodmyslitelnou součástí i při matematickém modelovaní reálných termodynamických dějů, neboť v současné době nejsou k dispozici obecně platné matematicko-fyzikální vztahy, které by umožňovaly s vyhovující přesností stanovit průběh hoření pouze na základě příslušných konstrukčních a provozních parametrů motoru. Tedy pro stanovení některých vstupních dat do matematického modelu je i zde experimentální měření podstatnou a neodmyslitelnou součástí vývojového celku.

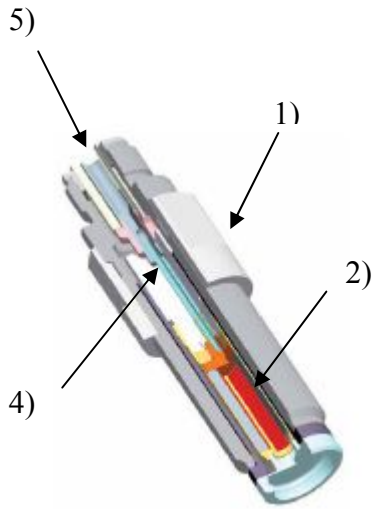


Obr.6.6 Měření indikace tlaku [12]

Měřicí zařízení (měřicí řetězec) pro měření indikace tlaků ve válci se skládá několika základních komponent. Základem je snímače tlaku, zesilovače, frekvenční filtr, snímač úhlu natočení klikového hřídele a samotný měřicí modul spojený s PC vybaveným příslušným software.

Pielzo-elektrický snímač tlaku

Pielzo-elektrický snímač je založen na piezo-elektrickém efektu, tzn. na povrchu určitých krystalů, zejména se používá krystal křemíku, vzniká při mechanickém zatížení elektrický náboj. Tento elektrický náboj je přímo úměrný síle působící na krystal. Měřená veličina je v picoculombech (1 pC= 10na -12 C coulomb). Z konstrukčního hlediska mohou být použity pro nestatické měření tlaku, tzn. svou funkcí jsou určeny k dynamickým aplikacím měření. Tento typ snímače neměří absolutně ale relativně. Tedy piezo snímače mhou být použity všude tam, kde je potřeba měřit rychle měnící se tlaky v maximální možné přesnosti. Jejich použití je omezeno maximální přípustnou teplotou, která se liší především podle konstrukce snímače, tedy zda jde o snímač s chladicím elementem či nikoli. Tento typ byl při měření použit jako snímač tlaku ve válci motoru.





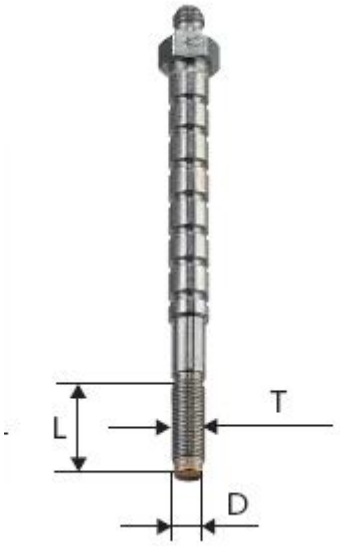
Piezoelektrický snímač
1) Tělo
2) piezo krystal
3) Tepelně kompenzační membrána
4) Elektroda
5) Připojení vodiče

Obr. 6.7, 6.8 Piezo-elektrický snímač tlaku [12]

Technické parametry snímače

Typ snímače	60530CC
Rozsah tlaku bar	0 ~ 250/ ~ 300
Citlivost pC/bar	-20
Teplotní rozsah °C	-50 ~ 400
Rozměry D - mm L - mm T -	 4,4 14,5 M5 x 0,5

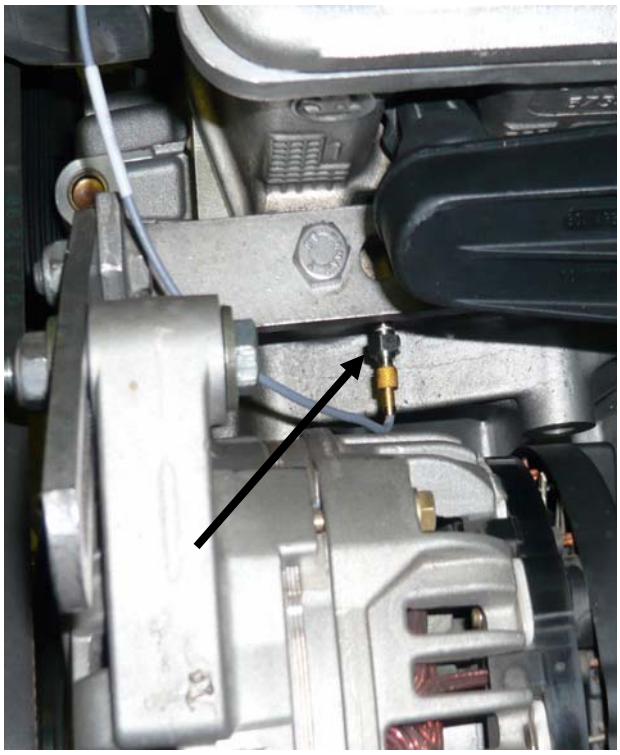
TAB.6.3 Technické parametry snímače tlaku



Obr.6.9 Piezo-elektrický snímač tlaku

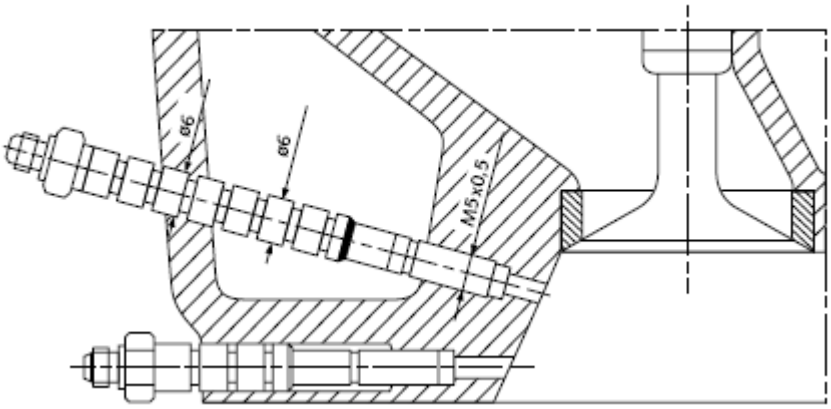
Umístění snímače na motoru





Obr.6.10 a 6.11 Umístění snímače tlaku ve válci na motoru, vpravo detail na 1. válec

Snímání tlaku ve válci bývá realizováno několika způsoby. Prvním a nejjednodušším způsobem je použití speciálních indikačních zapalovacích svíček, zde jsme ovšem omezeni konstrukčními parametry hlavy motoru a umístění tak nemusí vždy odpovídat optimálnímu umístění pro měření. Z konstrukčního hlediska tyto snímače jsou také tepelně více namáhány a podléhají jistému opotřebení. V našem případě byla hlava válců navrtána do stěny tak, aby neprocházel snímač přes kanály s chladící kapalinou, což hlava válců konstrukčně také umožňovala. Tím nevznikly další problémy s utěsněním a montáží snímačů. V případech kde toto řešení není z konstrukčního hlediska hlavy možné, je snímač vybaven drážkováním pro těsnící kroužky.



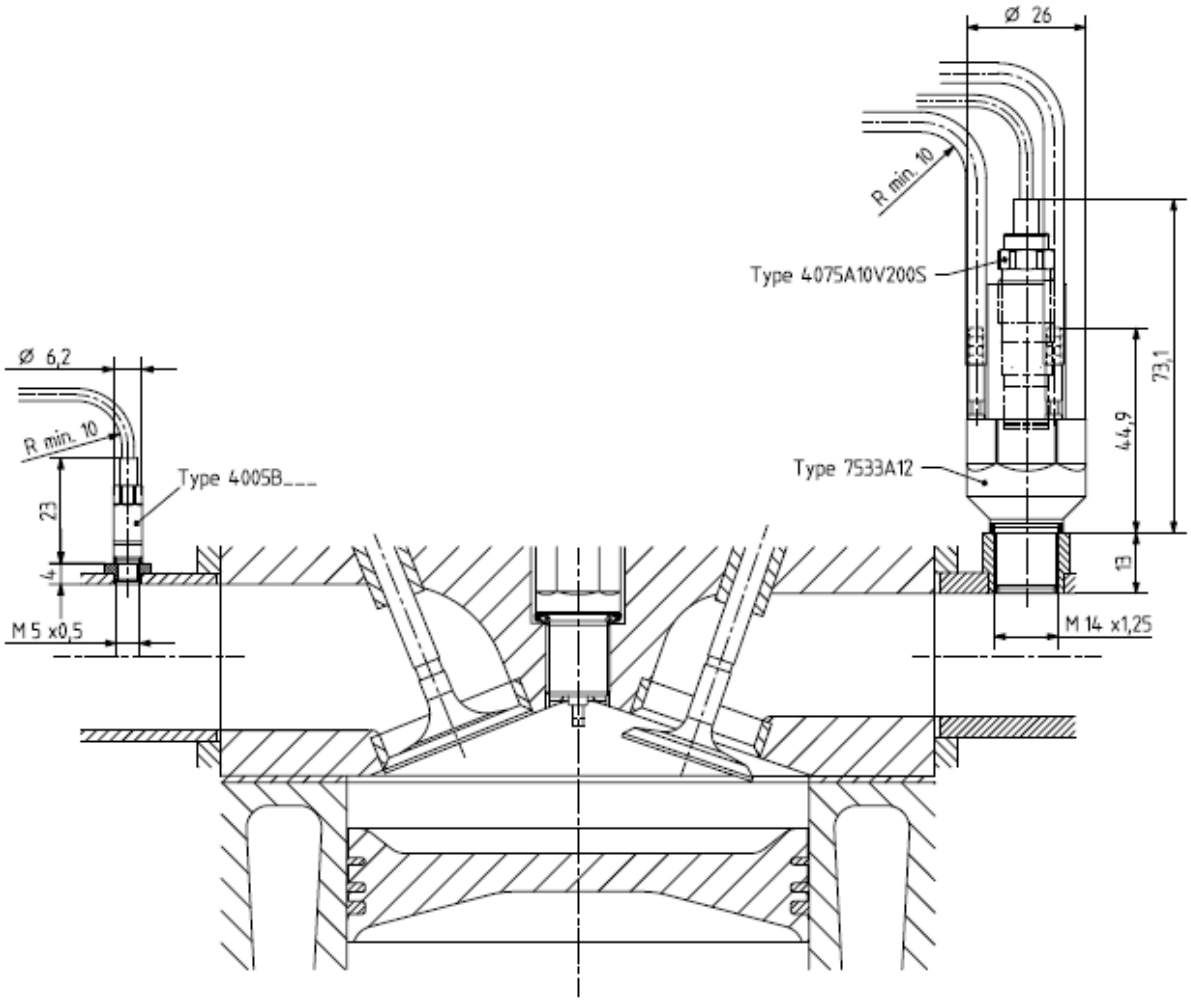
Obr.6.12 Řez hlavou motoru, možnosti umístění snímače tlaku.[12]



Obr.6.13 Umístění snímače tlaku v zapalovací svíčce, tzv. indikační svíčka [12]

Piezo-rezistivní snímač tlaku

Piezo-rezistivní senzory jsou založeny na polovodičovém principu, což znamená, že při mechanickém namáháni daného polovodiče se mění jeho odpor. Ve srovnání s konvenčním tenzometrem, toto řešení pro měření v reálnem čase otevírá možnosti použití v nových aplikacích, jako např. pro absolutní měření atmosférických tlaků a tlaků v plynech a kapalinách s velice vysokou přesnosti. Tento typ snímače byl při měření použit pro nízkotlaké aplikace jako snímaní tlaku v sacím a výfukovém potrubí. V případě snímače tlaku výfuku je použit adaptér s vodním chlazením a pneumatickým ovládáním clonky pro snížení znečištění. Clonka se automaticky otevře jen při zapnutém měření tlaku ve výfukovém potrubí.



Obr.6.14 Řez motoru - umístění piezo-rezistivních snímačů tlaku na motoru, vlevo snímač absolutního tlaku v sacím potrubí, vpravo snímač tlaku výfukových plynů s chladícím adaptérem [12]

Technické parametry snímače

Typ snímače	4043/45V200S
Rozsah tlaku bar (absolutně)	0 ~ 1/ ~ 500
Linearita a hystereze (BSL) %FLO	< ± 0.3
Teplotní rozsah °C	-20 ~ 120
Rozměry D - mm L - mm	 12 14

TAB.6.4 Technické parametry snímače tlaku



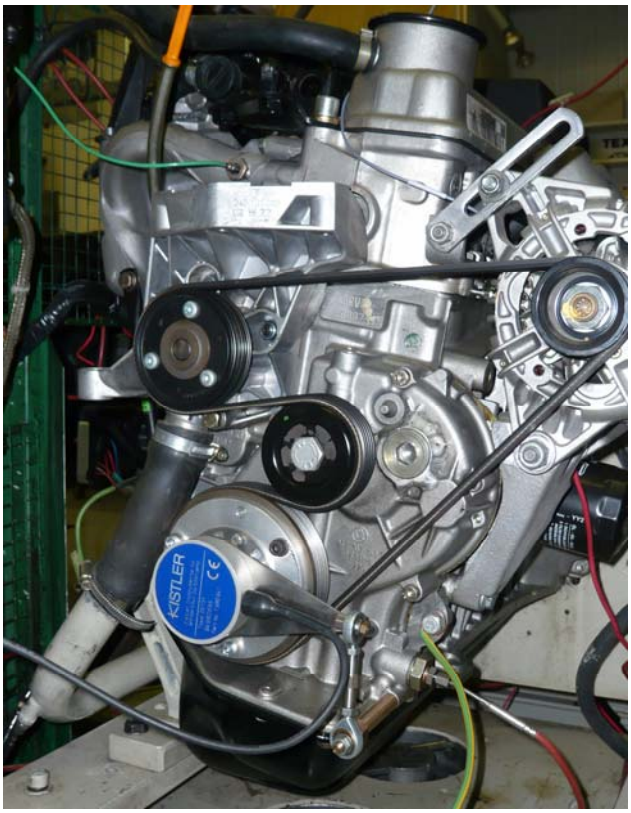
Obr.6.15 Snímač tlaku ve výfukovém potrubí s chladícím adaptérem a pneumatickým ovládáním uzavírací clonky

Snímač úhlu natočení klikové hřídele

Snímač otáček klikové hřídele typ 2613B poskytuje základní signál pro synchronizaci měření, vykreslení P-α diagramu. Je dále ještě vybaven jednotkou pro zpracování signálu a děličem impulsů. Je přesný snímač úhlu natočení klikové hřídele, který snímá natočení po 0,1° až 6° Je vhodný pro měření otáček do 20 000 ot/min.



Obr.6.16 Přesný snímač úhlu natočení klikové hřídele s děličem impulsů [12]



Obr.6.17 Umístění snímače na měřeném motoru

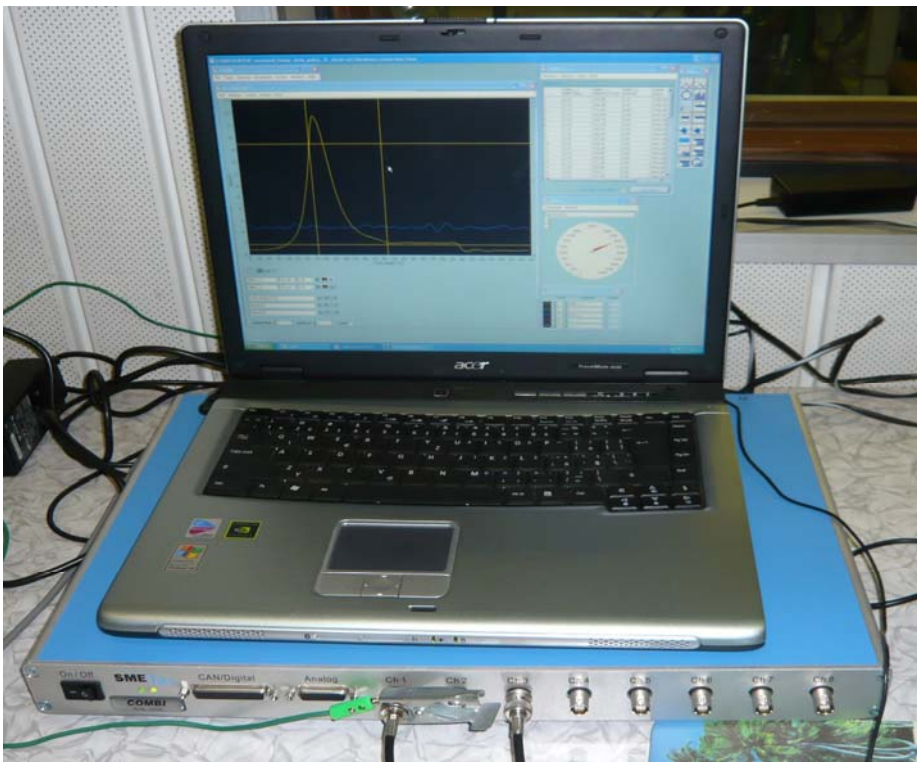
Měřicí řetězec dále obsahuje

Měřicí řetězec dále obsahuje zesilovač Kislter typ 4555 pro zesílení signálů z piezo-rezistivních snímačů a nábojový zesilovač typ 3001 pro zesílení a zpracování a signálů z piezo-elektrických snímačů tlaků ve válci. Měřící ústřednu SMETEC Combi S-N 0030 pro zpracovaní analogových signálů od tlakových snímačů, synchronizaci na základě interní tigrovací spouště (signál ze snímače natočení klikového hřídele) a komunikaci s PC s příslušným software.





Obr.6.18 a 6.19 Zesilovač pro zesílení signálů z piezo-rezistivních snímačů vlevo, nábojový zesilovač pro zesílení a zpracování a signálů z piezo-elektrických snímačů vpravo



Obr.6.25 Měřicí ústředna Smetec Combi s PC a vyhodnocovacím software

6.2.3 Diagnostický komplet BOSCH FSA 750

FSA 750 je modulárně sestavený komplexní systém umístěný v pojízdném stojanu, vhodném do dílenských prostor. Kromě měřicího modulu FSA 750 a výbavy snímačů patří k dodávce systému výkonný počítač kombinovaný s mobilním diagnostickým testerem KTS 650. KTS 650 se zde používá jako obslužná oddělitelná mobilní zobrazovací a počítačová jednotka vybavená přehledným dotekovým displejem.

Technické parametry systému pro diagnostiku vozidlových motorů a palubní elektroniky BOSCH FSA 750:

• Tester elektronických systémů KTS 651. Slouží k přímé komunikaci s hlavními řídicími jednotkami v automobilech tj. řídicí jednotka motoru, brzdový asistent (ABS, ESP), řídicí jednotka přístrojového panelu. Výhoda je v možnosti sledovat funkce řídicích jednotek a jejich reakce na signály ze vstupních snímačů.

• Dvou-kanálový osciloskop FSA 750 slouží k podrobné diagnostice všech systémů vozidel a motorů, které nelze diagnostikovat testerem KTS 650. Jedná se zejména o funkci vnějších snímačů (teplotní, indukční a hallové). Dále obsahuje příslušenství pro měření palivové soustavy zážehových a vznětových motorů (okamžik vstřiku paliva, tlak a teplota paliva). Jeho největší předností je universálnost použití pro všechny spalovací motory.

• Analyzátor výfukových plynů BEA 050. Jedná se o nejmodernější dílenský analyzátor složení výfukových plynů. Kromě všech běžně měřených složek umožňuje měření obsahu NOx.

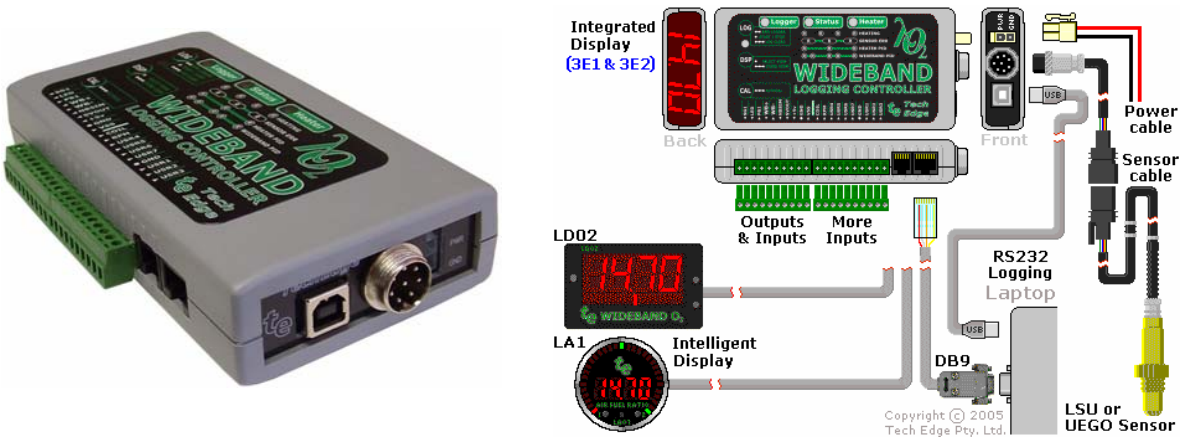
• Součástí diagnostického kompletu je výukový a informační software Bosch ESI-tronic ve kterém jsou všechny zkušební postupy podrobně popsány, včetně odborného popisu měřených komponent.



Obr. 6.21 Motortester Bosch FSA 750 [10]

6.2.4 Lambda Controller

Komplet se skládá z širokopásmové lambda sondy Bosch LSU 4.2, převodníku (controlleru - ŘJ) a software. Využití je jako měřicí zařízení pro poskytnutí hodnoty lambda popř. AFR, převod signálu pro zpracování a ukládání dat programovatelnou ŘJ.



Obr.6.22 Řídicí jednotka pro zpracování signálu širokopásmové lambdasondy [14]



Obr.6.23 Širokopásmová lambdasonda Bosch LSU 4.2 [14]

Technické parametry:

Hlavní	Přesné zobracení hodnoty lambda/AFR +/- 0.005
Napájení	0.5 - 19.5 V DC do 3A
Lambda sondy	LSU 4.0/4.2 (Bosch 6066/7057) nebo NTK (L1H1/L2H2)
Výstupy	WBlin širokopásmový konfigurovatelný 5V (12bit přesnost)
	NBsim (10bit konfigurovatelný) pro klasickou lambda sondu se skokovou změnou
	Alarm konfigurovatelný pro softwarové sepnutí výstupu. (např. světelná signalizace optimálního řazení apod.)
	5V pro napájení externích snímačů (Map, potenciometr)
	SVout pro externí zobrazovací displej hodnoty lambda/AFR
Vstupy	3 x analogový 0 ~ 5V vzorkovací frekvence 40/sec
	4 x termočlánek, mohou být přivedeny na analog vstup
	Vstup pro otáčky a záznam dat
Kalibrace	Automatická kalibrace se sondou na atmosférickém vzduch
Komunikace s PC	USB, RS 232
Software	Podpora Windows XP

Tab.6.5 Technické parametry lambda Controlleru

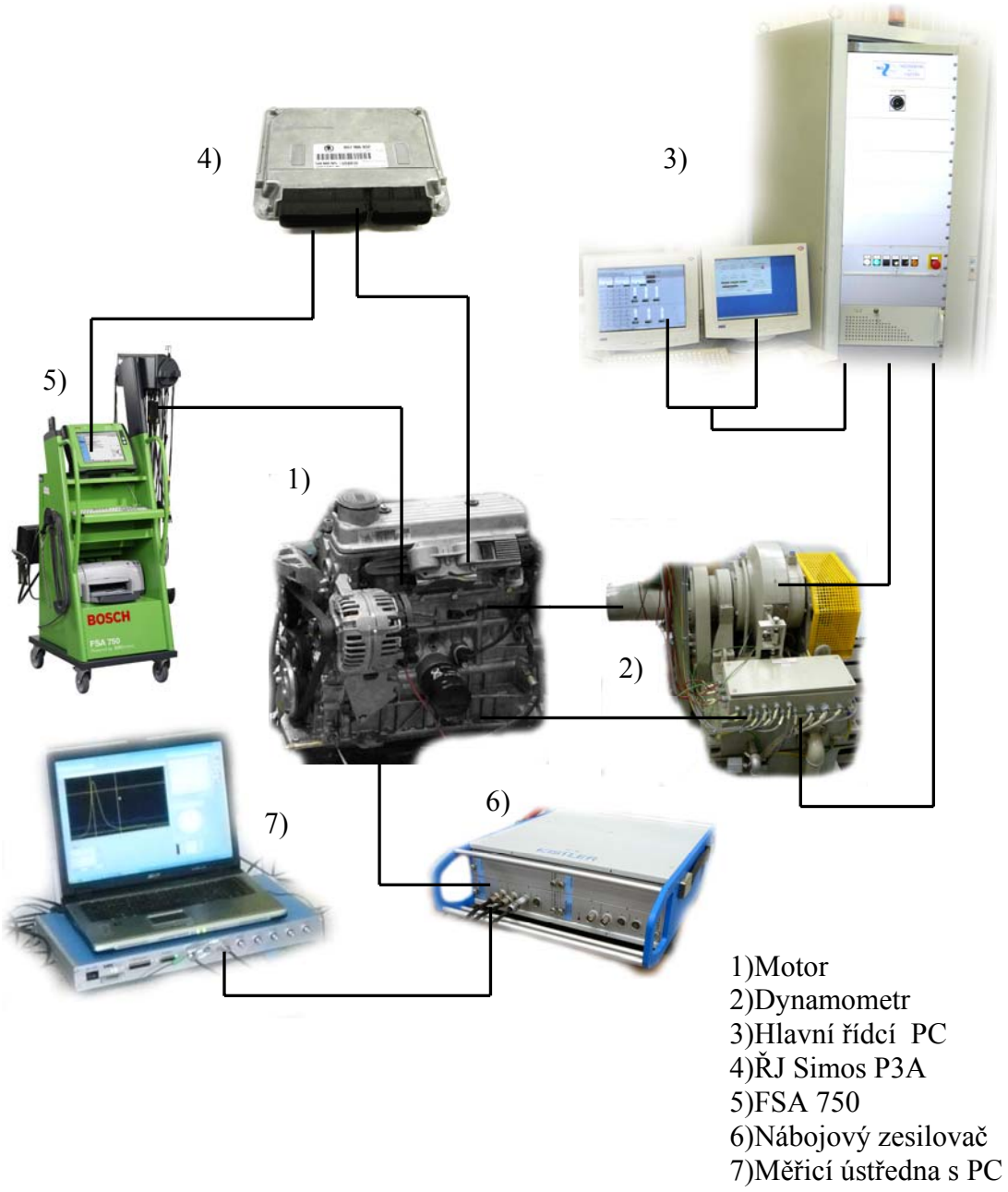
6.2.5 Angle Controller

Angle Controller slouží k přesnému ovládání servopohonu škrticí klapky. Byl použit vzhledem k jeho možnostem libovolně nastavit limity krajní polohy servopohonu a nezávislého ovládání vzhledem k hlavnímu řídícímu PC. Toho bylo zejména využito při prvotním rozběhu motoru, kdy byla současně měněna dávka paliva a otevření škrticí klapky.



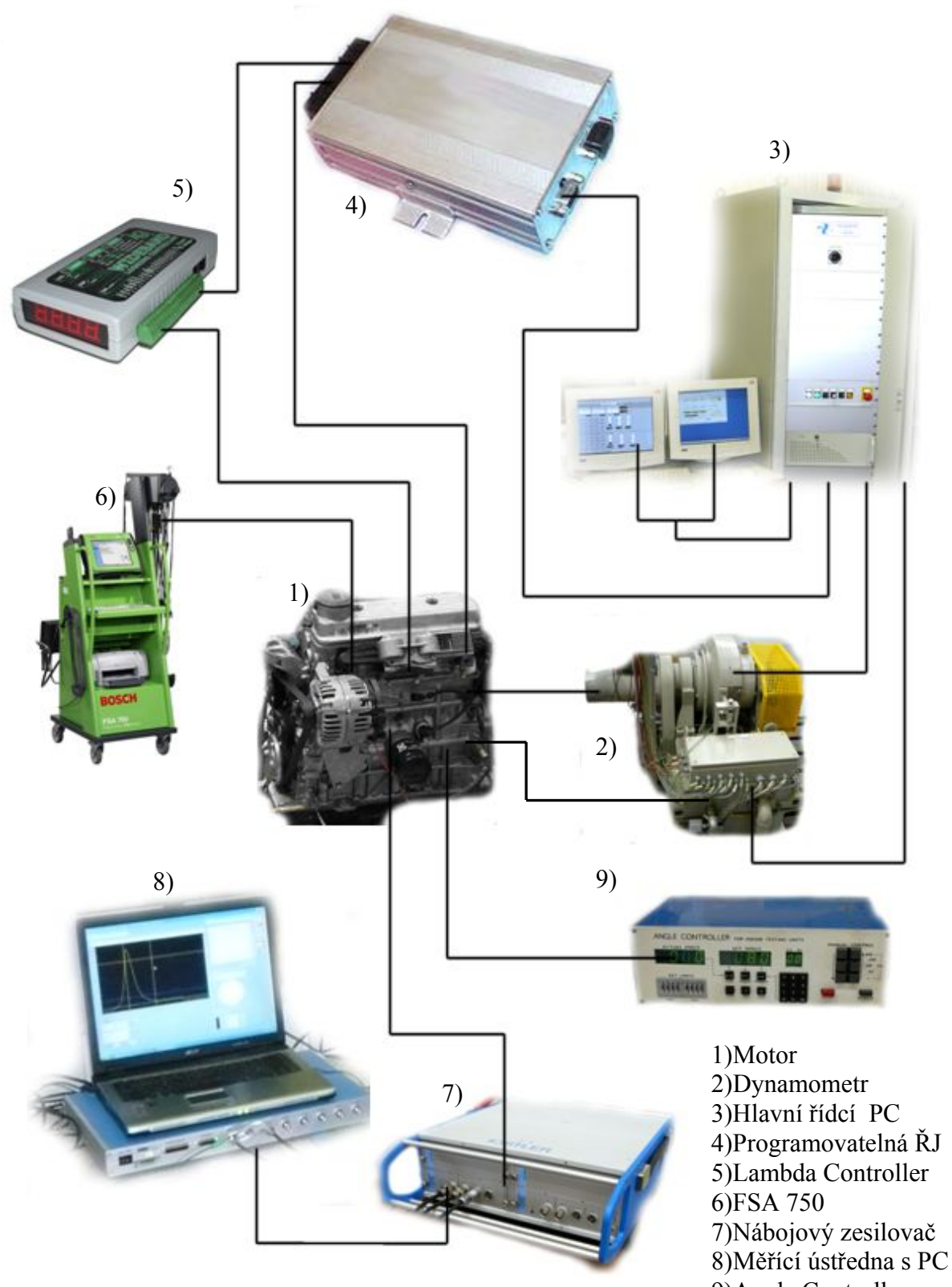
Obr.6.25 Modul pro ovládání servopohonu škrticí klapky

6.3 Měřicí řetězec pro měření sériového motoru



Obr.6.26 Zjednodušené schéma použitého měřicího řetězce pro měření na sériovém motoru

6.4 Měřicí řetězec použitý při optimalizaci jednotlivých provozních režimů motoru



Obr.6.27 Zjednodušené schéma měřicího řetězce použitého při optimalizaci jednotlivých provozních režimů motoru

6.5 Metodika měření

Z důvodu náročnosti měření jak časové, finanční tak i technické, vzhledem k velkému počtu měřicích přístrojů a značnému objemu zaznamenávaných dat bylo nezbytné stanovit ještě před začátkem měření přesnou metodiku měření. S rozvahou důkladně promyslet, která data a jakým způsobem nejvhodněji zaznamenávat, ať již vzhledem k technickým možnostem, tak s ohledem na přehlednost, přesnost, jejich vypovídající schopnost a možnosti dalšího zpracování a vyhodnocení. Byl také kladen velký důraz na dodržení konstantních podmínek okolí při jednotlivých měřeních, tak aby při následném porovnání dat z těchto jednotlivých měření, bylo dosaženo co nejmenších odchylek a porovnání tím docílilo co největší vypovídající schopnosti a bylo možno následně stanovit jasné a přesné závěry. Bylo nezbytné se předem dohodnout na přesném postupu měření, neboť případné chyby, popřípadě nedorozumění by mohli mít fatální důsledky, jelikož při tomto počtu zaznamenávaných dat by mohla být případná chyba odhalena například až při konečném porovnání výsledků a tím by došlo k jejich znehodnocení a nutnost opakování náročného měření.

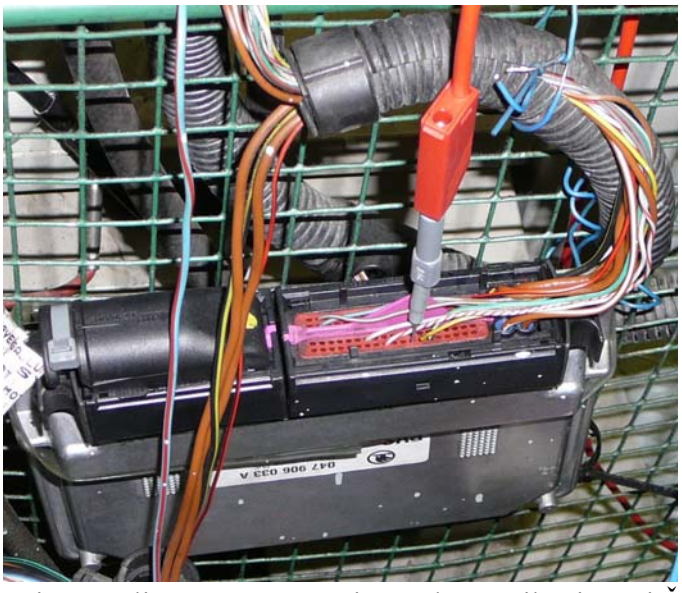
7 Měření sériového motoru

7.1 Cíle měření

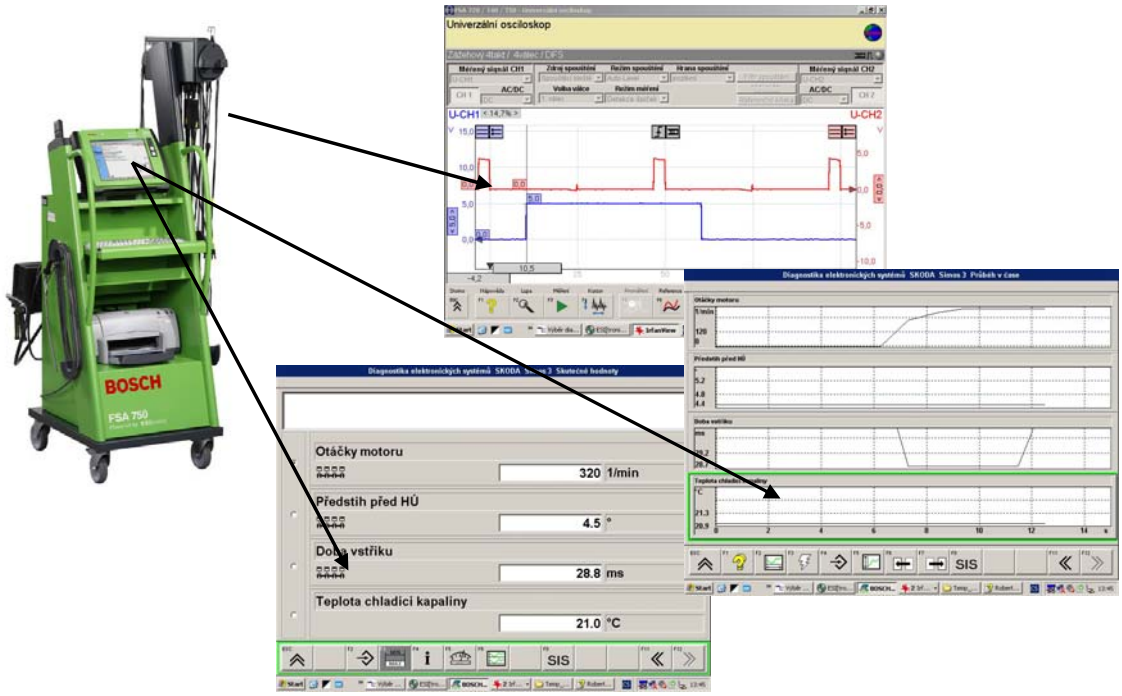
Hlavním cílem měření bylo změřit celkovou otáčkovou charakteristiku motoru tj. pro jednotlivé otáčky a dané zatížení (otevření škrticí klapky) změřit výkonové parametry motoru, indikaci tlaku ve válci a současně odečítat aktuální hodnoty předstihu zážehu a doby vstřiku. V poslední části bylo cílem proměřit jednotlivé signály zpracovávané a generované ŘJ. Měření je zaměřeno na startovací fáze motoru, fáze těsně po startu a zahřívání motoru, za účelem pochopení a analýzy probíhajících procesů při řízení motoru pomocí ŘJ.

7.2 Způsob měření

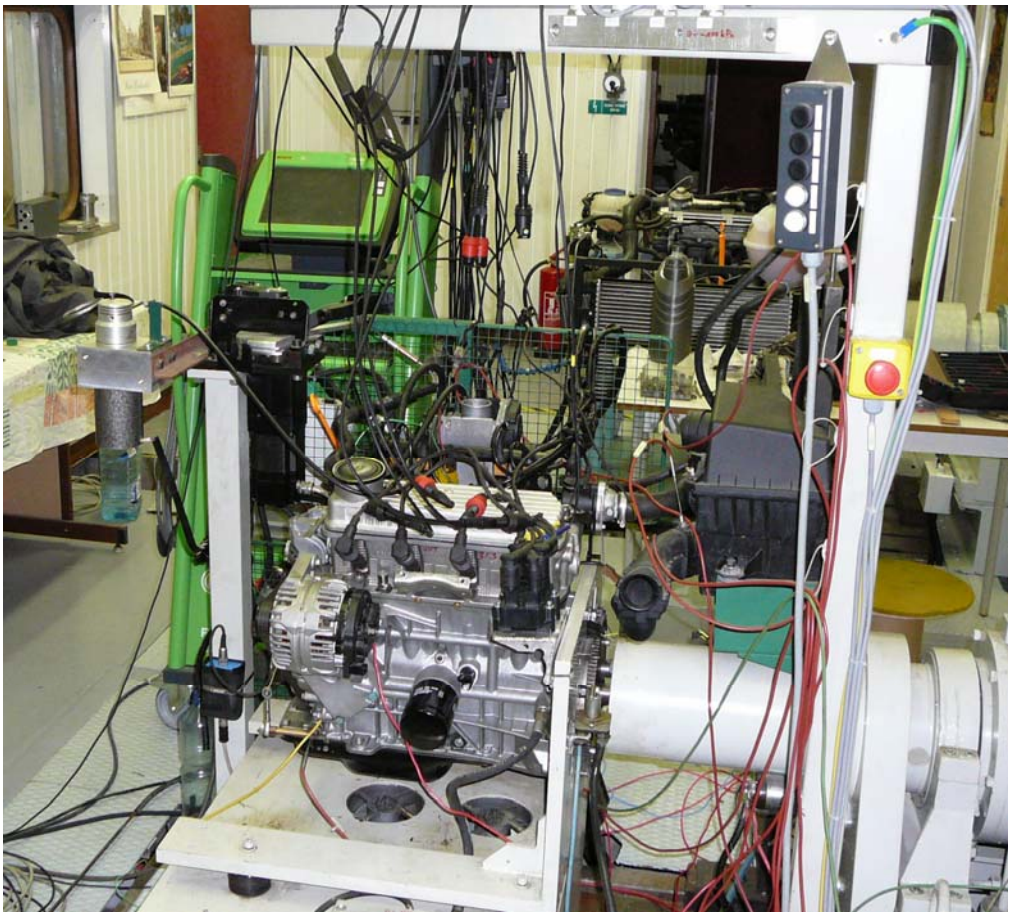
Indikace tlaku ve válci byla provedena použitím měřícího zařízení firmy Kistler se záznamem dat do PC s vlastním vyhodnocovacím softwarem. Pro odečtení předstihu zážehu bylo použito motortesteru Bosch FSA 750, popř. jeho modulu KTS 650 napojením na příslušný pin ŘJ tedy K line- portu pro komunikaci sériové diagnostiky ŘJ. Napojení přímo na daný pin ŘJ bylo zvoleno jednak díky snadné dostupnosti ŘJ vzhledem k umístění motoru na brzdovém stanovišti, ale také především z důvodu chybějícího CARB konektoru EOBD – palubní diagnostiky, který je primárně určen pro tuto komunikaci s ŘJ, neboť kabeláž motoru byla upravena pro experimentální měření na brzdovém stanovišti a neodpovídala tak zcela zapojení ve vozidle. Odpovídající pin ŘJ byl vyhledán pomocí databáze ESI-tronic, jenž je motortester vybaven. Hodnoty předstihu zážehu a doby vstřiku byly zobrazeny na displeji v reálném čase pomocí výběru funkce bloku skutečných hodnot. Dále byly pomocí měřícího ramena motortesteru FSA 750 osciloskopicky měřeny signály od snímačů, které ŘJ zpracovává a také ovládací signály akčních členů. Následně byla provedena analýza jejich vzorového signálu. Toto měření sloužilo především k pochopení a vysvětlení procesů probíhajících při řízení motoru pomocí ŘJ. Pochopení a analýza těchto signálu byla také nezbytná pro volbu vhodných snímačů a akčních členů pro programovatelnou ŘJ. Jednotlivé signály byly již popsány a analyzovány v kapitole 5.



Obr.7.1 Napojení K- line portu pro sériovou komunikaci mezi ŘJ a KTS 605 na příslušný pin ŘJ systému Simos 3PA



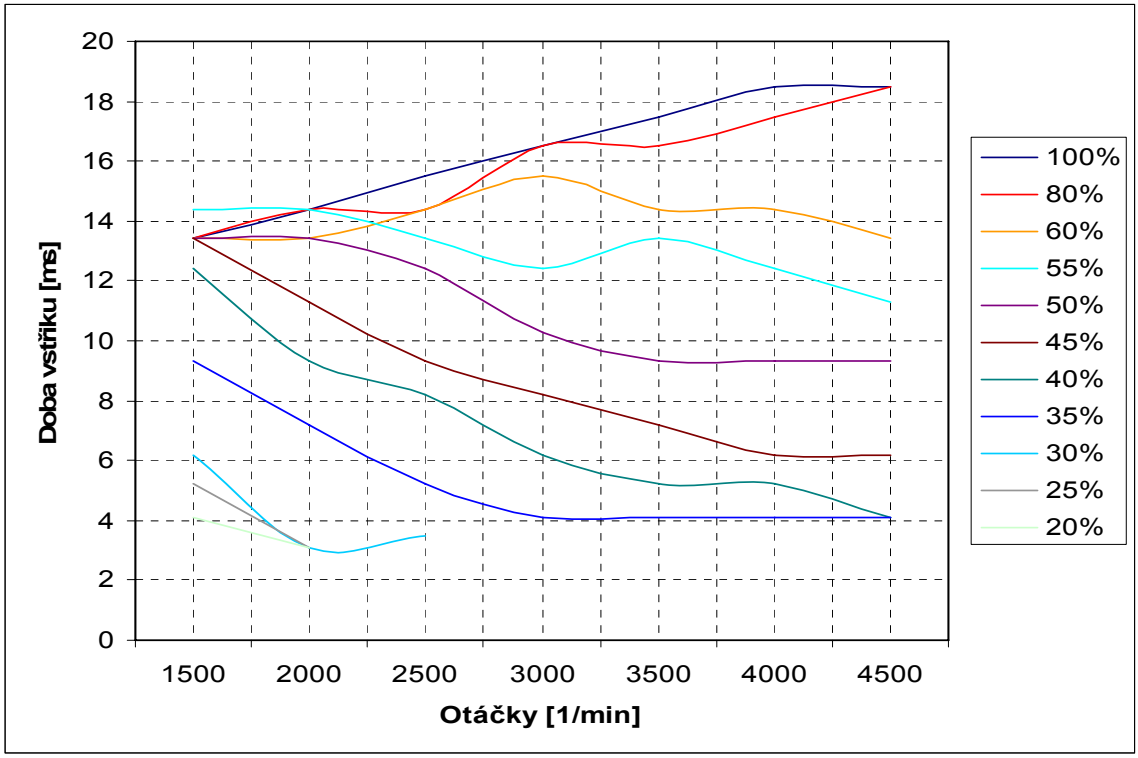
Obr.7.2 Ukázka měření pomocí diagnostického kompletu Bosch FSA 750 a jeho modulu KTS 650



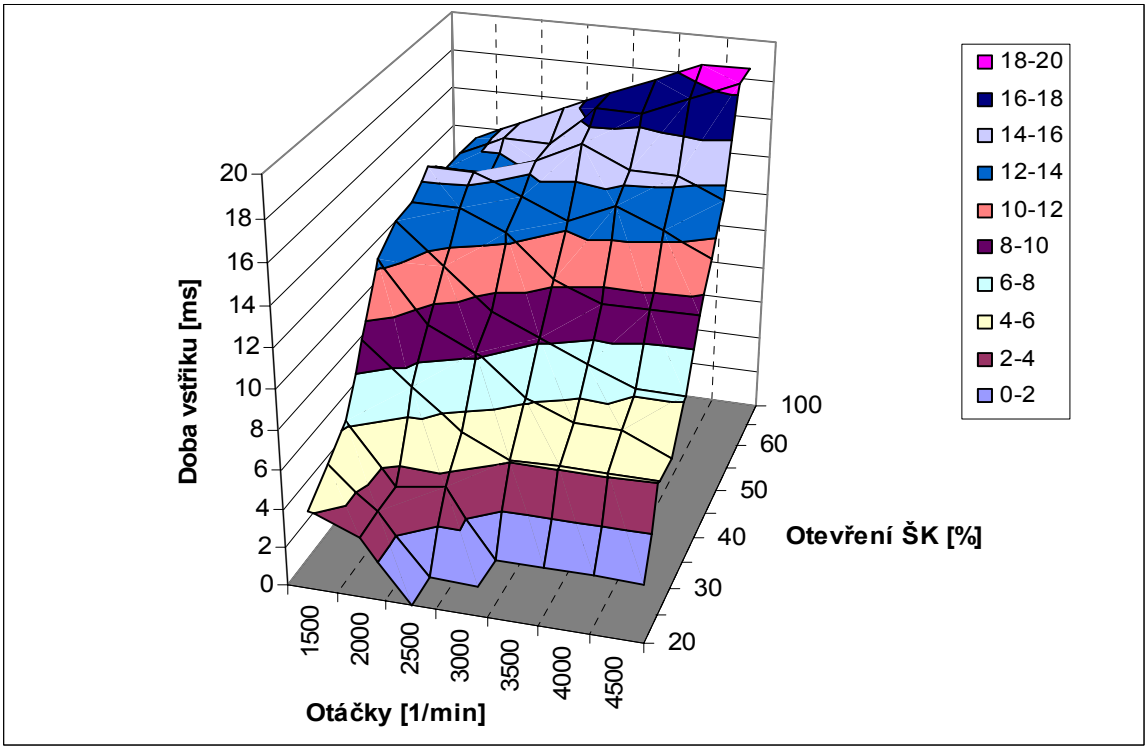
Obr.7.3 Motor připojený na měřící techniku

7.3 Naměřené výsledky

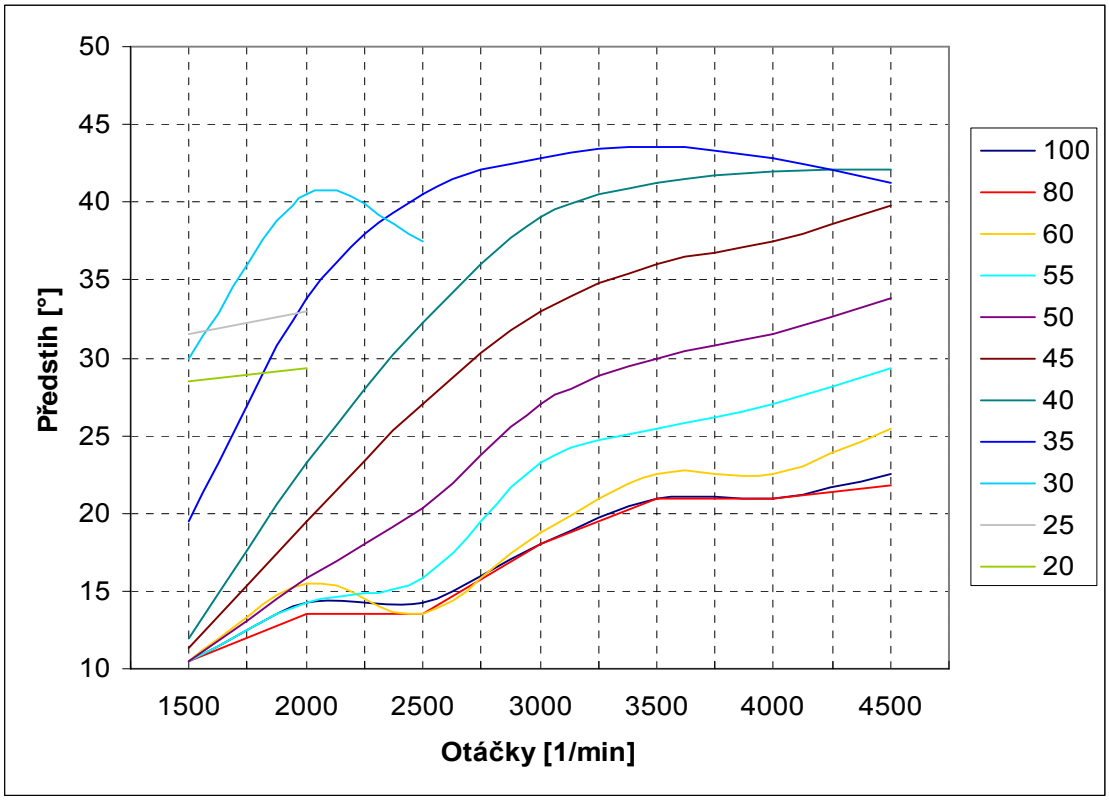
Tabulky naměřených a vypočtených hodnot jsou uvedeny v příloze pod označením shodným s příslušným grafem.



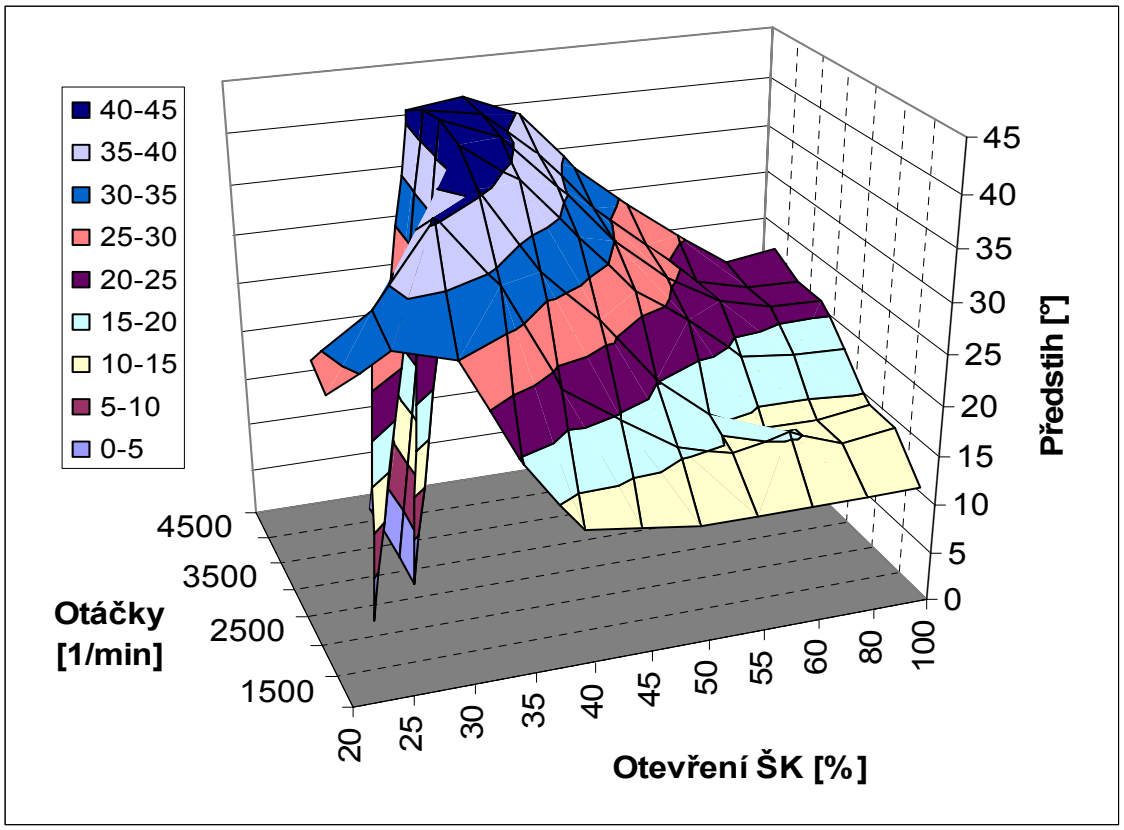
Graf.7.1 Závislost doby vstřiku na otáčkách pro jednotlivá otevření škrticí klapky v %



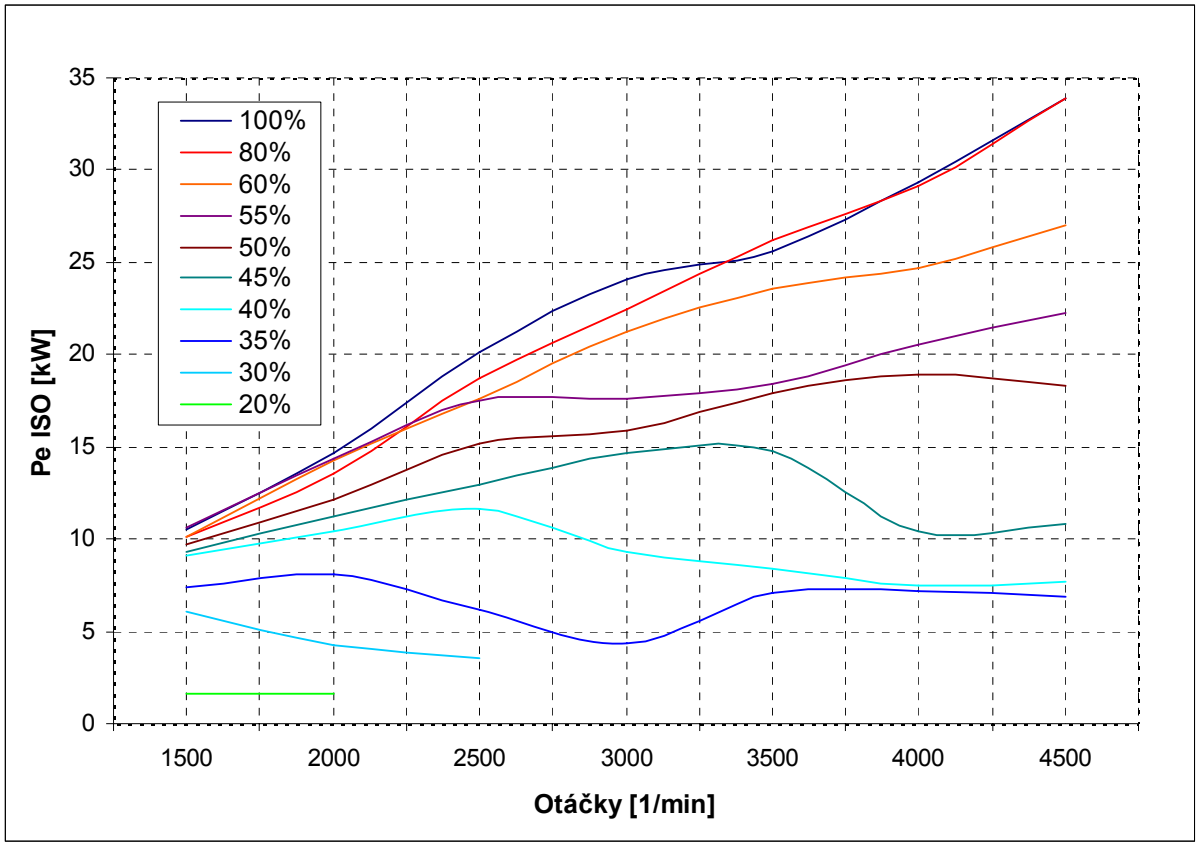
Graf.7.2 Závislost doby vstřiku na otáčkách pro jednotlivá otevření škrticí klapky - 3D



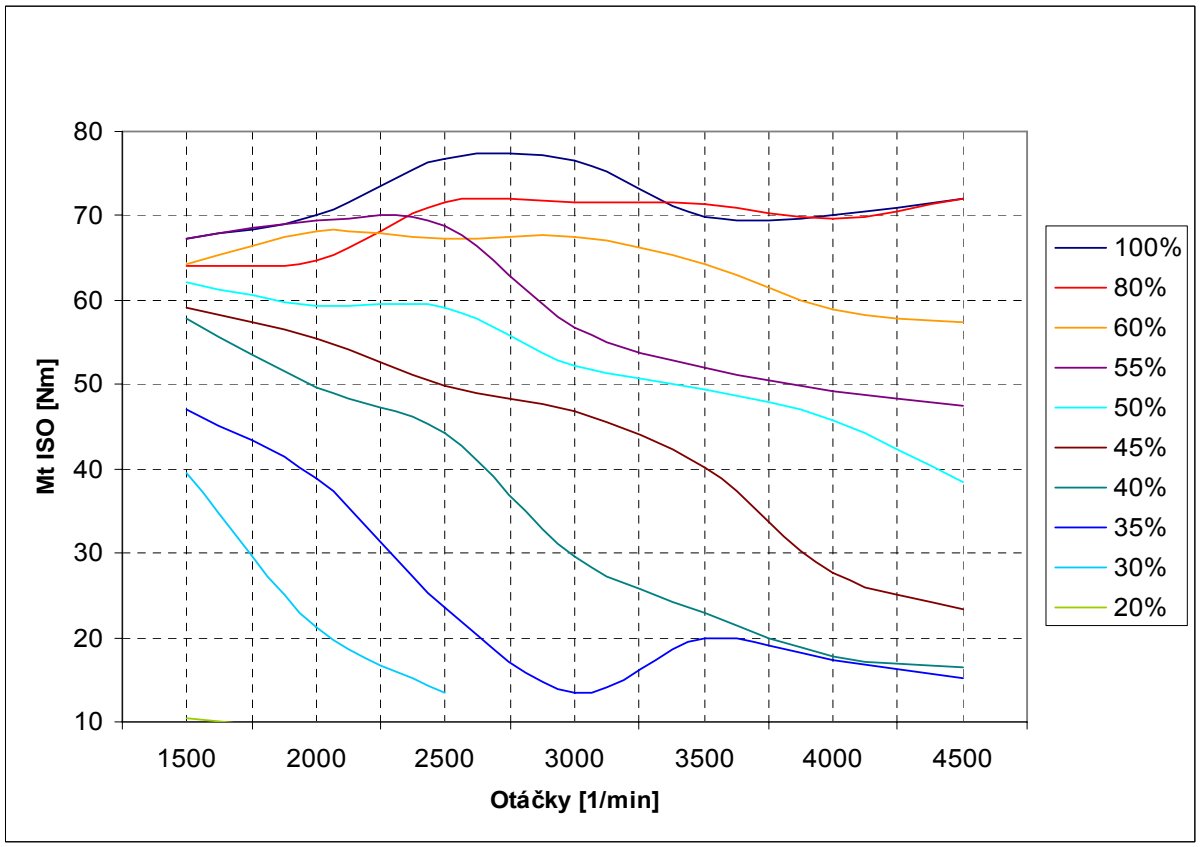
Graf.7.3 Závislost předstihu na otáčkách pro jednotlivá otevření škrticí klapky v %



Graf.7.4 Závislost předstihu na otáčkách pro jednotlivá otevření škrtící klapky - 3D

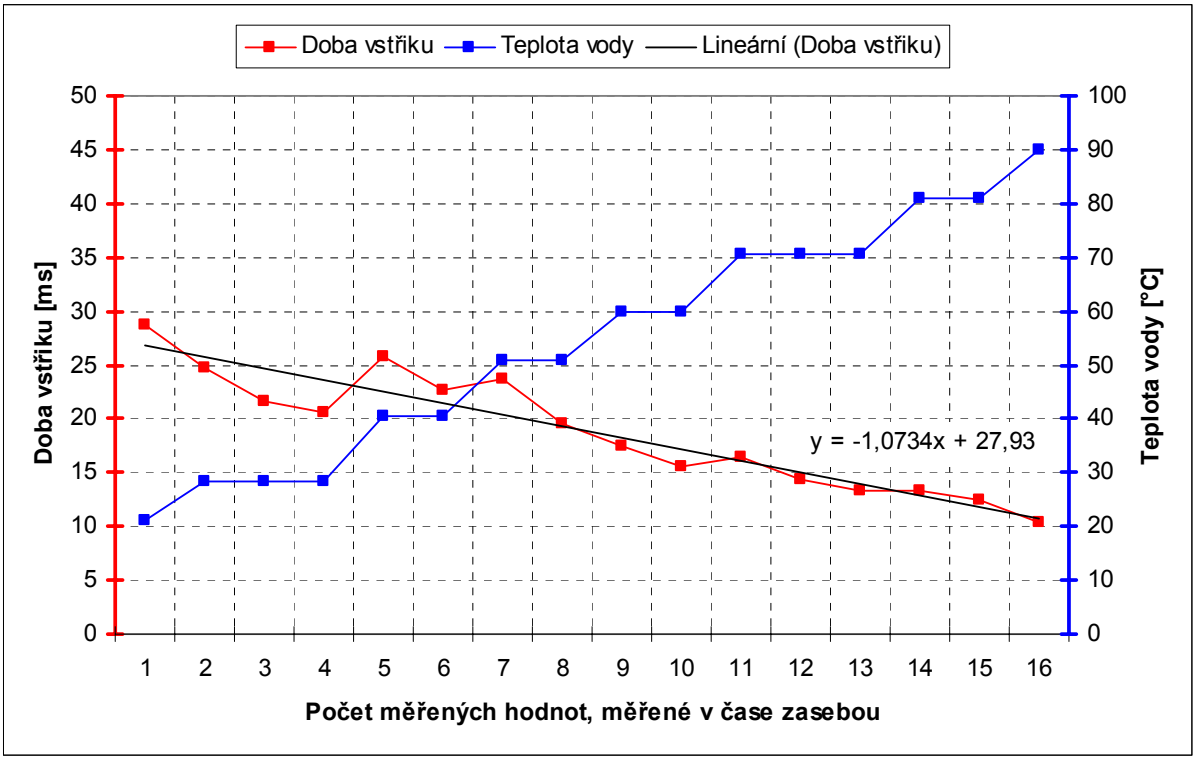


Graf.7.5 Závislost výkonu motoru na otáčkách pro jednotlivá otevření škrticí klapky v %



Graf.7.6 Závislost kroutícího momentu na otáčkách pro jednotlivá otevření škrticí klapky v %

Naměřené výsledky ve fázi startování motoru a těsně po startu

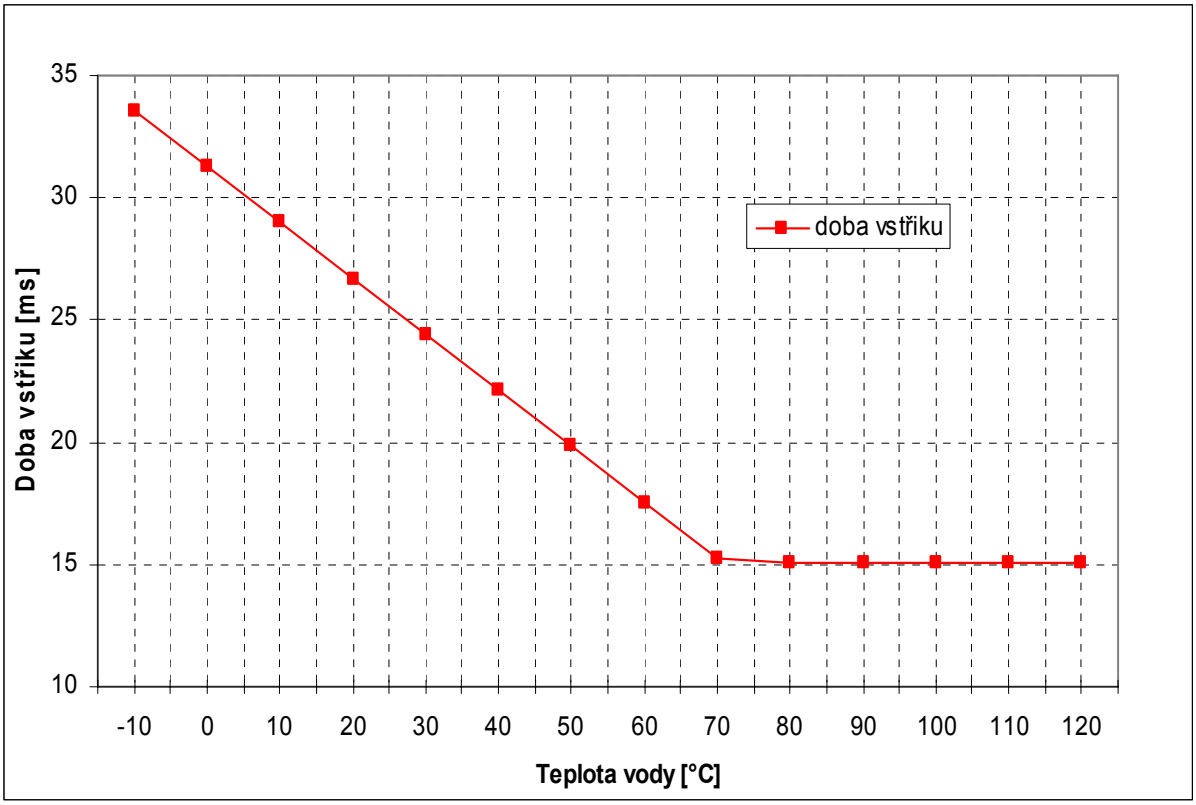


Graf.7.7 Závislost doby vstřiku na teplotě vody během fáze startování

Z grafu 7.7 je zřejmá nejen funkce zkracování doby vstřiku při startu v závislosti na teplotě vody, ale také postupné ochuzování během startování (při startu ŘJ počítá otáčky klikové hřídele a s narůstající dobou startování postupně ochuzuje). Pro vysvětlení, oblasti vodorovných hodnot teploty vody, jsou hodnoty naměřeny v krátkém čase za sebou, než motor naskočil, z doby vstřiku lze tedy v těchto oblastech vypozorovat zmíněné ochuzení s prodlužující se dobou startování. Následná hodnota byla změřena až po nastartovaní motoru zahřátí na požadovanou teplotu, vypnutí a následném startování. Na ose x jsou vyneseny hodnoty s konstantním odstupem, jak byly po sobě naměřeny, což je dáno způsobem měření. Pomocí komunikace s ŘJ přístrojem KTS 650, kdy byly hodnoty zobrazeny pomocí bloku skutečných hodnot a ručně ukládány, nebylo tedy možné tyto hodnoty ukládat tak přesně aby mohly být zobrazeny v závislosti na čase. Pro objasnění této funkce však tento záznam v plné míře postačoval.

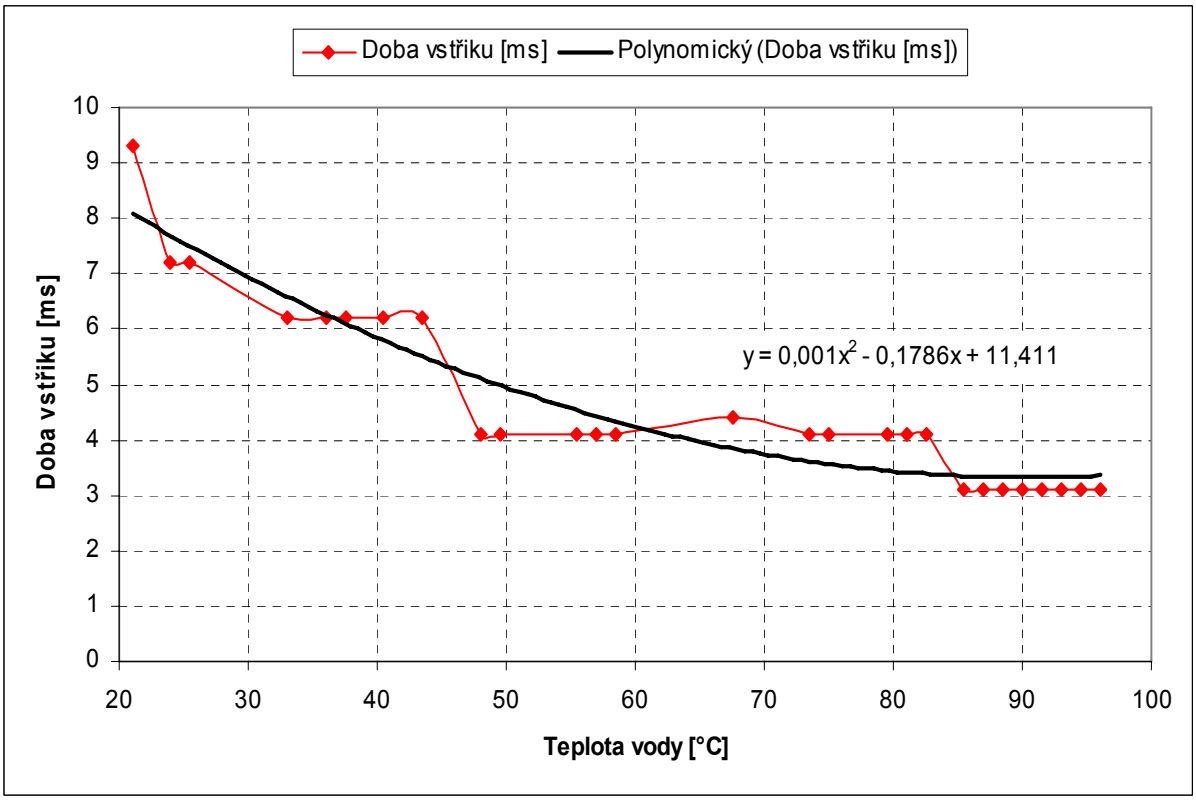
Zobrazení obohacení startovací dávky paliva

V grafu 7.8 je znázorněna startovací korekce motoru v závislosti na teplotě vody. Hodnoty jsou přepočteny z lineární závislosti z předešlého grafu. Po dosažení provozní teploty zůstává obohacení konstantní.

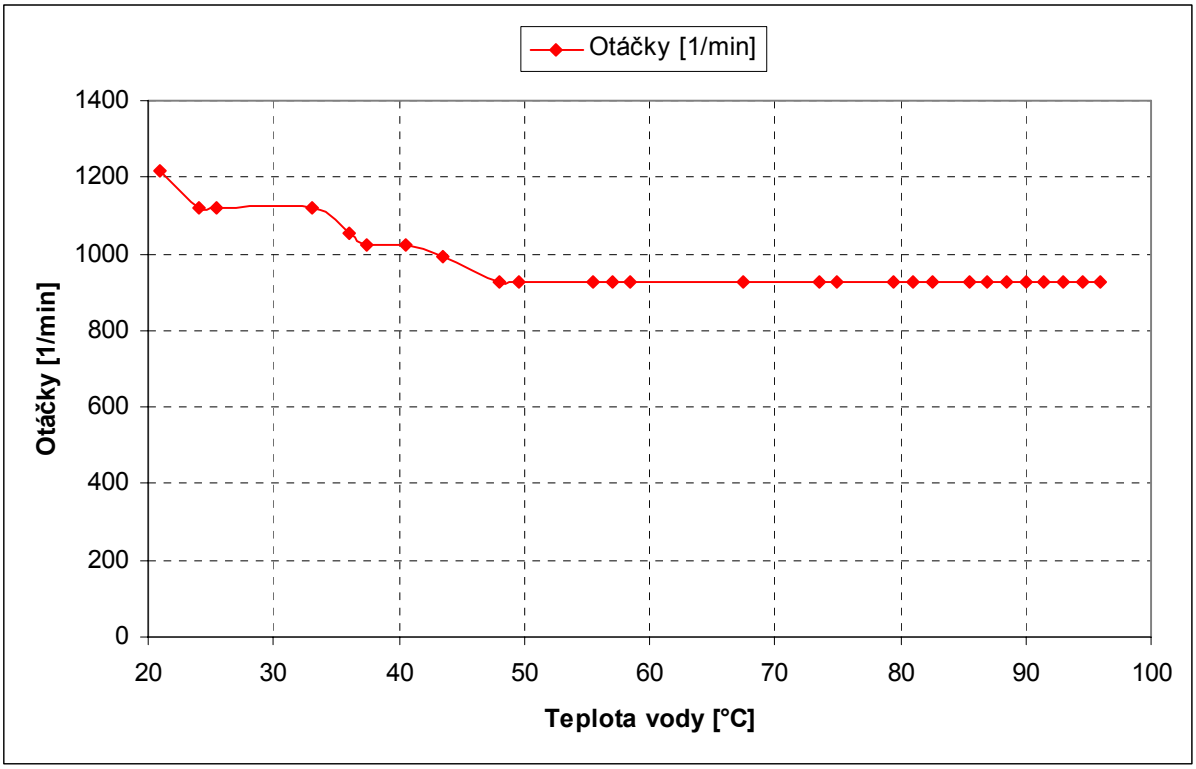


Graf.7.8 Závislost doby vstřiku při startování na teplotě motoru

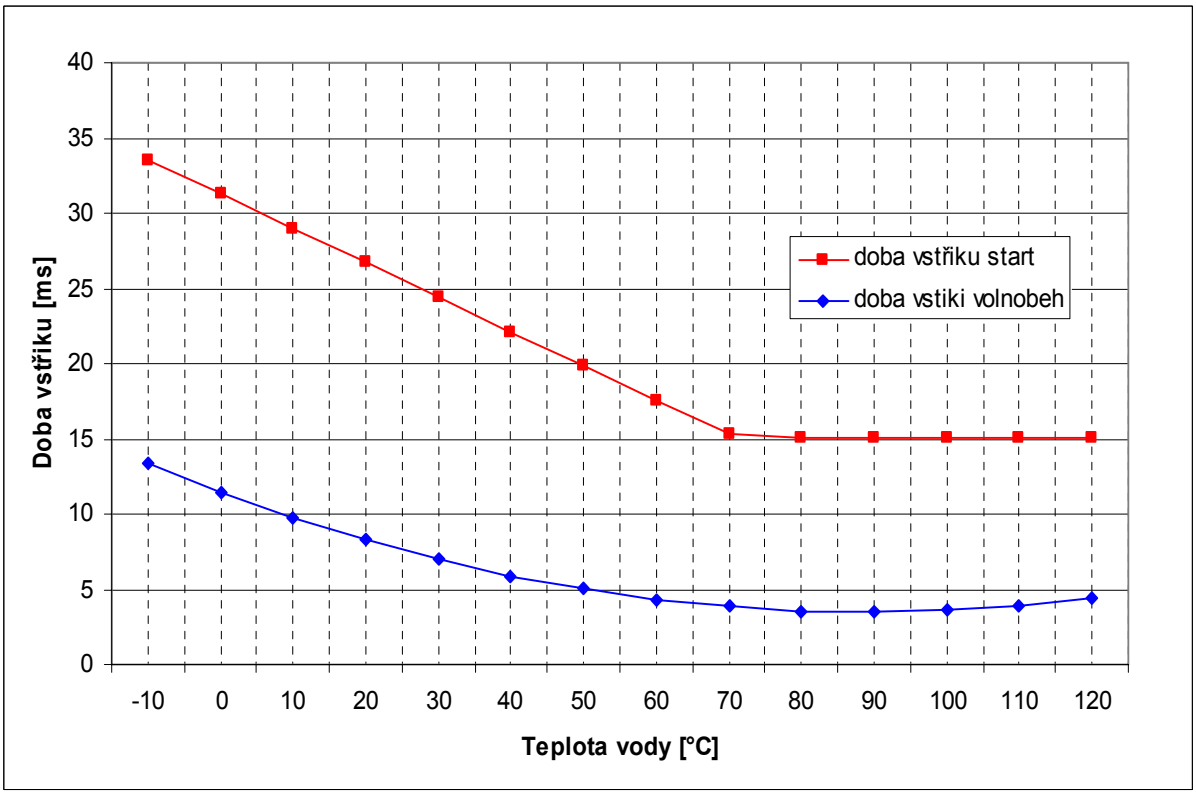
Fáze zahřívání motoru



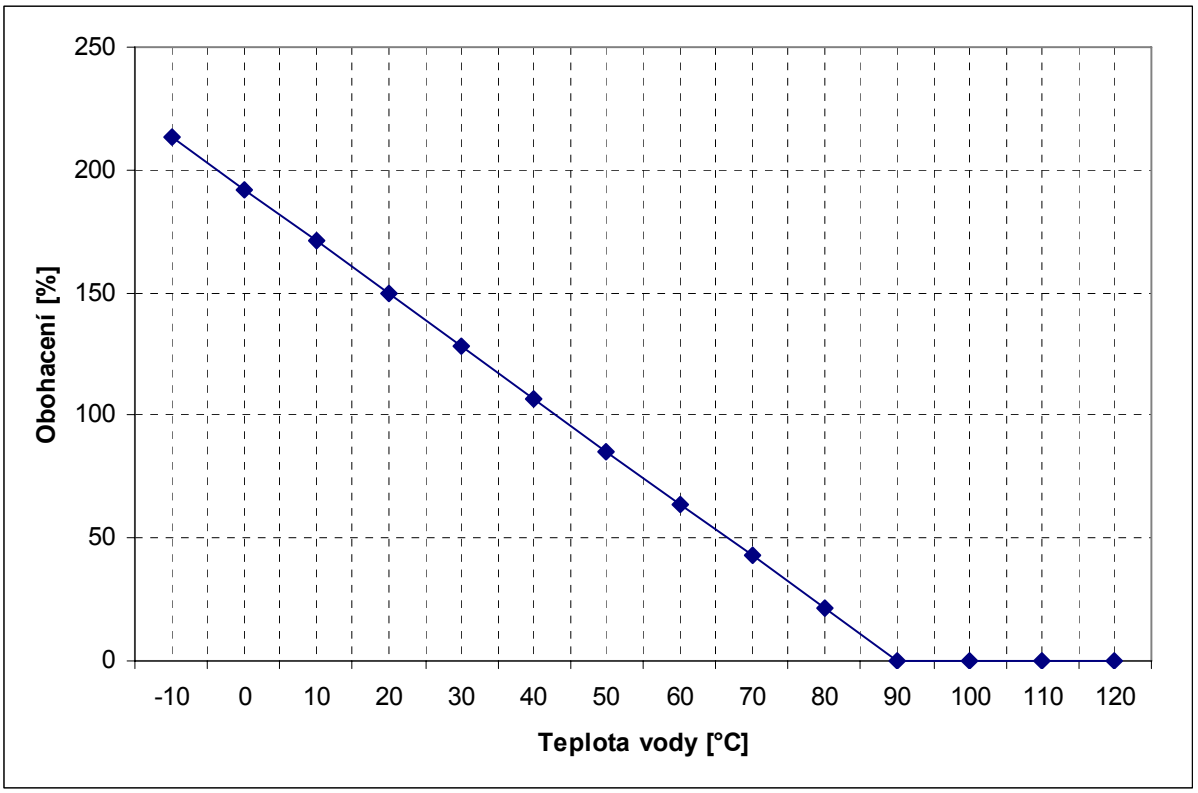
Graf.7.9 Závislost doby vstřiku na teplotě vody ve fázi zahřívání motoru při volnoběžných otáčkách, (skoky hodnot jsou zapříčiněny způsobem měření viz graf.7)



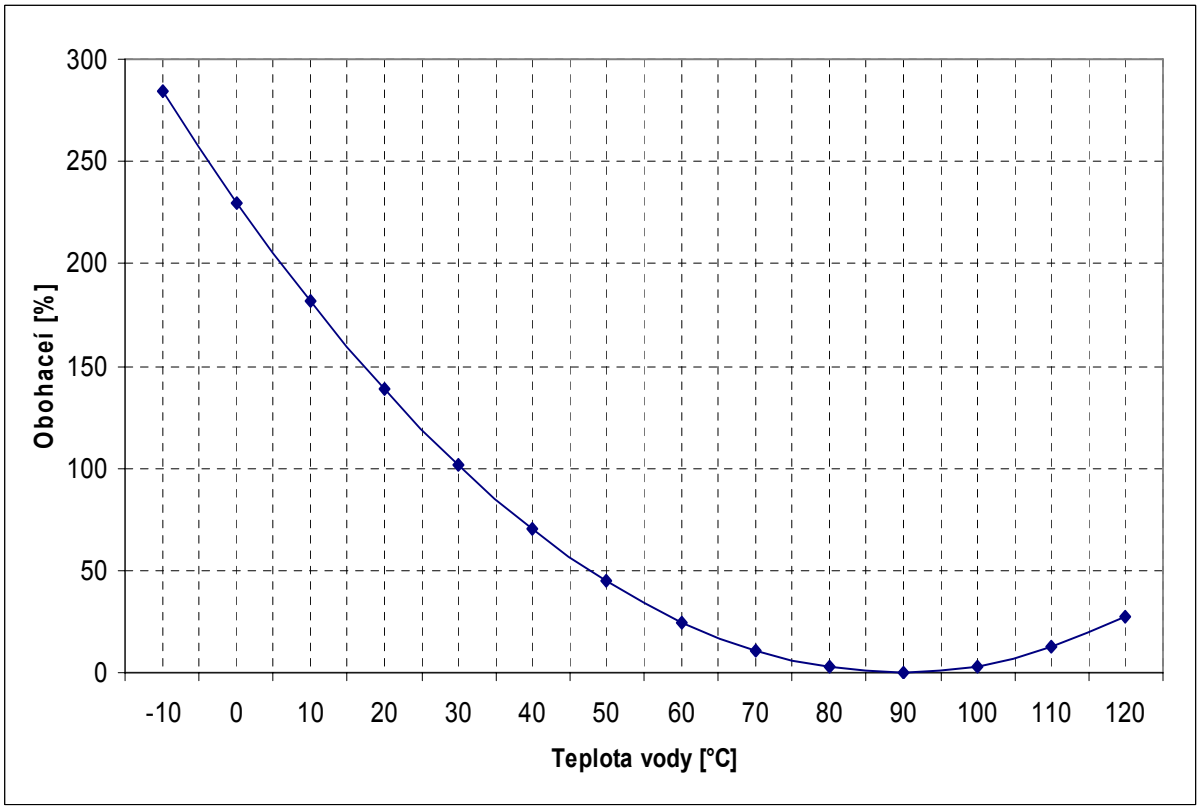
Graf.7.10 Závislost regulace volnoběžných otáček na teplotě motoru



Graf.7.11 Závislost doby vstřiku na teplotě vody. Porovnání fáze statování a fáze zahřívání motoru.



Graf.7.12 Procentuální vyjádření obohacení doby vstřiku při startu v závislosti na teplotě 0% - 90°C - 10,75ms



Graf.7.13 Procentuální vyjádření obohacení doby vstřiku při volnoběhu 0% - 90°C - 3,4ms

7.4 Získané poznatky

Jako nejvhodnější řešení záznamu dat se jevilo, veškerá data která snímal hardware brzdy (jako moment, výkon, teploty, tlaky atd..) ukládat pomocí automatického záznamu .Zde se velice osvědčilo nastavit tento záznam po 15 až 30 sec, což je doba po které se uložila veškerá snímaná data do paměti PC. Tato doba se jevila jako optimální vzhledem k přijatelnému max. počtu dat kdy ještě nedocházelo k přebytečnému zahlcení těmito daty a zároveň během této doby byl uložen dostatečný min. počet hodnot tak, že bylo možno data efektivně vyfiltrovat a použít pouze ty kde byly již ustálené podmínky jako např. požadované otáčky a teploty, a tím vyhodnocovat data snímaná za podobných provozních podmínek. Hodnoty předstihu zážehu a doby vstřiku byly zapisovány ručně, což se jevilo jako efektivní a nejjednodušší řešení. Pro měření byl stěžejní záznam z indikace tlaků ve válci, což bylo hlavním parametrem volby postupu měření. Nejlépe se tedy osvědčil způsob měření, kdy jeden operátor nastaví požadované parametry brzdného režimu, sleduje měřené hodnoty a jakmile se motor ustálí po určité době v konstantních hodnotách, zapíše hodnoty předstihu zážehu a doby vstřiku. Současně dá signál druhému operátorovi, který zaznamená data z indikace tlaku ve válci. Poté operátor 1. přenastaví brzdný režim podle stanoveného postupu a měření se opakuje. Rozsah otáček byl zvolen od 1500 do 4500 ot/min a krok měření po 500-ti ot/min, což se nakonec ukázalo jako optimální hodnota pro zvolený účel měření. Nastavení ŠK bylo měněno od 100%, tedy plného zatíženi, do 20%, kdy už i po úplném odlehčení brzdy motor nedosáhl výších otáček. Jednotlivé nastavení ŠK bylo měněno nejprve po kroku 20%, což se ukázalo jako vhodná hodnota v oblastech plného otevření ŠK, kde nedocházelo k příliš dramatickým změnám předstihu zážehu ani doby vstřiku. Ovšem v oblasti malého otevření ŠK dochází k výrazným změnám měřených hodnot, především dochází ke strmému nárůstu předstihu zážehu, jak je také patrno následně z grafu. Z těchto důvodu bylo původní měření doplněno ještě dalším měřením v oblastech malého otevření ŠK s použitím jemnějšího kroku. Pro správné pochopení funkce korekcí, adaptací a obohacovacích režimů ŘJ vzhledem k teplotám (např. vody), startování , stabilizaci volnoběhu atd. byla provedena řada měření pro dané fáze motoru. Naměřené hodnoty byly následně analyzovány a porovnány z teoretickými domněnkami a poznatky, čím jsem došel k jasným závěrům o těchto funkcích ŘJ, což také měření potvrdilo.

7.5 Závěr a zhodnocení měření

Měřením byla získána data celkové charakteristiky motoru a indikace tlaku , které budou sloužit k pozdější analýze a porovnání s následujícími měřeními. Současně jsme získali hodnoty předstihu zážehu a doby vstřiku pro jednotlivé otáčky a zatížení, které budou sloužit jednak jako vstupní údaje pro programovatelnou ŘJ a také pro porovnání s vypočtenými hodnotami. Doplňkovým měřením fází zahřívaní motoru byly objasněny procesy jednotlivých korekčních funkcí ŘJ při těchto fázích motoru. Zjištěné a vypočítané závislosti budou sloužit pro stanovení vstupních údajů pro programovatelnou jednotku.

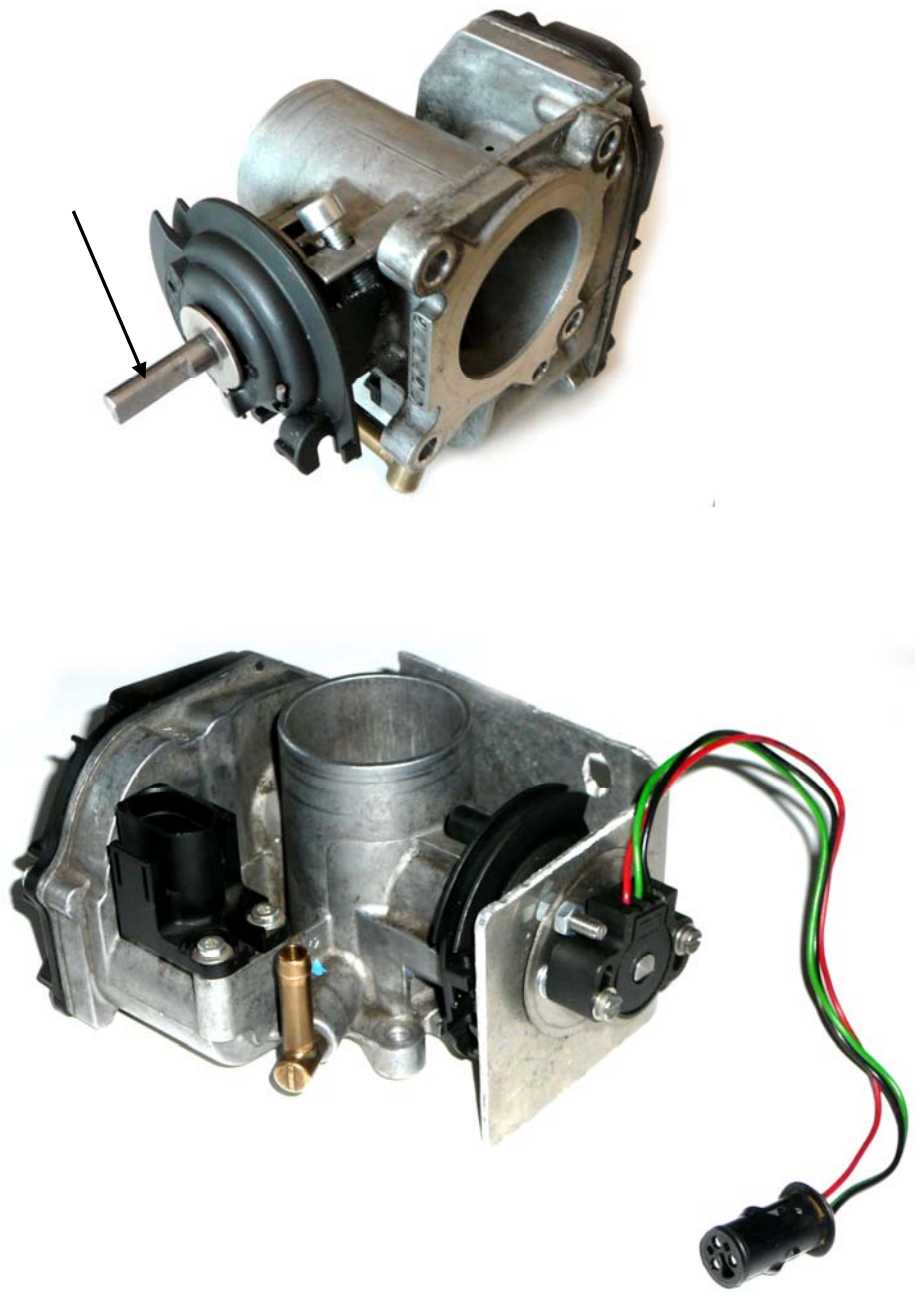
.

8 Aplikace programovatelné řídicí jednotky

8.1 Zapojení, kalibrace a nastavení základních vstupních hodnot.

ŘJ byla s navrženou kabeláží aplikována na motor. Pro uchycení snímače úhlu natočení škrticí klapky byl vyroben pomocný držák. Bylo nutné provést drobnou konstrukční úpravu hřídele škrticí klapky (bylo provedeno prodloužení této hřídelky právě z důvodu připojení snímače na škrticí klapku). Dále bylo provedeno nastavení základních vstupních údajů a hodnot. Pomocí kalibračního software a stroboskopické lampy byla přesně nastavena poloha referenční značky klikového hřídele. Dále byla provedena kalibrace a nastavení ostatních potřebných snímačů.

.



Obr.8.1 Přichycení potenciometru na škrtící klapku

8.2 Výpočet základních vstupních údajů pro řídicí jednotku

Základní vstupní parametry a korekce hodnot doby vstřiku byly spočítány pomocí programu Math-CAD na základě níže uvedených vztahů. (Plnící účinnost byla změřena na podobném motoru v rámci cvičení v předmětu spalovací motory ve 4.ročníku).

Základní parametry motoru

Počet válců:

$$n_v = 4$$

Vrtání:

$$D = 72 \cdot mm$$

Rameno kliky:

$$r_k = 30.6 \cdot mm$$

Délka ojnice:

$$l = 1.33 \times 10^2 \cdot mm$$

Kompresní poměr:

$$\varepsilon = 9.9$$

Klikový poměr:

$$\lambda_k = \frac{r_k}{l} \tag{1}$$

Zdvih:

$$H_m = r_k \cdot 2 \tag{2}$$

Otáčkový činitel pro 4-dobý motor

$$\tau = 2$$

Použité konstanty

Exponent isoentropy vzduchu pro 2-atomový plyn $\kappa = 1.4$

Plynová konstanta vzduchu $r = 287.1 \cdot \frac{J}{kg \cdot K}$

Univerzální plynová konstanta $R = 8314.3 \frac{J}{K \cdot kmol}$

Molární hmotnost vzduchu $M_{vzd} = 28.97 \frac{kg}{kmol}$

Atmosférické podmínky

Atmosférický tlak $p_{pl} = 98.1 kPa$

Atmosférická teplota °C $T_c = 25 \ °C$

Výpočet objemu motoru

Zdvihový objem válce

$$V_H = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot H_m \tag{3}$$

Kompresní objem

$$V_C = V_H \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon - 1} \right) \tag{4}$$

Celkový objem válce

$$V_M = V_H + V_C \tag{5}$$

Zdvihový objem motoru

$$V_{mot} = n_v \cdot V_H \tag{6}$$

Celkový objem motoru

$$V_{cmot} = n_v \cdot V_M \tag{7}$$

Vstupní hodnoty plnicí účinnosti

Otáčky [1/min]	Plnící účinnost [%]
1500	81,66
2000	80,25
2500	77,58
3000	72,17
3500	85,8
4000	87,83
4500	84,44

Tab.8.1 Hodnoty plnicí účinnosti změřené na podobném motoru



Graf.8.1 Průběh závislosti plnicí účinnosti na otáčkách motoru

Použité palivo BA 95N

$C = 0.85$

$H = 0.141$ $\frac{kmol}{kg}$

$O = 0.00$

$S = 0.000$

$C + H + S + O = 1$

Molární množství vzduchu připadající na 1kg paliva

$$M_{Lt} = \frac{1}{0.21}\cdot\left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32}\right) \quad (8)$$

Teoretický směšovací poměr

$$\sigma_t = M_{vzd}\cdot M_{Lt} \quad (9)$$

Zvolený součinitel přebytku vzduchu

$\lambda_Z = 0.9$

Skutečný směšovací poměr

$$\sigma_{sk} := \lambda_Z\cdot\sigma_t \quad (10)$$

Teplota plnícího vzduchu

$T_{pl} = (273.15 + T_c)K$

Hustota plnícího vzduchu

$$\rho_{pl} = \frac{p_{pl}}{r\cdot T_{pl}} \quad (11)$$

Specifická efektivní spotřeba vzduchu

$$m_{Zspec} = V_M \cdot \eta_{pl} \cdot \rho_{pl} \tag{12}$$

Spalovací hmotnostní tok motorem

$$m_Z = m_{Zspec} \cdot n \cdot \frac{n_v}{\tau} \tag{13}$$

Spotřeba celého motoru za 1 s

$$M_{cs} = \frac{m_Z}{\sigma_{sk}} \tag{14}$$

Doba 1 otáčky

$$t_n = \frac{1}{n} \ s \tag{15}$$

Spotřeba motoru na za 1ot. KH.

$$M_{m1ot} = M_{cs} \cdot t_n \tag{16}$$

Spotřeba 1válce za 1ot. KH.

$$Mv1vot = \frac{M_{m1ot}}{n_v} \tag{17}$$

Průtok vstřikovacím ventilem

$$Flow = 1.154 \times 10^{-3} \cdot \frac{kg}{s}$$

Výsledná doba vstřiku

$$x = \frac{Mv1vot}{Flow} \tag{18}$$

Otáčky [1/min]	Doba vstřiku [ms]
1500	7,81
2000	7,66
2500	7,41
3000	6,89
3500	8,19
4000	8,39
4500	8,07

Tab.8.2 Výsledná doba vstřiku

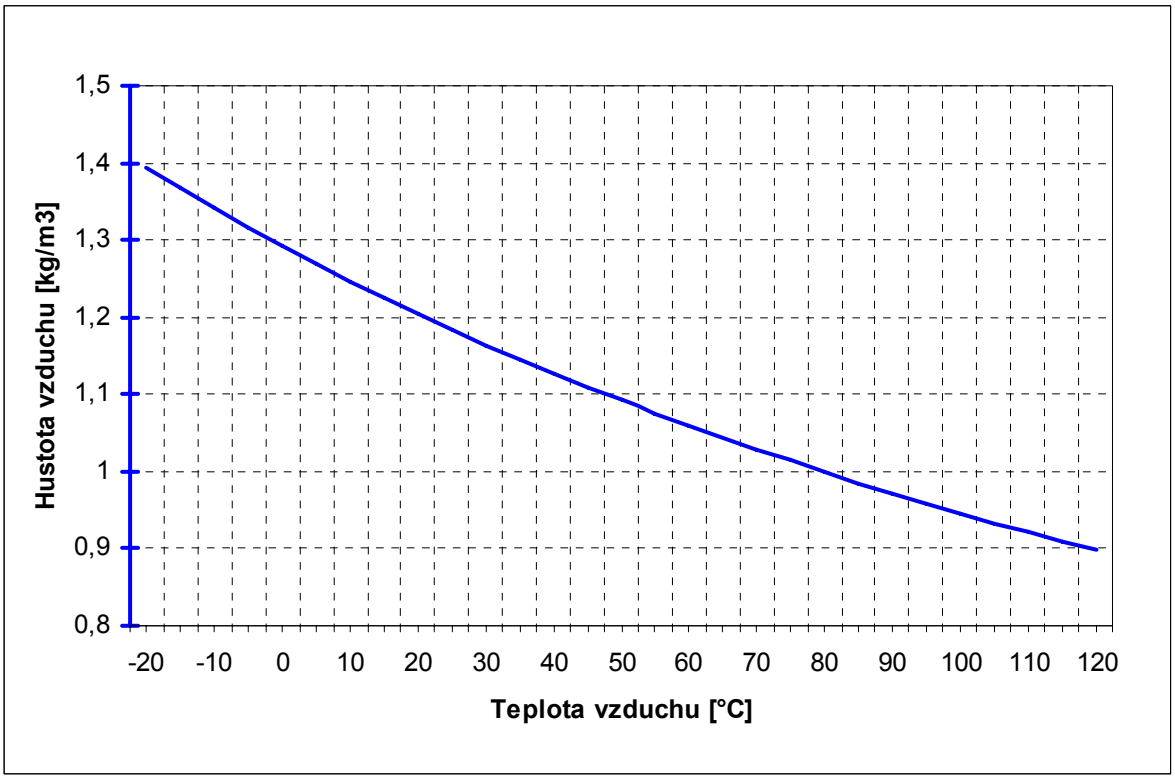
Procentuální vyjádření doby vstřiku - šířka pulsu

Otáčky [1/min]	Šířka pulsu [%]
1500	19,5
2000	25,6
2500	30,9
3000	34,5
3500	47,8
4000	56
4500	60,5

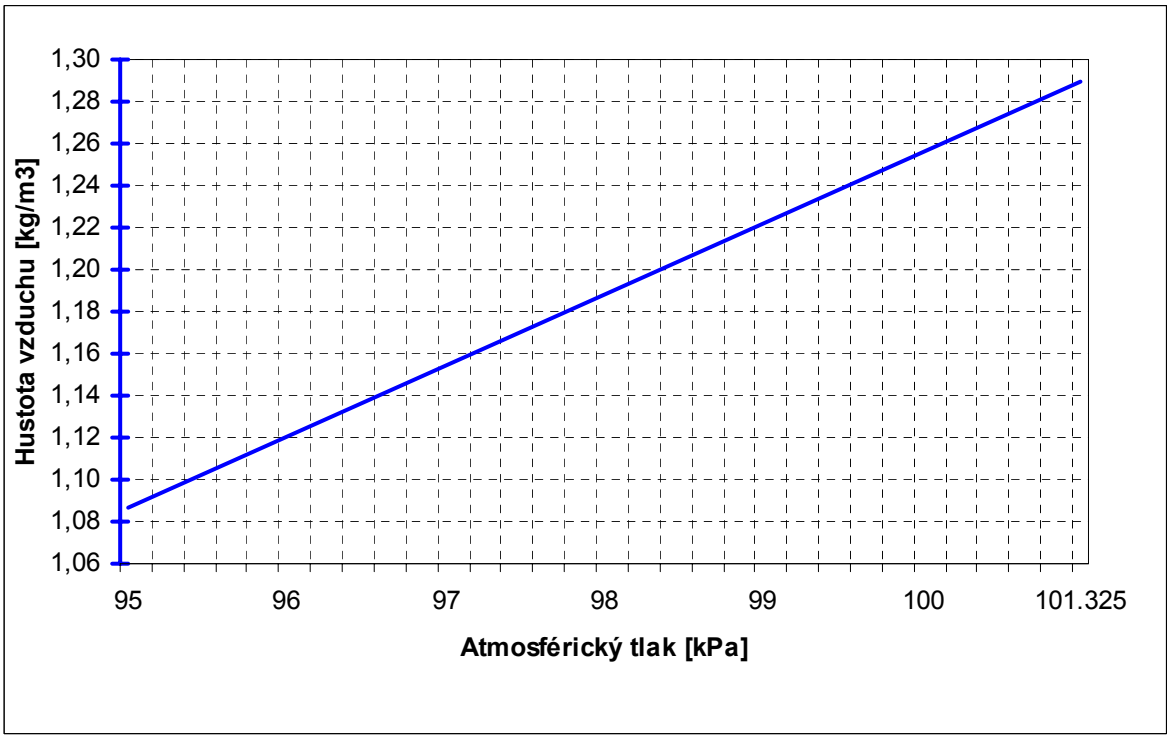
Tab.8.3 Výsledná šířka pulsu

Hustota vzduchu

$$\rho_{vzd} = \frac{p_{at}}{r \cdot T_{vzd}} \tag{19}$$



Graf.8.2 Závislost hustoty vzduchu na teplotě při konstantním atmosférickém tlaku



Graf.8.3 Závislost hustoty vzduchu na atmosférickém tlaku při konstantní teplotě 0°C

8.3 Měření a optimalizace provozních režimů motoru s pomocí programovatelné řídicí jednotky

8.3.1 Cíle měření

Hlavním cílem měření bylo optimalizovat jednotlivé provozní režimy motoru. Na základě jednotlivých dílčích měření určit příslušné závislosti bohatosti směsi, předstihu zážehu, výkonových parametrů motoru a omezujících limitů detonačního spalování. Z těchto poznatků navrhnout optimální metodiku měření pro optimalizaci provozních režimů motoru. Na základě algoritmů takto navržené metodiky měření provést optimalizaci pro zvolené provozní režimy motoru.

8.3.2 Způsob měření

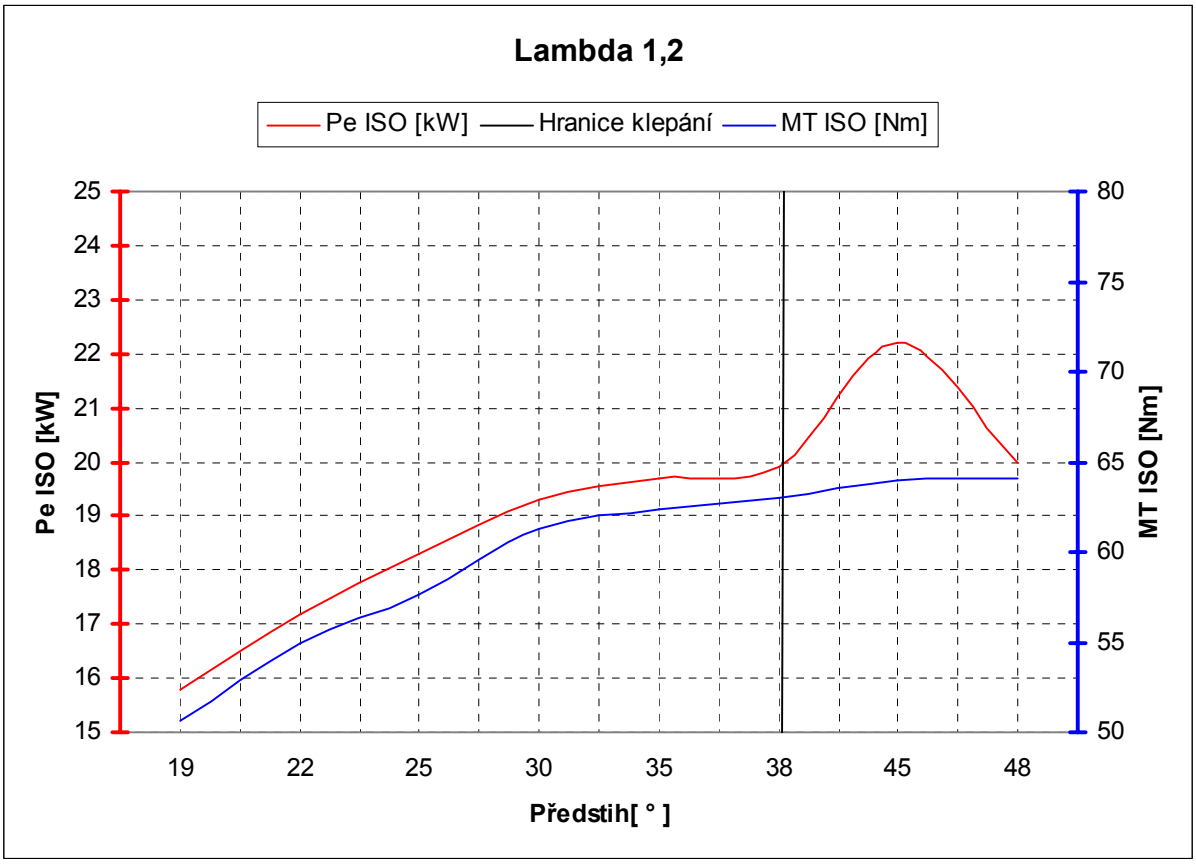
Nejprve byla provedena jednotlivá dílčí měření pro zjištění příslušných závislostí na bohatosti směsi, předstihu zážehu , klepání a výkonových parametrech motoru. Měření probíhalo tak, že pro zvolený provozní režim motoru (otáčky, zatížení – otevření škrtící klapky) byla měněna hodnota poměru lambda v rozsahu λ -1,2 až 0,8. Pro jednotlivé hodnoty λ byl měněn předstih až za hranici klepání motoru a současně byl prováděn kompletní záznam jednotlivých dat motoru. Kompletní záznam dat byl prováděn pomocí programu CMSW a současně také datalogeru ŘJ tak, že bylo možno následně ze všech údajů , které zaznamenávala ŘJ, pomocí zobrazení časového průběhu hodnot, snadno vybrat požadované provozní stavy a na základě časového údaje poté snadno vyhledat potřebná data v tabulce všech měřených hodnot. Data zaznamenávány programem CMSV a datalogeru ŘJ byly synchronizovány na základě systémového času PC tak, že vznikl jeden přehledný datový soubor ze všemi uloženými daty, tak jak byly v čase naměřeny. Následně bylo provedeno porovnání na základě výsledných výkonových parametrů motoru. Na základě získaných zkušeností byla provedena optimalizace zvolených provozních režimů se zaměřením zejména pro oblast 100% zatížení, tedy naladění vnější otáčkové charakteristiky motoru.

8.3.3 Naměřené výsledky

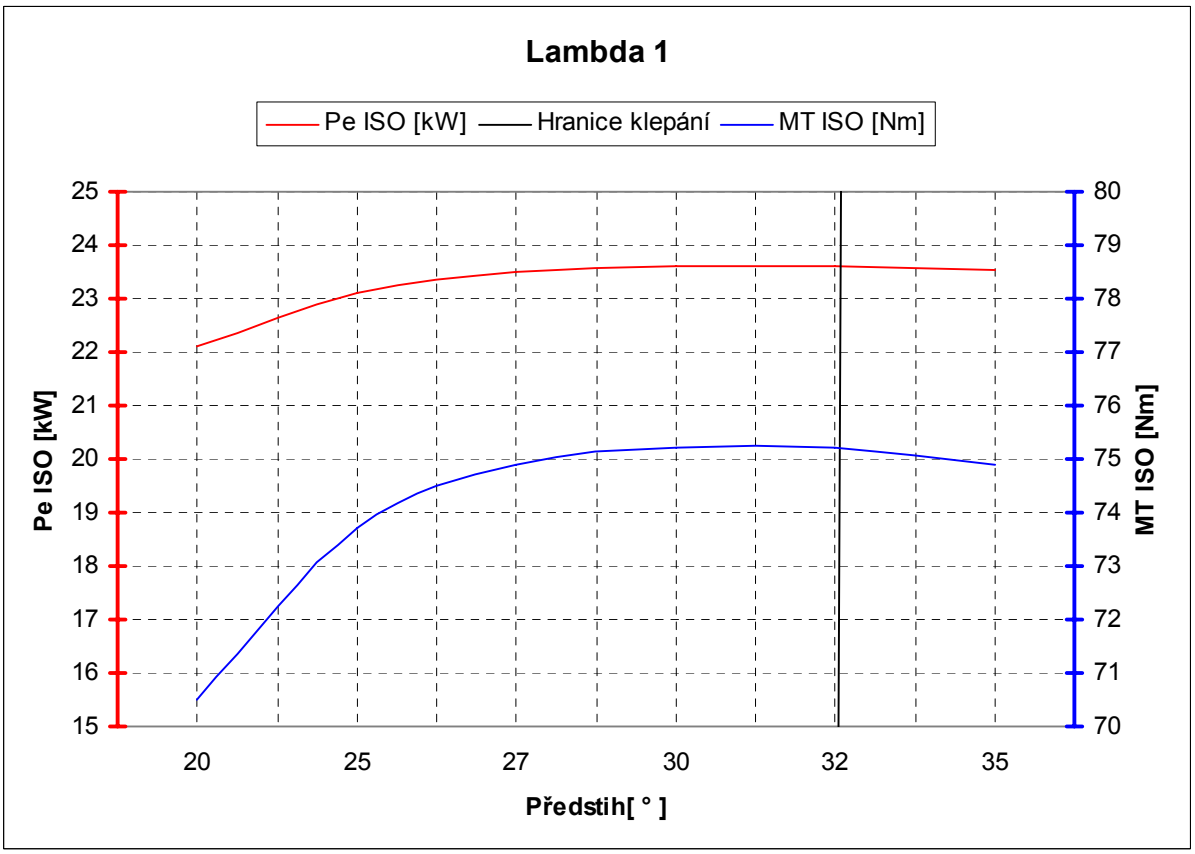
Tabulky naměřených a vypočtených hodnot jsou uvedeny v příloze.

V této kapitole budou prezentovány výsledky v podobě grafického vyjádření. V první části jsou naměřené výsledky z jednotlivých dílčích měření. Nejprve jsou prezentovány zjištěné závislosti pro jednotlivé hodnoty lambda na výkonových parametrech motoru, předstihu zážehu a hranici detonačního hoření, tedy počátek klepání motoru. Tyto závislosti byly změřeny pro 3000 ot/min a 50% otevření škrticí klapky. Bylo tak učiněno z důvodů velké náročnosti měření, jak časové tak i finanční. Neboť kdybychom chtěli tuto analýzu provést např. pro celou vnější otáčkovou charakteristiku, znamenalo by to v našem případě, provést měření pro 7 otáčkových oblastí, v každé z nich potom provést měření na 5 hodnotách směšovacího poměru lambda, pro každou tuto hodnotu lambda měnit předstih pro 5 a více hodnot a přitom měřit výkonové parametry motoru. Znamenalo by to tedy pouze pro vnější otáčkovou charakteristiku 175 měřených bodů. Pro věrohodnost měření je nutno pro každý měřený bod nechat motor nejprve ustálit nejméně 7 až 10 minut. Pokud na každý bod tedy budeme potřebovat čas 10 minut, výsledná doba tohoto měření by dosáhla téměř 30 hodin čistého času. Další důvod je také ten, že abychom skutečně odhalili závislost chování výkonových parametrů motoru na směšovacím poměru a předstihu zážehu, měnili jsme předstih až za hranici detonačního hoření, kdy již docházelo k poměrně intenzivnímu klepání motoru. Bylo by tedy velice nebezpečné pro motor, provést toto měření např. pro plné zatížení a maximální otáčky motoru. Z výše uvedených důvodu bylo tedy toto měření provedeno pouze pro zvolený provozní režim motoru a vnější otáčková charakteristika byla přímo naladěna na nejoptimálnější hodnoty.

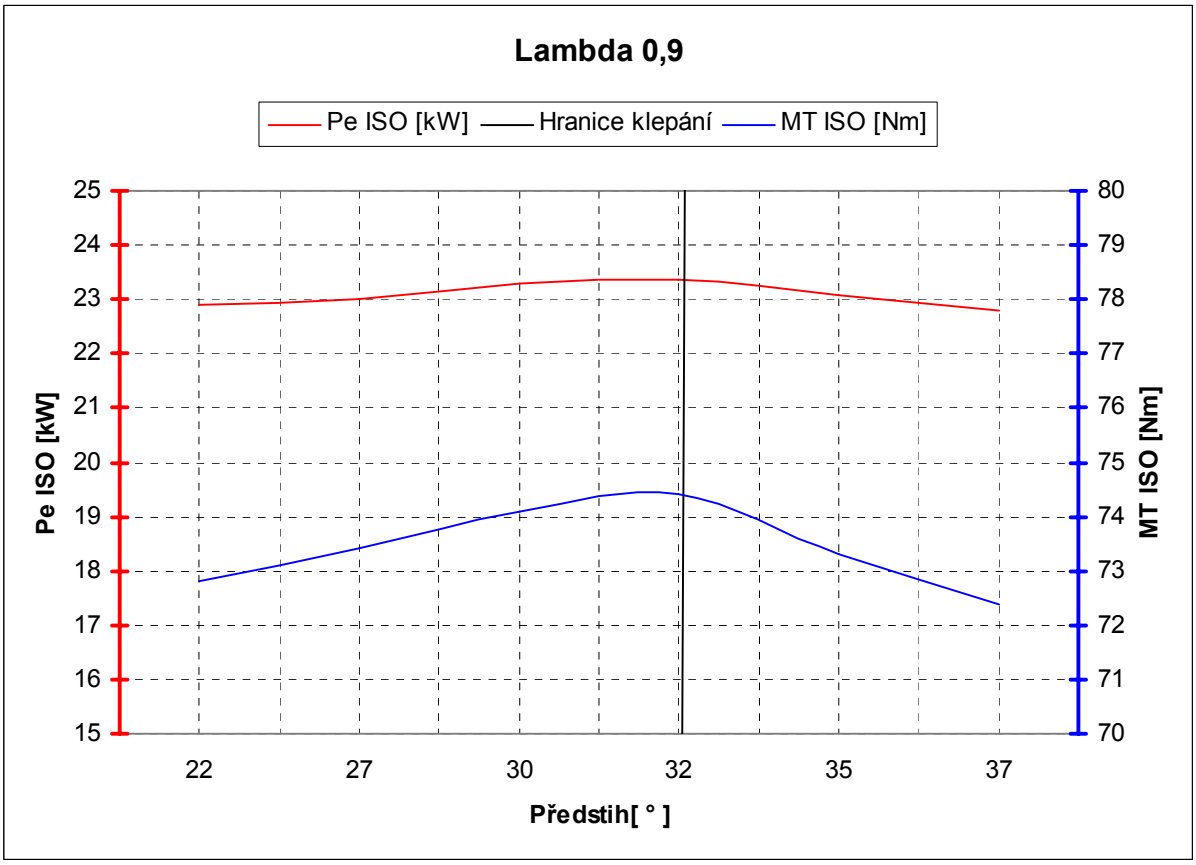
V grafu.8.8 je zobrazena závislost výkonových parametrů motoru na změně směšovacího poměru při konstantním předstihu zážehu. V grafu.8.9 je zobrazena hodnota maximálního naměřeného výkonu pro jednotlivé hodnoty lambda, současně s předstihem, při kterém byl tento výkon naměřen. Dále je graf ještě doplněn o průběh předstihu zážehu na hranici klepání, tedy počátek detonačního spalování, jenž vyjadřuje hodnotu max. bezpečného předstihu, který může být nastaven, aniž by došlo ke snížení životnosti či poškození motoru. V závěru je pak porovnání vnějších otáčkových charakteristik ve kterých jsou zobrazeny výkonové parametry motoru před a po provedení optimalizace.



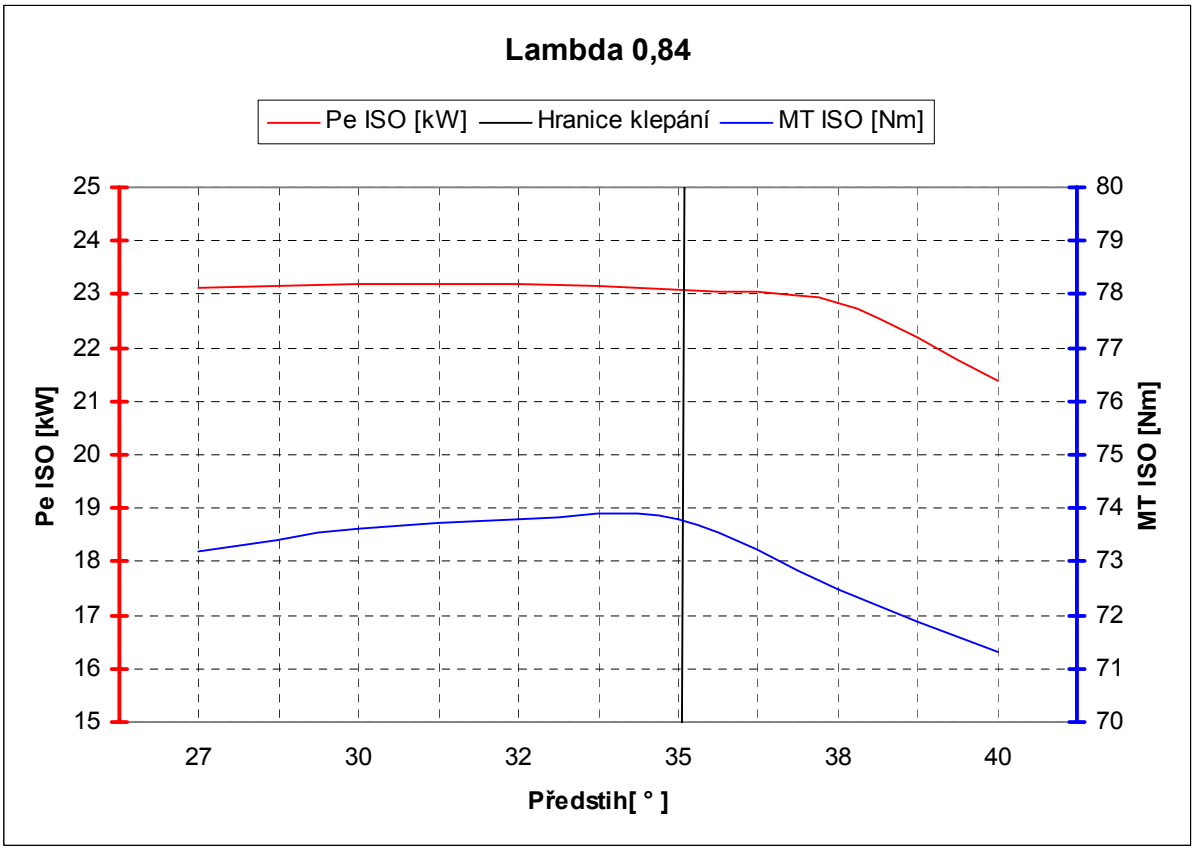
Graf.8.4 Závislost výkonu a točivého momentu na předstihu při směšovacím poměru λ 1,2



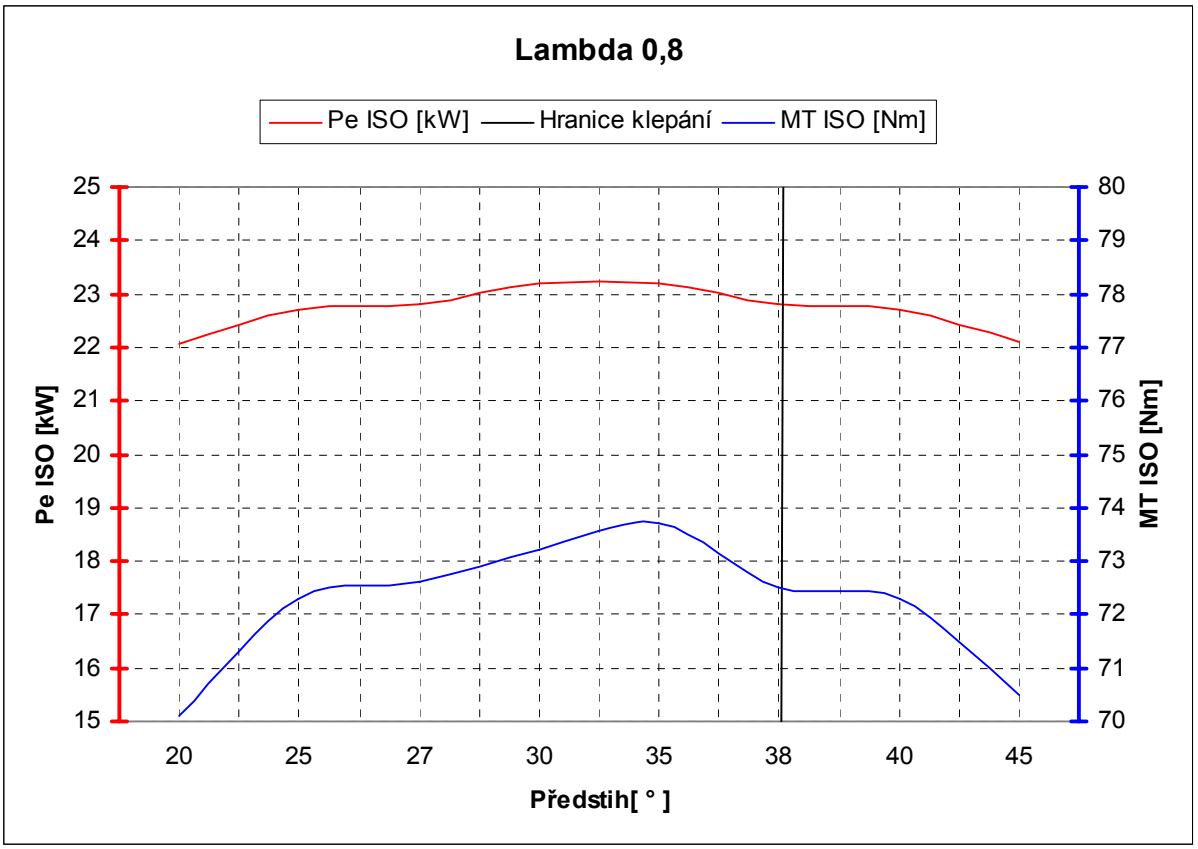
Graf.8.5 Závislost výkonu a točivého momentu na předstihu při směšovacím poměru λ 1



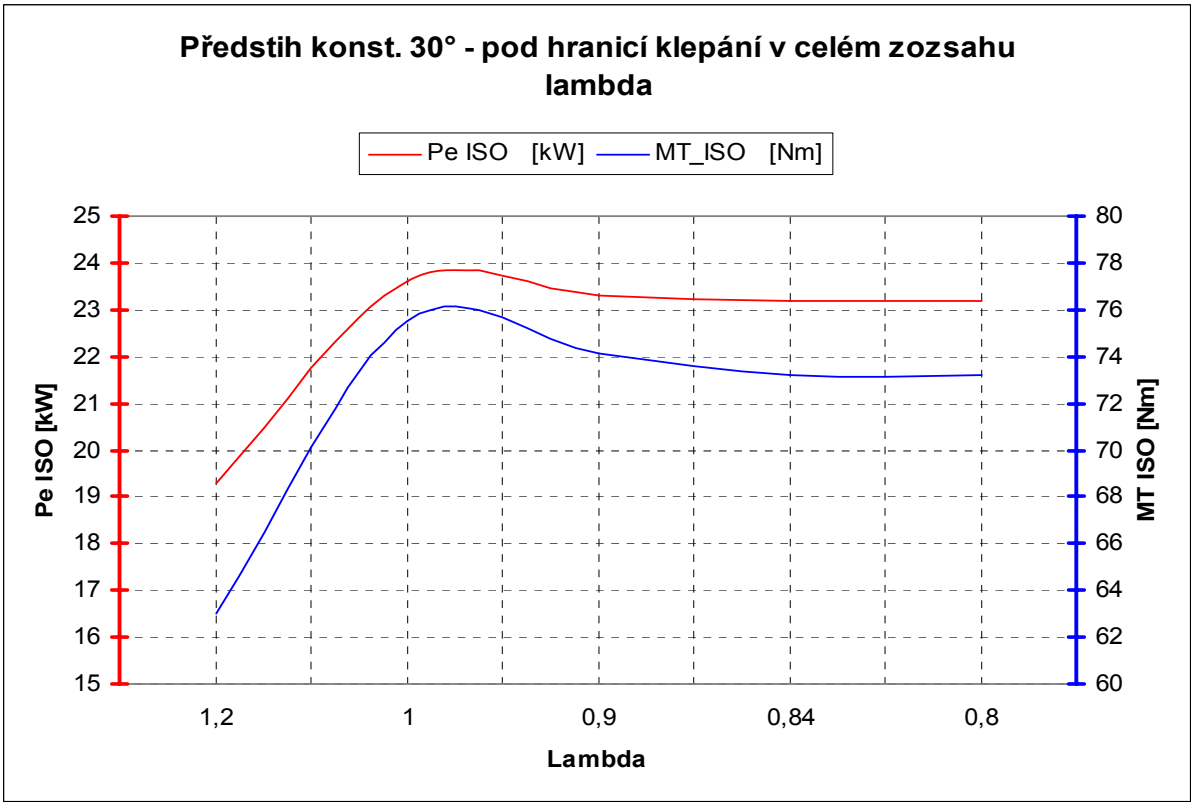
Graf.8.6 Závislost výkonu a točivého momentu na předstihu při směšovacím poměru λ 0,9



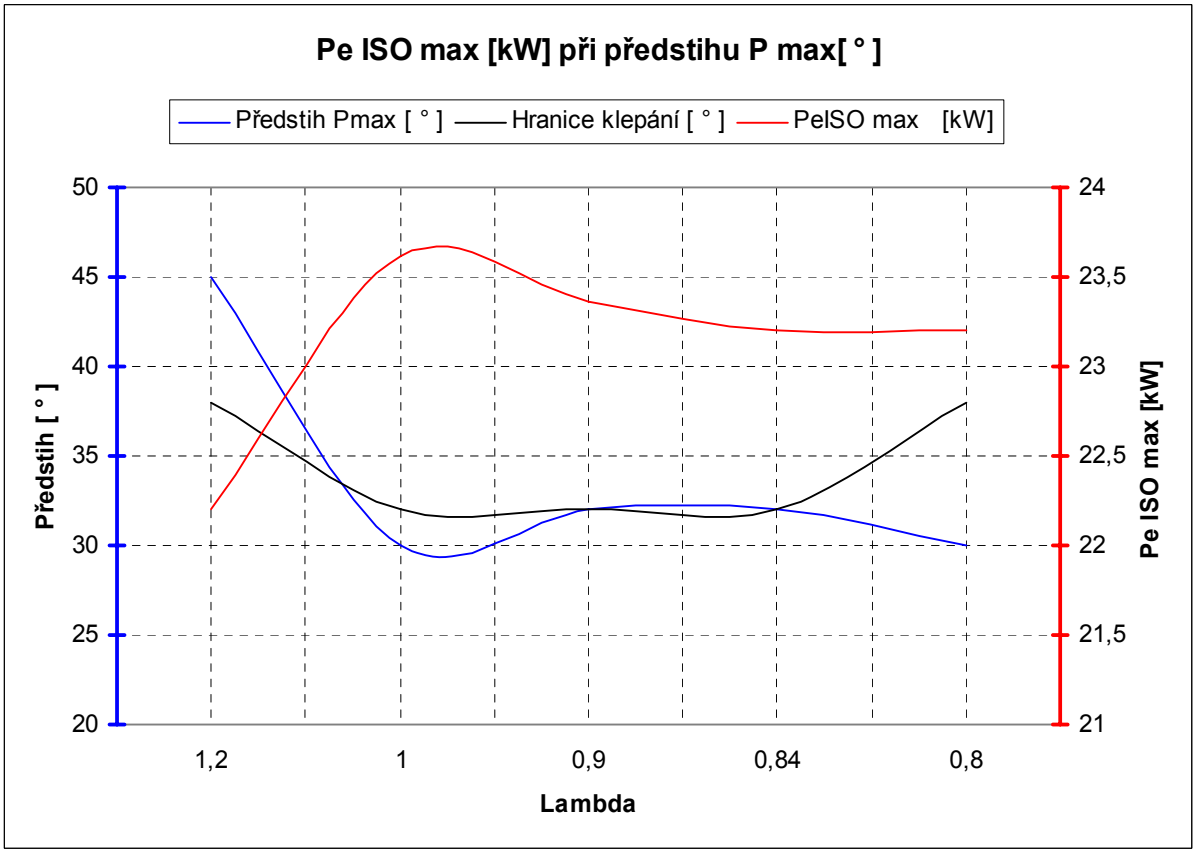
Graf.8.7 Závislost výkonu a točivého momentu na předstihu při směšovacím poměru λ 0,84



Graf.8.8 Závislost výkonu a točivého momentu na předstihu při směšovacím poměru λ 0,8



Graf.8.9 Závislost výkonu a točivého momentu na směšovacím poměru λ při předstihu 30°



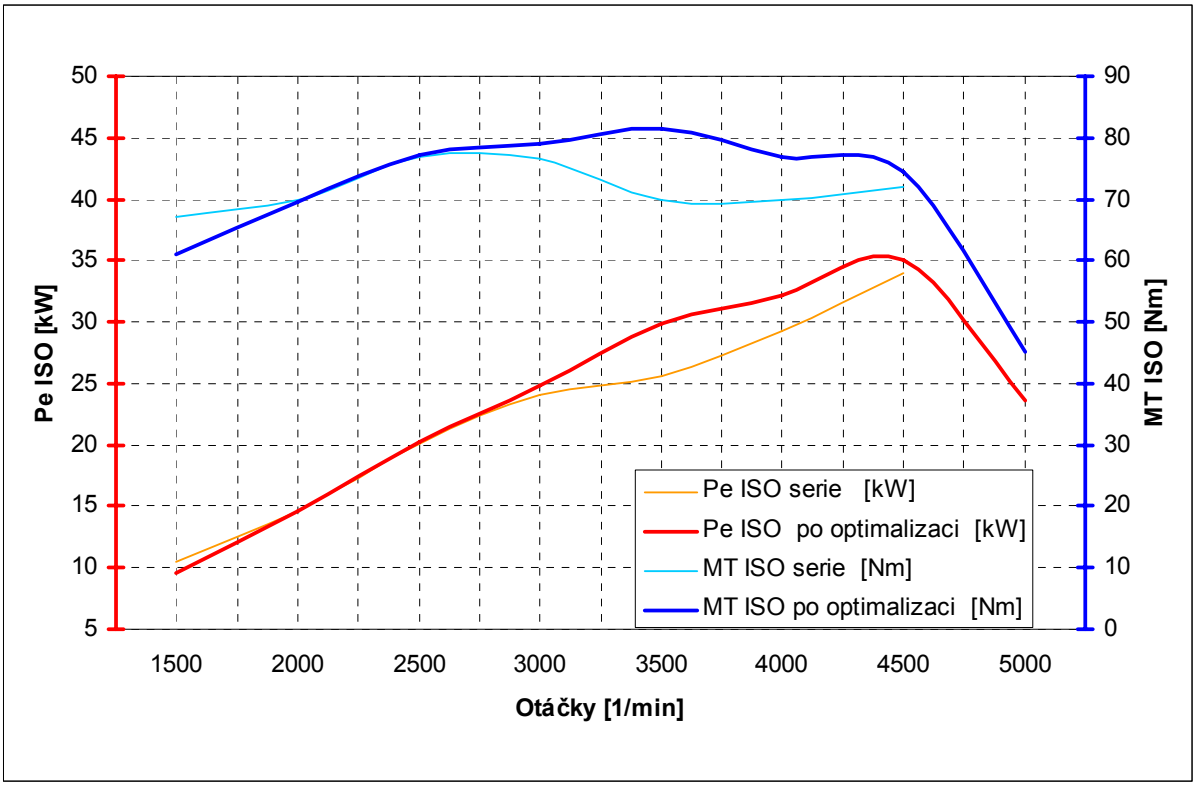
Graf.8.10 Závislost max. naměřeného výkonu, předstihu při kterém byl tento výkon naměřen a hranice klepání pro hodnoty lambda 1,2 až 0,8

8.3.4 Zhodnocení naměřených výsledků, získané poznatky

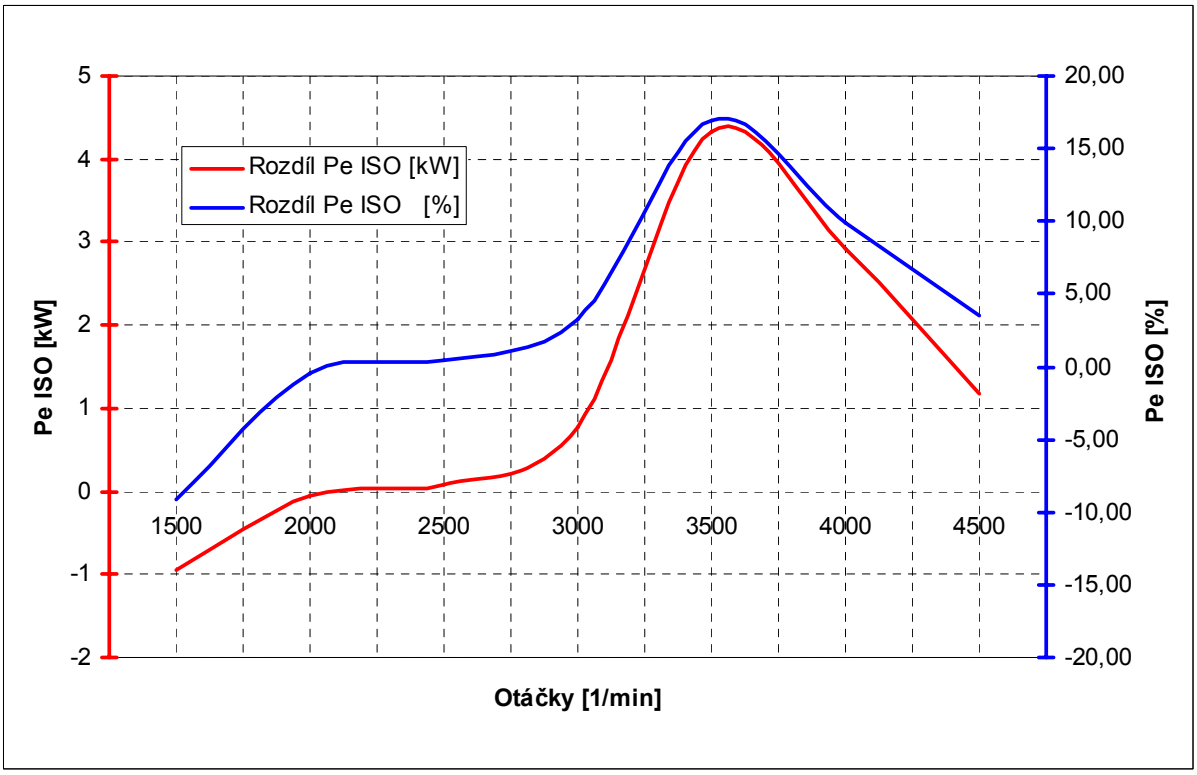
Při podrobném prostudování všech naměřených závislostí vyplynulo, že pro tento motor je v daném provozním režimu z hlediska výkonových parametrů nejoptimálnější hodnota poměru lambda v rozmezí 0,98 až 0,96. Z jednotlivých závislostí viz graf.8.1 až 8.5 vyplývá, že z hlediska detonačního spalování je nejnáchylnější oblast hodnoty lambda 1 až 0,90. Průběh optimálního předstihu zážehu pro dosažení nejvyšších výkonových parametrů v závislosti na poměru λ , neboli hodnoty předstihu, při kterém byly pro jednotlivé hodnoty λ naměřeny největší výkonové parametry, jsou vidět v grafu.8.7. Pro tyto hodnoty předstihu byl sice naměřen nejvyšší výkon ovšem v určitých oblastech tato hodnota již překročila mez klepaní a docházelo k detonačnímu hoření. Pro optimální provoz motoru při nejvyšších výkonových parametrech motoru je tedy nejvhodnější, pohybovat se na hranici předstihu P max (předstih při kterém byl naměřen nejvyšší výkon – modrá křivka) ovšem jen do té doby než dosáhneme předstihu na hranici klepání (hranice klepání – černá křivka). Z grafu.7.8 je zřejmá také závislost bohatosti směsi na průběhu zmíněné hranice klepání, kde se tato hranice v oblastech chudé směsi posouvá výrazněji směrem nahoru, což je zapříčiněno horší zápalností a hořením chudé směsi tedy i menší náchylnost k samozápalu, tedy detonačnímu hoření. Je tu ovšem další aspekt, že takto chudá směs má natolik pomalý průtah zážehu a průběh hoření, že nejoptimálnější zažehnutí směsi je ještě vysoko nad touto hranicí klepání motoru. Naopak v oblastech λ 1 až 0,9 je motor nejnáchylnější na detonační hoření, neboť při tomto složení směsi dochází k nejlepšímu spalování a jsou nejoptimálnější podmínky hoření a tedy i podmínky k samovznícení - detonačnímu hoření. Hodnota nejoptimálnějšího předstihu zážehu se v této oblasti pohybuje v úzkém rozsahu několika stupňů na samotné hranici klepání. Pro bohaté směsi nad λ 0,85 se hranice klepání pohybuje opět směrem nahoru do oblasti vyšších předstihů, což je zapříčiněno, že při takto bohaté směsi dochází k ochlazování spalovacího prostoru a je zde tedy i menší náchylnost k detonačnímu hoření

8.4 Porovnání výsledků

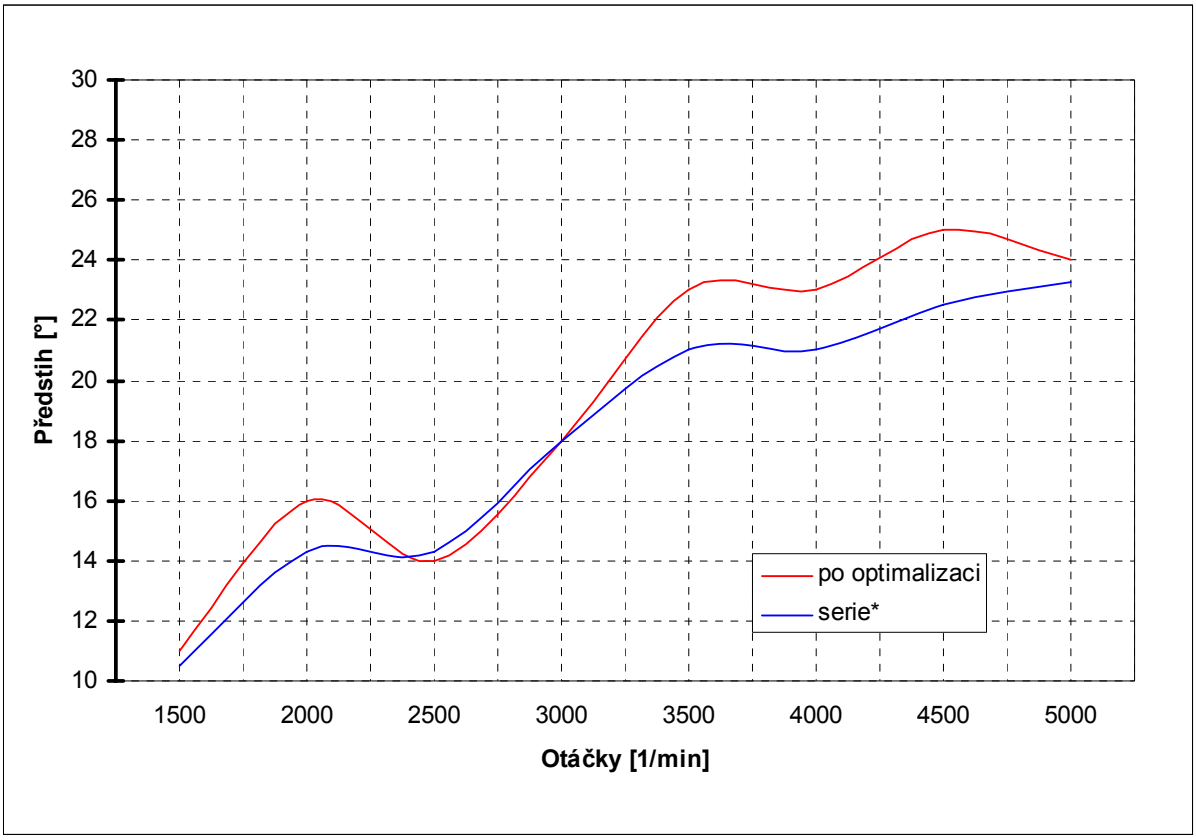
V grafu 8.10 je znázorněno porovnání výkonových parametrů motoru před a po optimalizaci. Na křivkách je nejen vidět nárůst maximálního výkonu a točivého momentu, ale především výrazné vylepšení jeho průběhu. To vše je ještě více patrné ze zobrazení výkonového nárůstu a jeho procentuálního vyjádření v grafu 8.11.V grafech 8.13,14 je porovnání vypočtených, optimalizovaných a sériových hodnot. Je vidět, že vypočtené hodnoty jsou sice nejvíce odlišné od naměřených hodnot, ale při bližším pohledu na měřítko je rozdíl minimální. Pouhým výpočtem nejsme sice schopni získat přesné optimální hodnoty pro výsledné použití, ale získáme velice přesné základní hodnoty, ze kterých lze vycházet při následné optimalizaci. Především také již před zahájením jakéhokoli měření, dostaneme z vypočítané hodnoty šířky pulsu velice přesnou informaci o objemové kapacitě vstřikovacího ventilu, tedy informaci o správné volbě velikosti vstřikovacích ventilů



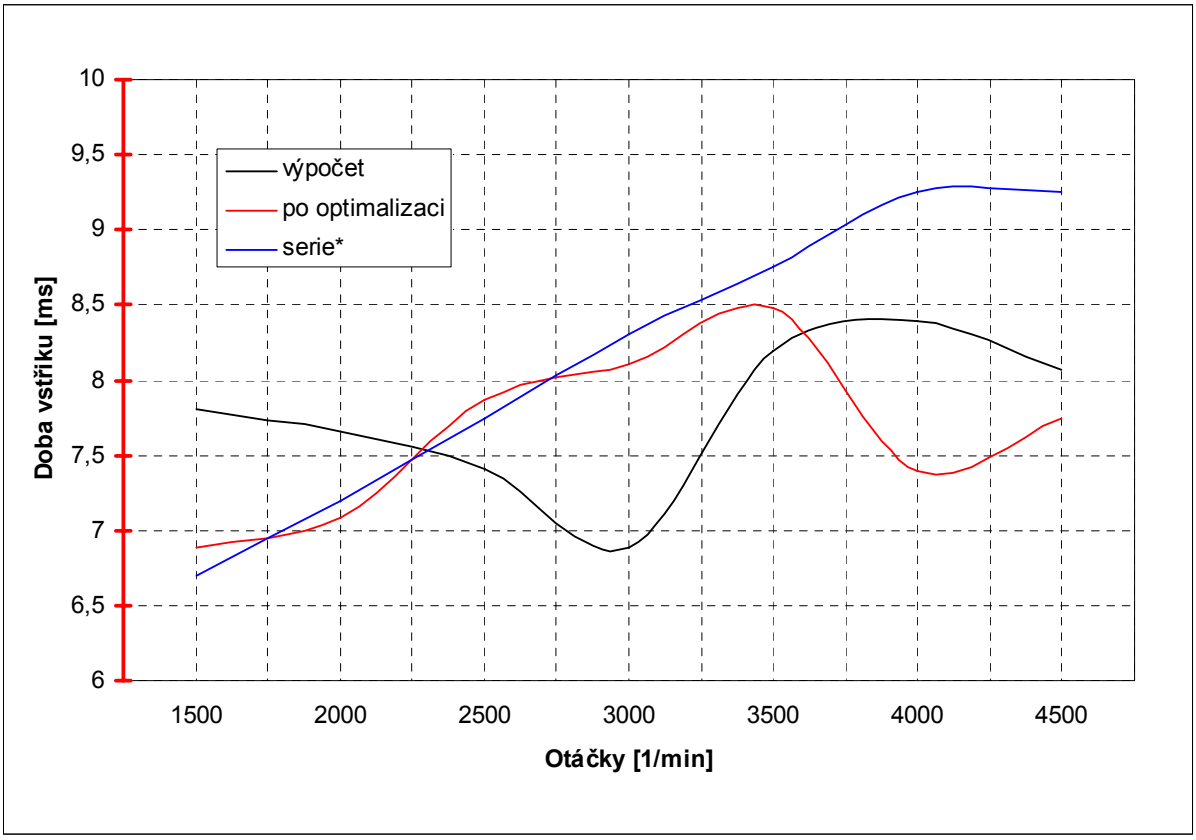
Graf.8.11 Vnější otáčková charakteristika - výkonové parametry motoru před a po optimalizaci



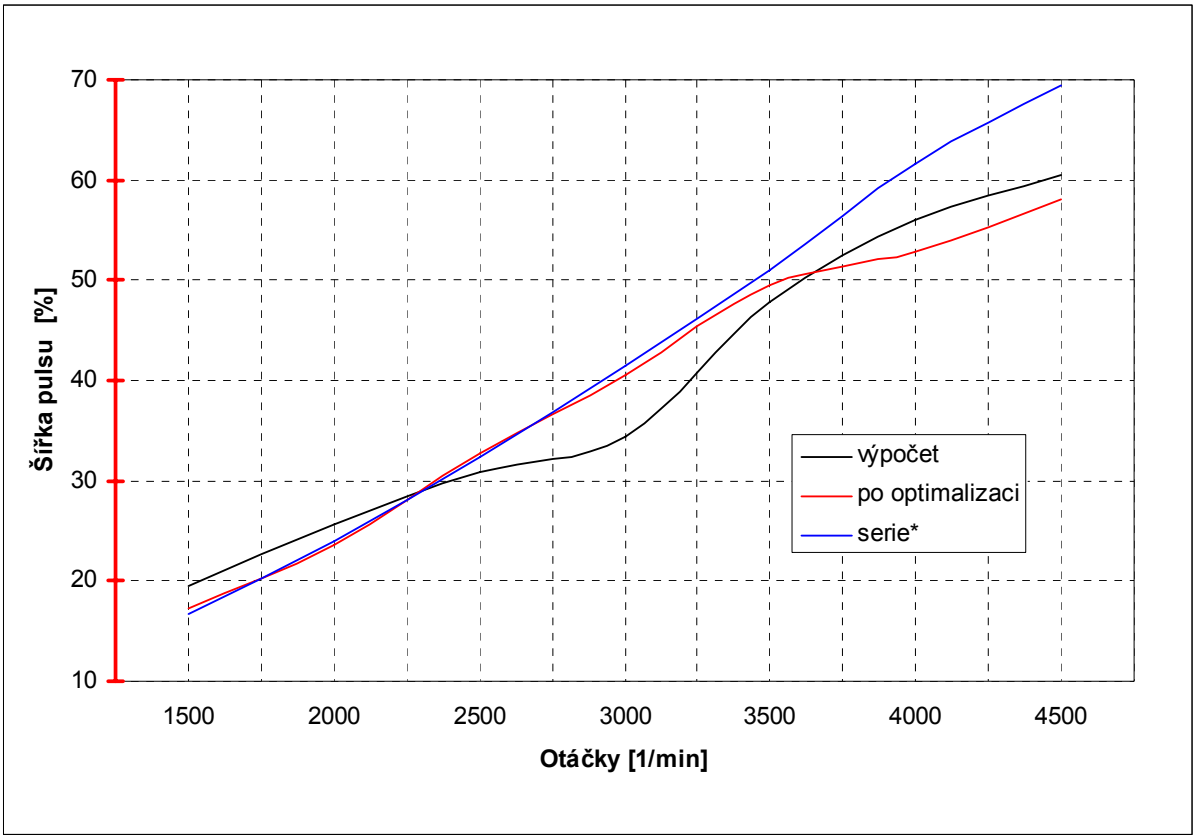
Graf.8.12 Závislost rozdílu výkonu na otáčkách a jeho procentuální vyjádření před a po optimalizaci – na vnější otáčkové charakteristice



Graf.8.13 Porovnání předstihu zážehu před a po optimalizaci na vnější otáčkové charakteristice



Graf.8.14 Porovnání doby vstřiku na vnější otáčkové charakteristice



Graf.8.15 Porovnání šířky pulsu vstřikovacího ventilu

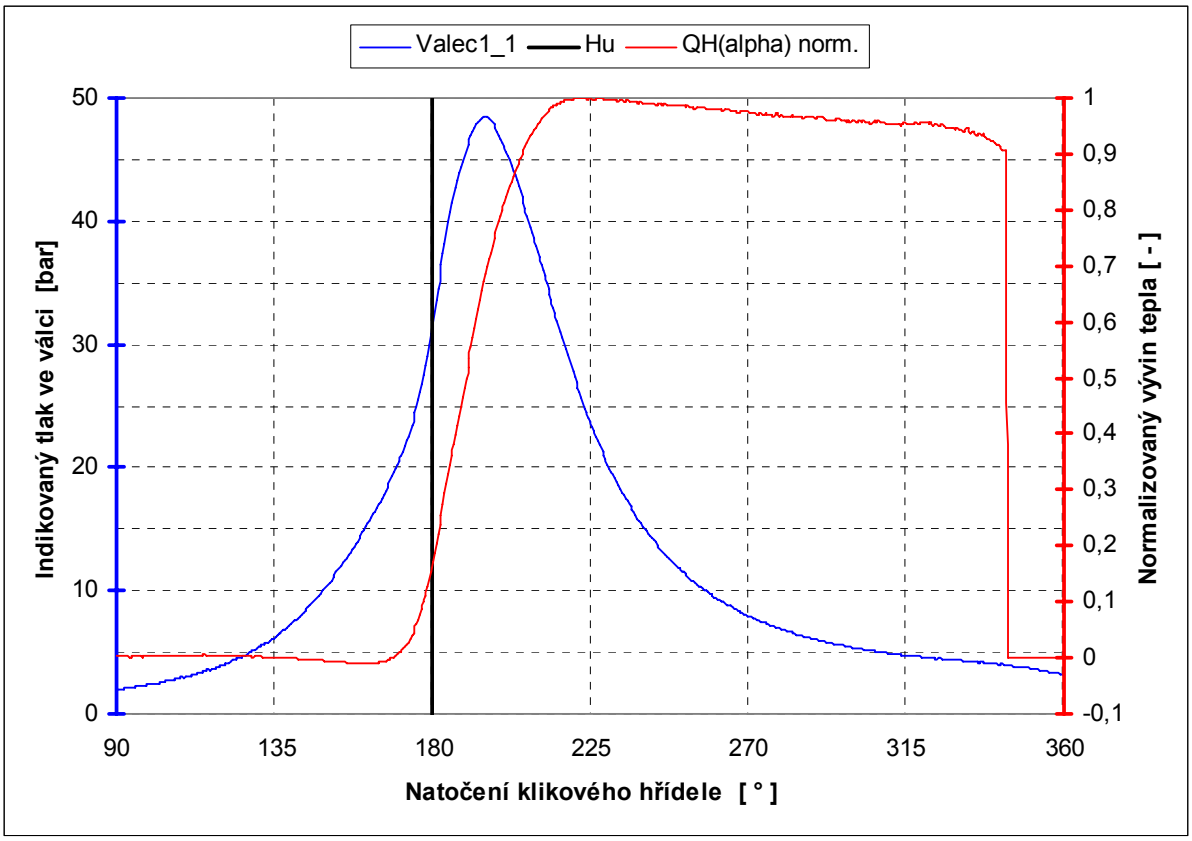
.

8.5 Návrh nejvhodnější metodiky měření a postupů při optimalizaci jednotlivých provozních režimů motoru

Na základě výsledků z jednotlivých měření, získaných poznatků a zkušeností, bylo při optimalizaci jednotlivých provozních režimů motoru postupováno následovně. Pomocí výpočtu a měření na sériovém motoru byly naprogramovány základní vstupní parametry pro ŘJ. Základní charakteristika pro řízení předstihu zážehu byla stanovena na základě získaných hodnot při měření na sériovém motoru, neboť charakteristika je značně proměnlivá a nelze ji popsat žádným výpočtovým postupem. Z výpočtu hodnot doby vstřiku byla stanovena a naprogramována základní palivová mapa. Dále hlavní korekční mapa, pro změnu dávky paliva v závislosti na teplotě vzduchu. Oproti výpočtu však byly hodnoty pozměněny pro teploty vzduchu nad 80°C a to směrem k obohacení směsi jako ochrana motoru před detonačním hořením. Korekční mapy v závislosti na teplotě vody bylo nutno stanovit experimentálně. Osvědčilo se nejprve nastavit tyto korekční mapy na nulové hodnoty, tak aby při samotné optimalizaci hlavních charakteristik nedocházelo do jejich zásahu. Neboť ladění hlavních map probíhá až po zahřátí na provozní teplotu a případný zásah korekce by při následné změně při dolaďování korekční charakteristiky zpětně pozměnil i hlavní charakteristiku. Tyto korekční mapy byly nastaveny až po naladění hlavních charakteristik a to na základě změny hodnoty lambda oproti požadované, která byla nastavena při zahřátém motoru v provozním stavu. Obdobně bylo postupováno při nastavení charakteristiky pro fázi startu. Pro fází startování byla hodnota předstihu nastavena pevně na 5° před HU. Pro nastartování motoru byla nejprve měněna základní dávka paliva, až do doby kdy se motor podařilo nastartovat. Toto se může stát poněkud zdlouhavější proces, protože nemáme ještě přesný údaj o složení směsi a při opakovaném startování a značně bohaté směsi potřebné pro nastartování, snadno dojde k ulití motoru. Jakmile motor naskočí, se jevilo jako nejvhodnější, ho nejprve zahřát do provozní teploty a poté nastavit přesně dobu vstřiku v základní mapě pro oblast startování. Jakmile motor spolehlivě startoval, tuto hodnotu jsme již neměnili a pouze se zvedala korekční hodnota obohacení pro nižší teploty motoru, tak aby šlo motor spolehlivě nastartovat. V další fázi proběhlo nastavení optimálních volnoběžných otáček. Zde byla nastavena hodnota λ na $\lambda = 1$. Předstih zde byl řízen automaticky pomocí regulace volnoběžných otáček. Pro optimalizaci hlavní charakteristiky předstihu zážehu a doby vstřiku se jevilo jako nejoptimálnější, nastavit zatížení do zvolené oblasti a postupně po zvolených krocích zvedat otáčky motoru směrem vzhůru. Pro oblasti provozních režimů motoru, kde se motor takřka nepohybuje, postačuje provést nastavení pouze v několika bodech a okolní oblast na základě těchto hodnot aproximovat. Při optimalizaci konkrétního bodu otáček a zatížení bylo postupováno následovně. Nejprve byla nastavena dávka paliva tak, aby složení směsi odpovídalo hodnotě λ 1. Poté jsme začali zvyšovat předstih, na hodnotu, při které bylo docíleno nelepších výkonových parametrů motoru, aniž by jsme překročili bezpečnou hranici klepání. Dále bylo provedeno nastavení bohatosti směsi, opět až do dosažení nejvhodnějších parametrů motoru a následně pro toto složení směsi byl doladěn optimální předstih zážehu. Tento postup se osvědčil jako nejvhodnější a byl stanoven na základě získaných poznatků z výsledku předešlých měření.

9 Indikace tlaků ve válci

Měření indikace tlaků ve válci bylo provedeno jednak z důvodu získání cenných dat pro další analýzu a vstupních hodnot do výpočtových modelů, ale z pohledu této práce bylo na výsledky nahlíženo především z hlediska včasného rozpoznání detonačního hoření. Nakonec se ukázalo, že pro tento účel je vhodné zobrazení průběhu nárůstu rychlosti tlaku ve válci. V níže uvedených grafech je pro ukázku z zobrazeno porovnání vybraných měřených bodů. Následující grafy odpovídají provoznímu režimu motoru 3000 ot/min a 50% otevření škrticí klapky.



Graf.9.1 Závislost průběhu tlaku ve válci a normalizovaného bezrozměrného vývinu tepla pro 3000 ot/min a 50% otevření ŠK při předstihu zážehu 30° před HU

Z grafu 9.1 kde je zobrazena závislost normalizovaného vývinu tepla QH(alpha) norm. je vidět rozdíl, ve skutečném počátku hoření a okamžiku, kdy ŘJ „dá povel“ pro přeskok jiskry. Ve skutečnosti tedy ŘJ „dá povel“ pro přeskok jiskry rozepnutím primárního obvodu zapalovací cívky, zde 30° před HU. V grafu 9.1 tento okamžik odpovídá 150° natočení klikového hřídele. Následuje prodleva přeskoku jiskry, což je doba od rozepnutí koncového stupně ŘJ, následného nárůstu vysokého napětí v sekundárním obvodu zapalovací cívky, které způsobí průraz „dielektrika“ mezi elektrodami svíčky, dané prostředí se ionizuje (stane se vodivé), a nastane hoření jiskry. Dále následuje průtah hoření, což je doba od přeskoku jiskry po skutečné zapálení směsi (tato doba je funkcí mnoha proměnných, jako např. složení směsi, teploty a tlaky v daném prostředí, energie jiskry atd.).

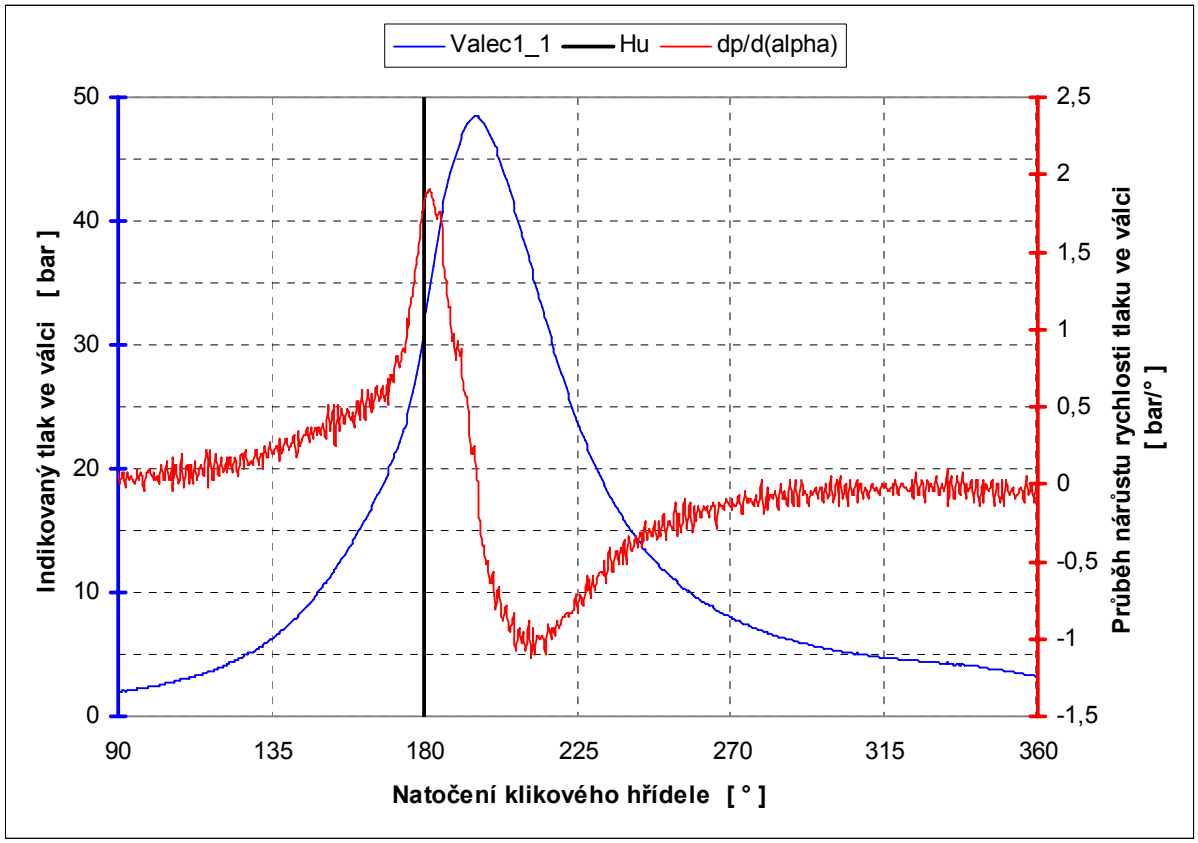
Po zapálení směsi začíná směs postupně prohořívat a nastává vývin tepla. Pro porovnání je v tab.9.1 uveden normalizovaný 2 % počátek vývinu tepla HR2 (hodnota 2 % počátku vývinu tepla je uvedena z důvodu nemožnosti určit zcela přesný počátek vývinu tepla vzhledem k velice pozvolným počátečným změnám). Při porovnání těchto dvou okamžiků je vidět, že ŘJ „dá povel" k přeskoku jiskry při 150° natočení KH a skutečný vývin tepla nastává až při 170° natočení KH. Z uvedeného grafu tedy vyplívají jistá fakta o skutečném chovaní, zažehnutí a průběhu hoření směsi uvnitř spalovacího prostoru.

Je zde nutno ovšem znovu připomenout, že zde neporovnáváme skutečný počátek vývinu tepla, ale jeho normalizovaný 2 % počátek HR2 a další skutečnost je také ta, že předstih 30° před HU udávaný ŘJ se vztahuje ke skutečné mechanické horní úvrati daného válce motoru a v grafech je zobrazena tzv. termodynamická horní úvrať. Termodynamická HU je odvozena z průběhu kompresního tlaku, kdy se tato zmíněná termodynamická HU nachází v poloze maximálního kompresního tlaku, což znamená, že je zde mírná odlišnost od mechanické HU, neboť maximální hodnota kompresního tlaku se ve skutečnosti nachází mírně za touto mechanickou HU, cca 2° až 5° pootočení KH.

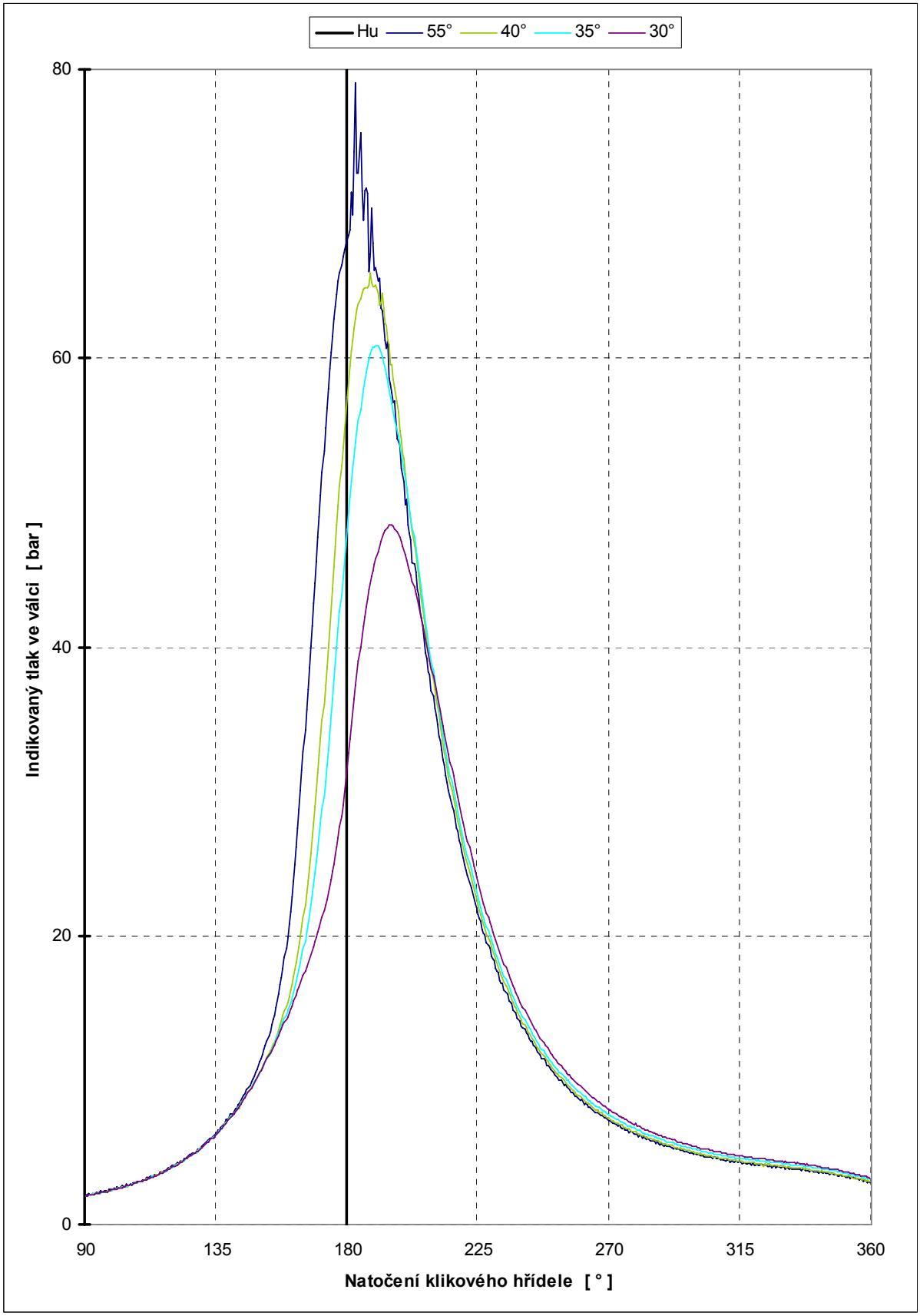
Na průběhu vývinu tepla lze také vypozorovat jeho pokles do záporných hodnot v určité oblasti před HU. Tento pokles je způsobený odvodem tepla stěnami spalovacího prostoru ve fázi, kdy při pohybu pístu do HU dochází k nárůstu tlaku tedy i teploty, ale ještě nedochází k vývinu tepla hořením paliva. Z grafu lze také vypozorovat pokles vývinu tepla v oblasti 225° natočení KH a dále, jenž je způsobem postupným vyhořívaním paliva. Při normálním průběhu vyhořívání náplně válce se tlakové maximum ve válci nachází v poloze cca 15° za HU a celková délka hoření se pohybuje v úhlu 50° až 90° pootočení KH za HU (důsledek variability průběhu hoření).

Jak již bylo zmíněno, z hlediska optimalizace provozních režimů motoru bylo na výsledky z indikace tlaků ve válci nahlíženo především z pohledu včasného odhalení detonačního hoření. Při měření však oproti původním předpokladům bylo zjištěno, že učebnicový příklad průběhu tlaku při detonačním hoření, nastává až při značně větším předstihu oproti optimálnímu, kdy již dochází k poměrně extrémnímu klepání motoru. Při bližším pohledu na graf 9.3 a 9.4 je vidět, že z průběhu tlaku při předstihu 35° před HU, kdy již docházelo k počátku detonačního hoření, což se již projevovalo „mírným“ klepáním motoru, nelze jakkoli tento počátek klepání rozpoznat.

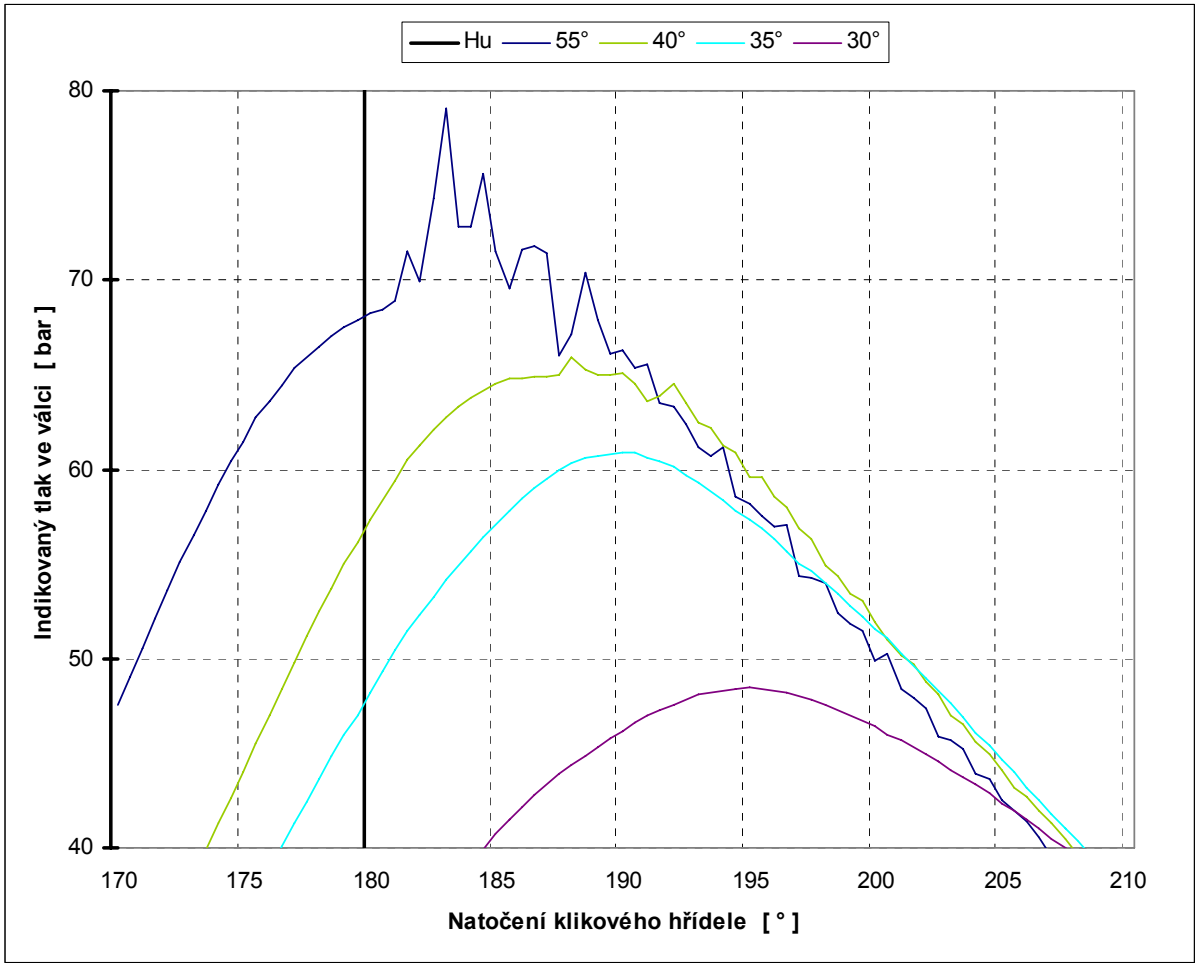
Znamenalo to tedy, pokusit se nalézt jiný způsob vyhodnocení měření indikace tlaků ve válci, kde by bylo toto klepání rozpoznatelné již v počátečních fázích. Po několika experimentech se osvědčilo vyhodnocovat klepání motoru nikoli z průběhu tlaku ve válci, ale z průběhu nárůstu jeho rychlosti. V grafech 9.5 až 9.8 je zobrazen tento průběh pro jednotlivé předstihy zážehu a dané grafy také odpovídají jednotlivým průběhům tlaků v grafech 9.3 a 9.4. Při bližším pohledu na grafy 9.5 až 9.8 lze rozpoznat detonační hoření projevující se rozkmitáním určitých oblastí tohoto průběhu. V grafu 9.6 je vidět samotný počátek klepání, kdy ještě dochází pouze k občasnému detonačnímu hoření. Toto klepání lze rozpoznat z výskytu špiček a rozkmitání některých oblastí průběhu amplitudy signálu.



Graf 9.2 Průběh tlaku ve válci a průběh nárůstu jeho rychlosti pro 3000 ot/min a 50% otevření ŠK při předstihu zážehu 30° před HU



Graf.9.3 Závislost průběhu tlaku ve válci na natočení KH pro jednotlivé předstihy zážehu při 3000 ot/min a 50% otevření ŠK

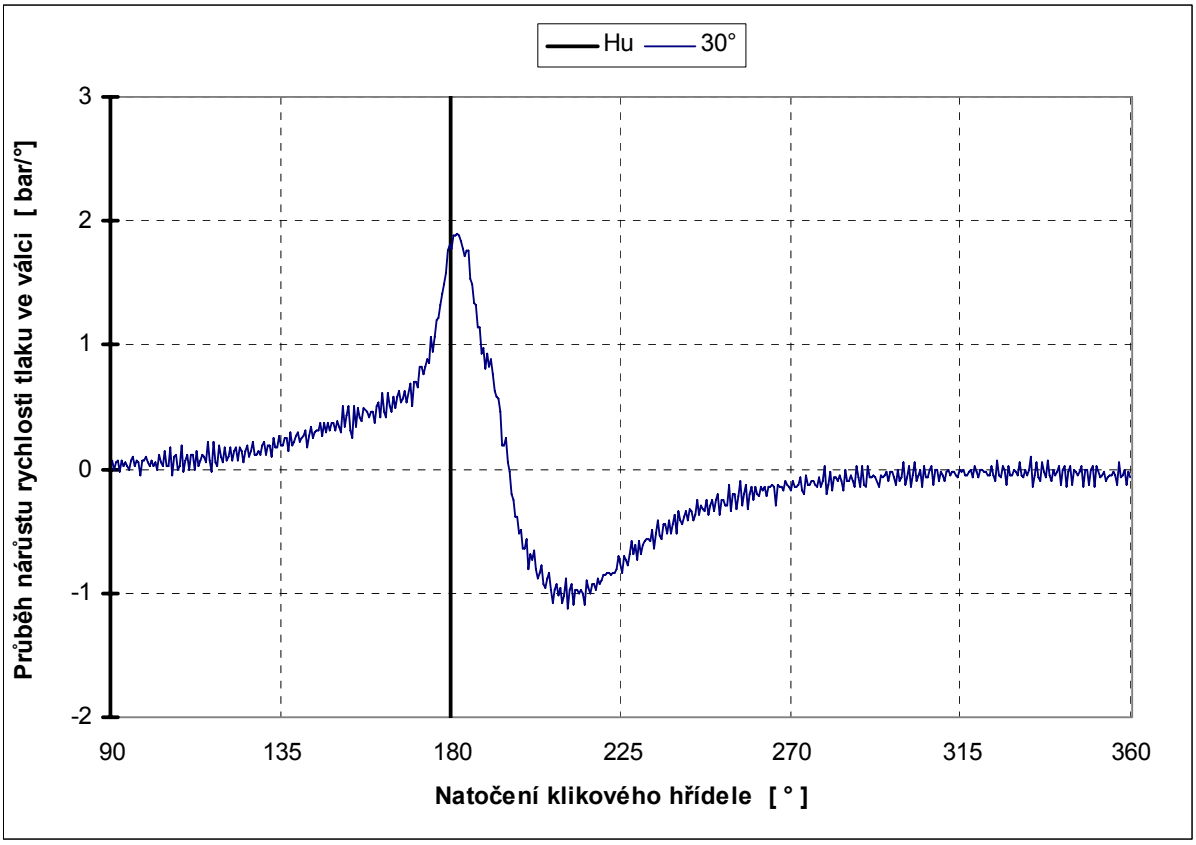


Graf 9.4 Závislost průběhu tlaku ve válci na natočení KH pro jednotlivé předstihy zážehu při 3000 ot/min a 50% otevření ŠK

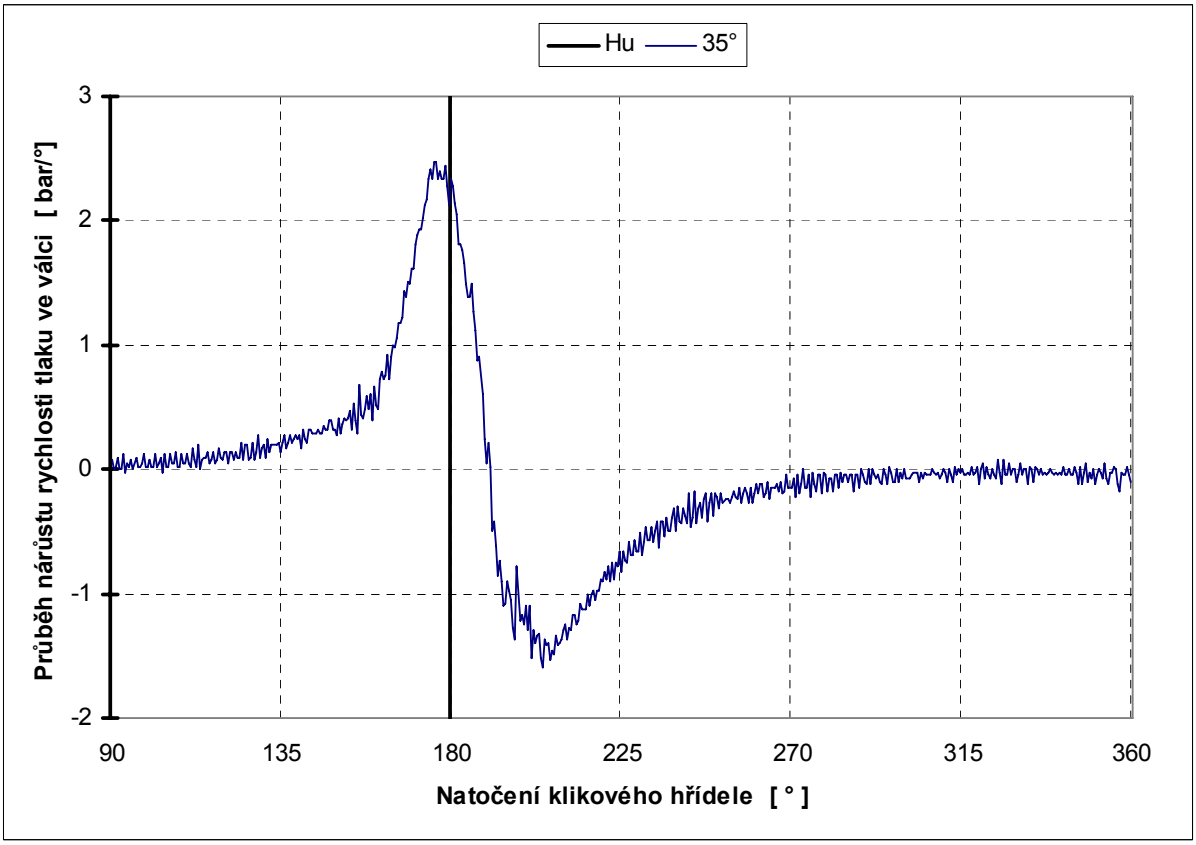
Předstih [°]	Pi 1 válce [kW]	pi [bar]	max P [bar]	HR2 [%]
30	10,17	8,19	48,441	170,48
35	10,18	8,21	66,88	166,63
40	10,03	8,08	65,917	162,11
55	8,64	6,96	79,092	150,33

Tab.9.1

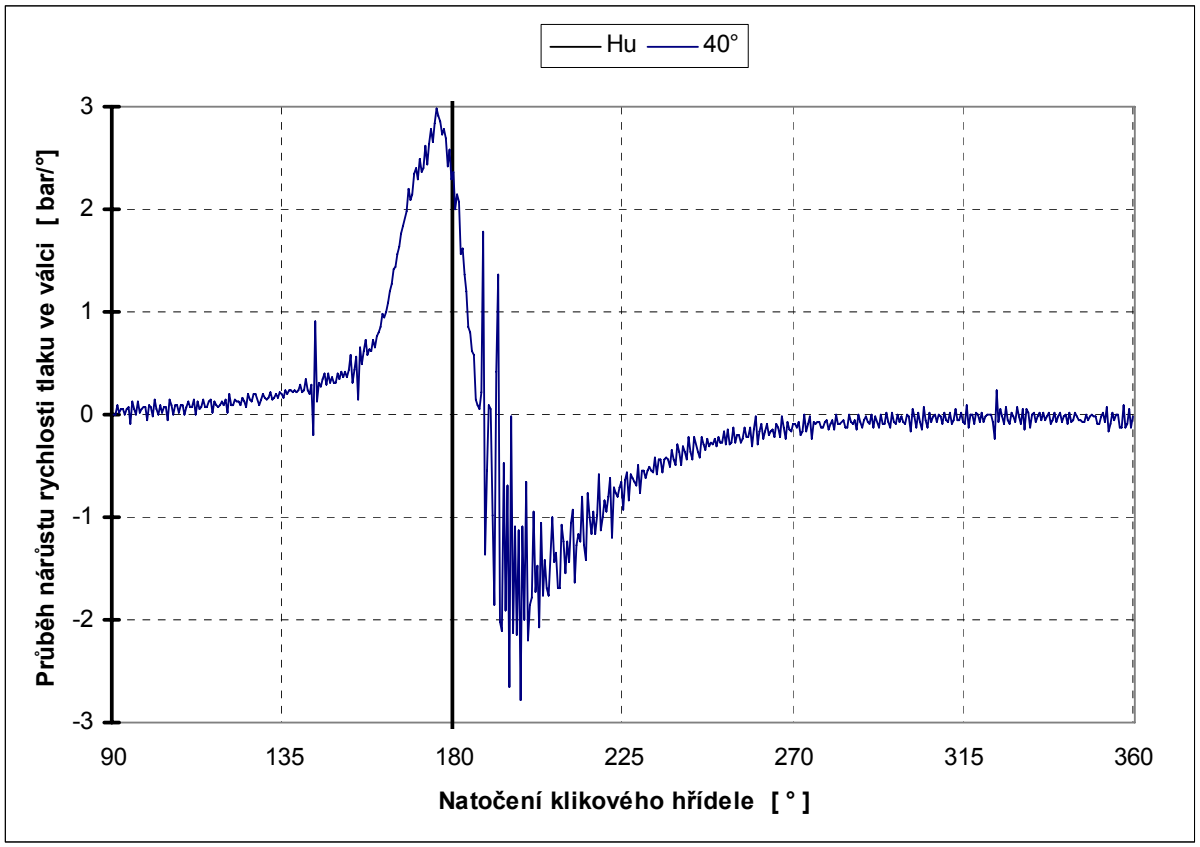
Z porovnání hodnot indikovaného výkonu Pi pro jeden válec je vidět, že nejoptimálnější z hlediska výkonu by byl předstih 35° před HU, ovšem dochází zde k počátku klepání motoru. Proto je výsledný nejoptimálnější předstih 30° před HU. Z hodnot maximálního tlaku je zřejmé, že při klepání dochází k špičkovým nárůstkům tlaků na velmi vysokou hodnotu, což má zásadní vliv na životnost motoru. Hodnoty indikovaného výkonu s rostoucím předstihem nad 35° před HU klesají neboť, narůstající tlak již značně působí proti pohybu pístu. To je také zřejmé při pohledu na graf 9.4. Naopak s předstihem klesajícím pod zmíněnou hodnotu výkon také klesá neboť, hodnota maximálního tlaku je později po HU, kdy se již zvětšuje objem spalovacího prostoru, což také znamená nižší hodnoty dosaženého spalovacího tlaku.



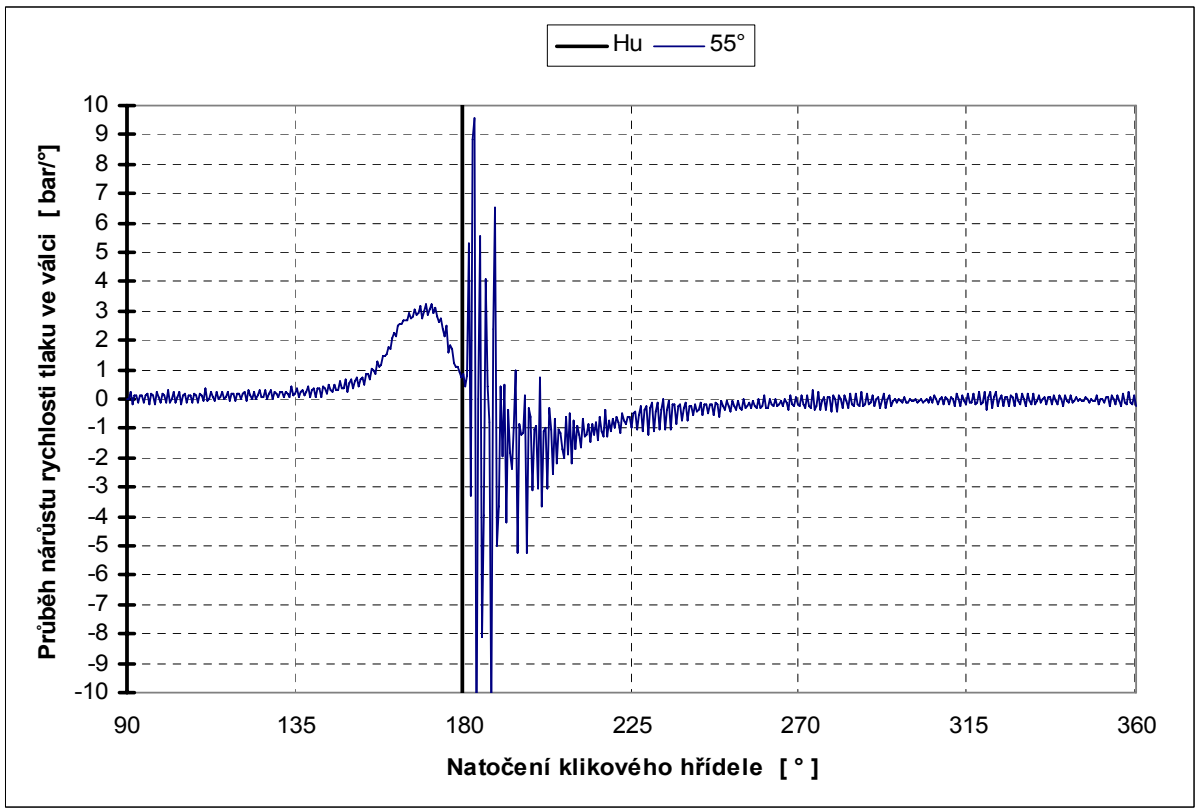
Graf.9.5 Průběh nárůstu rychlosti tlaku ve válci pro předstih 30° před HU - motor neklepe



Graf.9.6 Průběh nárůstu rychlosti tlaku ve válci pro předstih 35° před HU - počátek klepání



Graf.9.7 Průběh nárůstu rychlosti tlaku ve válci pro předstih 40° před HU - motor klepe



Graf.9.8 Průběh nárůstu rychlosti tlaku ve válci pro předstih 55° před HU - extrémní klepání

10 Závěr

Náplní této diplomové práce bylo provedení optimalizace jednotlivých provozních režimů motoru.

První část je zaměřena na pochopení a vysvětlení procesů spojených s řízením motoru pomocí elektronické řídicí jednotky. Byl proveden rozbor funkcí a požadavků kladených na současné elektronické řídicí jednotky spalovacích motorů. Zaměřil jsem zde svou pozornost na funkci jednotlivých snímačů, na jejich signály a jejich následné zpracování a vyhodnocení řídící jednotkou.

Dále byl proveden návrh a volba vhodných snímačů, na jejichž základě byla vyrobena kompletní kabeláž, která byla poté s příslušnými snímači a programovatelnou ŘJ osazena na motor.

Pro měření byly sestaveny měřicí řetězce, které byly dále optimalizovány do konečné podoby nejvhodnější pro zvolená měření viz. kap. 6.

Byla provedena řada měření, kterými byly zjištěny příslušné závislosti chování motoru, na nastavení bohatosti směsi a předstihu zážehu, na jejichž základě byla poté provedena optimalizace jednotlivých provozních režimů motoru.

Na základě výpočtu byly stanoveny základní vstupní údaje pro programovatelnou řídící jednotku. Tímto výpočtem lze současně velice efektivně ověřit správnou volbu velikosti vstřikovacích ventilů, již před provedením jakéhokoli měření. Výsledná vypočítaná maximální doba otevření vstřikovacího ventilu byla spočtena v procentuálním vyjádření na 60,5%. Při porovnání oproti optimalizované hodnotě, která činila 58,1 % je rozdíl výsledků pouhých 2,4%, což je velice přijatelná hodnota. Je zde ovšem třeba upozornit na fakt, že tyto hodnoty vycházejí z hodnot plnicí účinnosti takřka shodného motoru a pro další aplikace se bude s narůstající odlišností jednotlivých motorů i zvětšovat výsledná chyba výpočtu. Ovšem při zohlednění těchto faktů, i s mírně vyšší chybou lze tyto údaje s výhodou použít pro prvotní základní nastavení ŘJ.

Dále je nutno podotknout, že při sestavování měřícího řetězce byla dané problematice věnována velká pozornost. Byl kladen velký důraz na splnění všech předem stanovených požadavků. Vzhledem k značnému objemu zaznamenávaných dat, byla sestavena metodika pro měření a byl důkladně promyšlen a zvolen nejoptimálnější způsob záznamu dat, tak aby bylo možno všechna získaná data následně efektivně a přehledně analyzovat.

Na základě získaných poznatků a zkušeností byla sestavena nejvhodnější metodika a řada postupů, které byly s úspěchem aplikovány při optimalizaci a naladění jednotlivých provozních režimů motoru viz. kap.8.5.

Při porovnání výsledků výkonových parametrů motoru, které jsou více než optimistické jsem došel k závěru, že mnou stanovená metodika a jednotlivé postupy aplikované při této optimalizaci byly zvoleny správně. Mnou získané zkušenosti a poznatky prezentované v této práci lze s výhodou použít i pro další podobná měření a aplikace. Při pohledu na grafy.8.10 a 8.11 je vidět, že došlo k nárůstu maximálního výkonu a točivého momentu, který činil ve 4500 ot/min 1,5 kW, což znamená zlepšení téměř o 5% oproti původnímu výkonu motoru. Především však došlo k vyladění celého průběhu výkonových parametrů motoru, kdy bylo dosaženo ve 3000 ot/min nárůstku výkonu takřka o 4,5 kW ,což je v procentuálním vyjádření nárůst výkonu oproti původní hodnotě o úctihodných 15%. Je třeba také ovšem podotknout, že v oblasti 1500 ot/min došlo k mírnému propadu výkonu, na který by se chtělo dále ještě zaměřit. Je zde také ale i fakt, že v této oblasti je již tak malá hodnota měřeného výkonu, že případná chyba může být do měření vnesena i mírným zakolísáním hodnot, které je jinak při měření ještě přípustné. Z průběhu výkonu v oblastech od 2000 do 3000 Ot/min je vidět, že původních hodnot bylo dosaženo i po optimalizaci. Z toho lze usoudit, že měřený motor v této oblasti již neměl žádné výkonové rezervy a původní hodnoty byly také pro motor nejoptimálnější.

V rámci této diplomové práce jsem se zabýval chováním výkonových parametrů motoru v závislosti na nastavení bohatosti směsi a předstihu zážehu, z čehož byly odvozeny a naladěny optimální hodnoty pro nejvyšší výkonové parametry motoru, což bylo podstatou zadání této diplomové práce, které bylo splněno v celém rozsahu.

V další fázi by bylo vodné zabývat se závislostmi změny jednotlivých parametrů při řízení směsi a předstihu zážehu na složení výfukových plynů a na základě získaných poznatků provést naladění motoru také s ohledem na životní prostření.

Bylo by tedy vhodné vypsat další diplomovou práci na téma optimalizace jednotlivých parametrů motoru vzhledem k optimálnímu složení výfukových plynů. Neboť v rámci jedné diplomové práce nebylo možné pojmout kompletně takto rozsáhlou problematiku, jakou samotná optimalizace provozních režimů motoru bezesporu je. Bylo by tedy přínosné, pokračovat dále v této rozsáhlé oblasti vývoje spalovacích motorů, zhodnotit tak mnou získané poznatky a zkušenosti a dále je rozšířit.

Na základe experimentálního měření byly také získány jednotlivé data průběhu indikovaného tlaku, který nyní může sloužit jednak k další analýze, ale také především jako vstupní údaje do výpočtového modelu.

Bylo by tedy velice zajímavé použít tyto získané data z indikace tlaků ve válci na sestavení výpočtového modelu v některém ze simulačních software jako např. Lotus Engine Simulation nebo GT Power a tento model následně porovnat z reálnými parametry motoru. Dále by pomocí takto sestaveného modelu, mohly být prováděny případné konstrukční změny a na základě jednotlivých simulací by tyto změny mohly být dále optimalizovány. Tato problematika by tedy byla také velice zajímavým a přínosným tématem pro vypsání další diplomové práce.

Seznam použitích zdrojů

[1] VLK,F. Zkoušení a diagnostika motorových vozidel. ISBN 80-234-6573-0, Nakladatelství VLK, Brno 2000.

[2] McBEATH, S. Competition Car Data Logging. ISBN 1-85960-653-9. Haynes Publishing, UK 2003.

[3] ŠŤERBA,P. Elektrotechnika a elektronika automobilů. ISBN 80-251-0211-4, Computer Press, Brno 2004.

[4] STODOLA, J. : Sylaby k přednáškám, Diagnostika motorových vozidel. Brno, 2003

[5] Technická příručka BOSCH: 1 987 711 036, Management zážehového motoru

[6] Technická příručka BOSCH: 1 987 711 038, Snímače v motorových vozidlech

[7] Databáze BOSCH ESI-tronic v.2008/2

[8] ECU K3 Operating manual v.5

[9] Časopis Autoexpert [online]. Poslední revize 10.2 2008.
Dostupné na http://www.autopress.cz/diagnostika-merenim-fyzikalnich-velicin/

[10] Bosch automobilová diagnostika [online]. Poslední revize 25.4 2008.
Dostupné nahttp://aa.bosch.cz/Automobilova-diagnostika

[11] Bosch řízení motoru info [online]. Poslední revize 25.4.2008.
Dostupné na http://www.bosch.cz/

[12] Měřící technika [online]. Poslední revize 31.4 2008
Dostupné na http://www.kistler.com/do.content.ch.de-ch?content=KistlerCountryHome_KCH

[13] Automobilová diagnostika [online]. Poslední revize 9.10.2007.
Dostupné na http://www.picotech.com/automative

[14] Měřící technika pro širokopásmovou lambda sondu [online]. Poslední revize 2.4.2008.
Dostupné na http://www.wbo2.com/3a1/default.htm

Seznam použitých zkratek a symbolů

C	[mol/kg]	molární množství uklíku v palivu
D	[m]	vrtání
DU	[-]	dolní úvrať motoru
dp/d(alpha)	[bar]	zrychlení tlaku ve válci
Flow	[kg/s]	průtok vstřikovacím ventilem
H	[mol/kg]	molární množství vodíku v palivu
HR2	[%]	normalizovaný 2 % počátek vývinu tepla
H_m	[m]	zdvih
HU	[-]	horní úvrať motoru
KH	[-]	klikový hřídel
l	[m]	délka ojnice
max P	[kW]	maximální indikovaný tlak
max P KH	[°]	natočení klikového hřídele při max P
M_{cs}	[kg/s]	spotřeba celého motoru za 1s
M_{Lt}	[mol/kg]	molární množství vzduchu připadající na 1kg paliva
M_{m1ot}	[kg]	spotřeba motoru za 1 ot. KH.
MT ISO	[Nm]	kroutící moment motoru ISO
M_{v1vot}	[kg]	spotřeba 1 válce za 1 to. KH.
M_{vzd}	[kg/kmol]	molární hmotnost vzduchu
M_Z	[kg/s]	spalovací hmotnostní tok motorem
M_{Zspec}	[kg]	specifická efektivní spotřeba vzduchu
n_v	[-]	počet válců
O	[mol/kg]	molární množství kyslíku v palivu
Pe ISO	[kW]	efektivní výkon ISO
Pe ISO max	[kW]	nejvyšší naměřený výkon
Pi 1.V	[kW]	indikovaný výkon 1. válce
pi	[bar]	střední indikovaný tlak
Předstih P max	[°]	předstih při Pe ISO max
p_{pl}	[kPa]	plnicí atmosférický tlak vzduchu
QH(alpha) norm.	[-]	normalizovaný vývin tepla
R	[J/K·kmol]	univerzální plynová konstanta
r	[J/kg·K]	plynová konstanta vzduch
r_k	[m]	rameno kliky
ŘJ	[-]	řídící jednotka motoru
S	[mol/kg]	molární množství síry v palivu
ŠK	[-]	škrtící klapka
T_c	[°C]	teplota okolí
T_{pl}	[K]	teplota plnícího vzduchu
T_{vzd}	[K]	teplota vzduchu
t_n	[s]	doba 1otáčky
V_C	[m^3]	kompresní objem
V_{cmot}	[m^3]	celkový objem motoru
V_H	[m^3]	zdvihový objem válce
V_M	[m^3]	celkový objem válce
V_{mot}	[m^3]	zdvihový objem motoru

x	[s]	doba vstřiku
ε	[-]	kompresní poměr
κ	[-]	exponent isoentropy vzduchu
λ	[-]	součinitel přebytku vzduchu
λ_k	[-]	klikový poměr
λ_Z	[-]	zvolený součinitel přebytku vzduchu
μ_{pl}	[%]	plnící účinnost
ρ_{pl}	[kg/m^3]	hustota plnícího vzduchu
ρ_{vzd}	[kg/m^3]	hustota vzduchu
σ_{sk}	[-]	skutečný směšovací poměr
σ_t	[-]	teoretický směšovací poměr
τ	[-]	otáčkový činitel pro 4-dobý motor

Seznam příloh

Příloha 1: Tabulky naměřených a vypočtených hodnot

Příloha 2: CD-ROM s diplomovou prací

Příloha 1: Tabulky naměřených a vypočtených hodnot

Pozn. **-** pro snadnou orientaci se označení tabulek shoduje s odpovídajícími grafy.

Otáčky[1/min]	Předstih [°]	Doba vstřiku [ms]	Klapka [%]
1500	10,5	13,4	100
2000	14,3	14,4	
2500	14,3	15,5	
3000	18	16,5	
3500	21	17,5	
4000	21	18,5	
4500	22,5	18,5	
1500	10,5	13,4	80
2000	13,5	14,4	
2500	13,5	14,4	
3000	18	16,5	
3500	21	16,5	
4000	21	17,5	
4500	21,8	18,5	
1500	10,5	13,4	60
2000	15,5	13,4	
2500	13,5	14,4	
3000	18,8	15,5	
3500	22,5	14,4	
4000	22,5	14,4	
4500	25,5	13,4	
1500	10,5	14,4	55
2000	14,3	14,4	
2500	15,8	13,4	
3000	23,3	12,4	
3500	25,5	13,4	
4000	27	12,4	
4500	29,3	11,3	
1500	10,5	13,4	50
2000	15,8	13,4	
2500	20,3	12,4	
3000	27	10,3	
3500	30	9,3	
4000	31,5	9,3	
4500	33,8	9,3	
1500	11,3	13,4	45
2000	19,5	11,3	
2500	27	9,3	
3000	33	8,2	
3500	36	7,2	
4000	37,5	6,2	
4500	39,8	6,2	

Otáčky[1/min]	Předstih [°]	Doba vstřiku [ms]	Klapka [%]
1500	19,5	9,3	35
2000	33,8	7,2	
2500	40,5	5,2	
3000	42,8	4,1	
3500	43,5	4,1	
4000	42,8	4,1	
4500	41,3	4,1	
1500	30	6,2	30
2000	40,5	3,1	
2500	37,5	3,5	
3000			
3500			
4000			
4500			
1500	31,5	5,2	25
2000	33	3,1	
2500			
3000			
3500			
4000			
4500			

Tab.7.1-7.4

Otáčky [1/min]	KLAPKA [%]	T_VODVY [°C]	P_ISO [kW]	MT_ISO [Nm]
1500	100	78,2	10,56	67,2
2000	100	78,9	14,67	70
2500	100	82	20,11	76,8
3000	100	81,1	24,07	76,6
3500	100	83,4	25,57	69,8
4000	100	81,8	29,3	70
4500	100	81,7	33,91	72
1500	79,8	82,2	10,07	64,1
2000	79,8	85,8	13,56	64,7
2500	79,8	91,3	18,76	71,6
3000	79,8	90,3	22,48	71,5
3500	79,8	70,9	26,18	71,4
4000	79,8	82,1	29,14	69,6
4500	79,8	86,3	33,92	72
1500	60,1	80,2	10,09	64,3
2000	60,1	80,9	14,26	68,1
2500	60,1	90,9	17,62	67,3
3000	60,1	78,3	21,21	67,5
3500	60,1	80,7	23,52	64,2
4000	60,1	81,1	24,68	58,9
4500	60,1	84,2	27,02	57,3
1500	55	68,2	10,6	67,2
2000	55	78,9	14,4	69,4
2500	55	82	17,5	68,8
3000	55	81,3	17,6	56,7
3500	55	83,4	18,4	51,9
4000	55	82,8	20,5	49,2
4500	55	80,7	22,3	47,4
1500	50	78,1	9,7	62,1
2000	50	85,8	12,1	59,4
2500	50	91,3	15,2	59,1
3000	50	90,1	15,9	52,3
3500	50	71,9	17,9	49,5
4000	50	82,1	18,9	45,7
4500	50	87	18,3	38,4
1500	45	82,3	9,3	59,1
2000	45	78,2	11,2	55,5
2500	45	90,9	129	49,8
3000	45	78,3	14,7	46,8
3500	45	80,7	14,8	40,1
4000	45	81,3	10,4	27,7
4500	45	84,2	10,8	23,3
3500	35	77,6	7,1	19,9
4000	35	85,2	7,2	17,4
4500	35	88,2	6,9	15,2
1500	30	76,2	6,11	39,5
2000	30	88,2	4,2	21,2
3000	30	75,2	3,5	13,4

Tab.7.5-7.6

Předstih [°]	Doba vstřiku [ms]	Teplota vody [°C]	Číslo měření
4,5	28,8	21	1
4,5	24,7	28,5	2
4,5	21,6	28,5	3
4,5	20,6	28,5	4
3,8	25,8	40,5	5
3,8	22,7	40,5	6
3,8	23,7	51	7
3,8	19,6	51	8
3,8	17,5	60	9
3,8	15,5	60	10
3	16,5	70,5	11
3	14,4	70,5	12
3	13,4	70,5	13
3	13,4	81	14
3	12,4	81	15
3	10,3	90	16

Tab.7.7

Teplota[°C]	doba vstřiku[ms]
-10	33,565
0	31,279
10	28,993
20	26,707
30	24,421
40	22,135
50	19,849
60	17,563
70	15,277
80	15,1
90	15,1
100	15,1
110	15,1
120	15,1

Tab.7.8

Otáčky [1/min]	Předstih [°]	Doba vstřiku [ms]	Teplota vody [°C]
1216	-12,8	9,3	21
1120	-8,3	7,2	24
1120	-6,8	7,2	25,5
1120	-9	6,2	33
1056	-9	6,2	36
1024	-9	6,2	37,5
1024	-9	6,2	40,5
992	-10,5	6,2	43,5
928	7,5	4,1	48
928	6,8	4,1	49,5
928	7,5	4,1	55,5
928	8,3	4,1	57
928	9	4,1	58,5
928	7,5	4,4	67,5
928	7,5	4,1	73,5
928	75	4,1	75
928	8,3	4,1	79,5
928	8,3	4,1	81
928	7,5	4,1	82,5
928	7,5	3,1	85,5
928	6,8	3,1	87
928	7,5	3,1	88,5
928	9	3,1	90
928	7,5	3,1	91,5
928	7,5	3,1	93
928	7,5	3,1	94,5
928	7,5	3,1	96

Tab.7.9-7.10

Tab.7.11 je obsažena v **Tab.7.8 a 7.9-7.10**

Teplota [°C]	Doba vstřiku start [ms]	Doba vstřiku volnoběh [ms]	Obohac. start [%]	Obohac. volnob. [%]
-10	33,565	13,3271	213,5451	284,3875
0	31,279	11,4411	192,1906	229,9905
10	28,993	9,7551	170,8361	181,3619
20	26,707	8,2691	149,4816	138,5019
30	24,421	6,9831	128,127	101,4104
40	22,135	5,8971	106,7725	70,08739
50	19,849	5,0111	85,41803	44,53289
60	17,563	4,3251	64,06352	24,74691
70	15,277	3,8391	42,70901	10,72943
80	12,991	3,5531	21,35451	2,480459
90	10,705	3,4671	0	0
100	8,419	3,5811	0	3,288051
110	6,133	3,8951	0	12,34461
120	3,847	4,4091	0	27,16968

Tab.7.12-7.13

Lambda 1,2			
Předstih [°]	Hranice klepani	PeISO [kW]	MT_ISO [Nm]
19		15,8	50,6
22		17,2	55
25		18,3	57,6
30		19,3	61,3
35		19,7	62,4
38	ok-max	19,9	63
45	k	22,2	64
48	k	20	64,1

Tab.8.4

Lambda 1			
Předstih [°]	Hranice klepani	PeISO [kW]	MT_ISO [Nm]
20		22,1	70,5
25		23,1	73,7
27		23,5	74,9
30		23,62	75,2
32	ok-max	23,61	75,2
35	k	23,52	74,9

Tab.8.5

Lambda 0,9			
Předstih [°]	Hranice klepani	PeISO [kW]	MT_ISO [Nm]
22		22,9	72,8
27		23,01	73,4
30		23,3	74,1
32	ok-max	23,36	74,4
35	k	23,08	73,3
37	k	22,8	72,4

Tab.8.6

Lambda 0,84			
Předstih [°]	Hranice klepani	PeISO [kW]	MT_ISO [Nm]
27		23,12	73,2
30		23,2	73,6
32		23,2	73,8
35	ok-max	23,1	73,8
38	k	22,82	72,5
40	k	21,4	71,3

Tab.8.7

Lambda 0,8			
Předstih [°]	Hranice klepani	PeISO [kW]	MT_ISO [Nm]
20		22,08	70,1
25		22,7	72,3
27		22,8	72,6
30		23,2	73,2
35		23,19	73,7
38	ok-max	22,8	72,5
40	k	22,7	72,3
45	k	22,1	70,5

Tab.8.8

Předstih 30 [°]		
Lambda	Pe ISO [kW]	MT_ISO [Nm]
1,2	19,3	63
1	23,62	75,5
0,9	23,32	74,1
0,84	23,2	73,2
0,8	23,2	73,2

Tab.8.9

Lambda	PeISO max [kW]	Předstih Pmax [°]	Hranice klepání [°]
1,2	22,2	45	38
1	23,62	30	32
0,9	23,36	32	32
0,84	23,2	32	32
0,8	23,2	30	38

Tab.8.10