

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Univerzitní studijní programy

Detonační spalování zážehového motoru – prostředky a
pokročilá analýza
Detonation Combustion of Gasoline Engine - Means and
Advanced Analysis

Študent:

Tomáš Harach

Vedúci bakalárskej práce:

Ing. Petr Šimoník, Ph.D.

Ostrava 2015

Zadání bakalářské práce

Student: **Tomáš Harach**
Studijní program: B3943 Mechatronika
Studijní obor: 3906R007 Automobilová elektronika
Téma: **Detonační spalování zážehového motoru – prostředky a pokročilá
analýza
Detonation Combustion of Gasoline Engine - Means and Advanced
Analysis**

Zásady pro vypracování:

1. Teoreticky rozeberte vytipovaný elektronický systém řízení zážehového motoru s integrovanou elektronickou regulací klepání. Podrobně se zabývejte řídicími a regulačními procesy pro potlačení klepání motoru.
2. Dle instrukcí vedoucího bakalářské práce, s využitím dynamické válcové zkušebny, detailně analyzujte chování motoru při běžném provozu i krizových stavech klepání. Na základě výsledku teoretického studia a praktických analýz zpracujte podrobnou teorii ke zkoumané problematice.
3. Dle pokynů vedoucího bakalářské práce vypracujte typizovanou laboratorní úlohu z oblasti řešené problematiky.

Seznam doporučené odborné literatury:

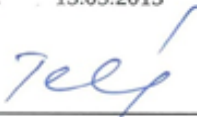
- [1] ERJAVEC, J.: Automotive Technology: A Systems Approach, 4th Edition, USA 2004, Thomson Learning, 1401 p., ISBN 1-4018-4831-1
- [2] RIBBENS, B., W.: Understanding Automotive Electronics, Sixth Edition, USA 2003, Elsevier Science, 480 p., ISBN 0-7506-7599-3
- [3] DENTOM, T.: Automotive Technology: Advanced Automotive Fault Diagnosis, 2th Edition, USA 2004, Butterworth-Heinemann Ltd. 2006, 288 p., ISBN 0-7506-6991-8
- [4] Robert Bosch GmbH: Bosch Yellow Jackets Series, Bosch Technical Literature, 1996-2014
- [5] Stockel, W., M., Stockel, T., M., Johanson, Ch.: Auto Diagnosis, Service, and Repair, 7th Edition, Goodheart-Willcox, USA 2003, 1024 p., ISBN 978-1566379106
- [6] Dentom, T.: Automotive Technology: Advanced Automotive Fault Diagnosis, 2th Edition, USA 2004, Butterworth-Heinemann Ltd. 2006, 288 p., ISBN 0-7506-6991-8

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Šimoník, Ph.D.**

Datum zadání: 20.10.2014

Datum odevzdání: 15.05.2015


doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Petr Noskivič, CSc.
prorektor pro studium

Miestoprísazné prehlásenie

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne pod vedením Ing. Petra Šimoníka, Ph.D. a uviedol som všetky zdroje a publikácia z ktorých som preberal informácie.

V Ostrave dňa:

.....

Podpis študenta

Prehlasujem že,

- Som bol zoznámený s tým, že na moju bakalársku prácu sa plne vzťahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, najmä § 35 – užitie diela v rámci občianskych a náboženských obradov, v rámci školských predstavení a užitie diela školného a § 60 – školné dielo.
- beriem na vedomie, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (ďalej jen „VŠB-TUO“) má právo použiť túto bakalársku prácu ku svojej vnútornej potrebe (§ 35 odst. 3).
- súhlasím s tým, že bakalárska práca bude v elektronické podobe uložená v Ústrední knihovně VŠB-TUO k nahliadnutiu a jeden výtlačok bude uložený u vedúceho bakalárskej práce. Súhlasím s tým, že údaje o kvalifikační práci budú zverejnené v informačnom systéme VŠB-TUO.
- bolo zjednané, že s VŠB-TUO, v prípade záujmu z jej strany, uzavriem licenční zmluvu s oprávnením užiť dielo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bolo zjednané, že užiť svoje dielo – bakalársku prácu alebo poskytnúť licenciu k jej využitiu môžem len so súhlasom VŠB-TUO, ktorá je oprávnená v takom prípade od mňa požadovať primeraný príspevok na úhradu nákladov, ktoré boli VŠB-TUO na vytvorenie diela vynaložené (až do ich skutočnej výšky).
- beriem na vedomie, že odovzdaním svojej práce súhlasím so zverejnením svojej práce podľa zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o zmene a doplnení ďalších zákonov (zákon o vysokých školách), v znení neskorších predpisov, bez ohľadu na výsledok ich obhajoby.

V Ostrave dňa:

.....

podpis

Meno a priezvisko autora bakalárskej práce: Tomáš Harach

Adresa trvalého pobytu autora bakalárskej práce: Karpatská 9A, 01008 Žilina, Slovensko

Pod'akovanie

Rád by som sa pod'akoval vedúcemu bakalárskej práce Ing. Petrovi Šimoníkovi Ph.D. za čas venovaný tejto práci, pomoc pri meraniach, cenné rady a názory a Ing. Radimovi Čechovi za cenné rady a ochotu, ktoré mi pomohli lepšie pochopiť detonačné spaľovanie.

Abstrakt

Táto bakalárska práca sa zaoberá podrobným rozborom systému pre potlačenie klepania v zážihových motoroch. V prvej časti je daný systém rozobraný teoreticky. Ďalšia časť sa zaoberá mapovaním predstihu za bežných prevádzkových podmienok. V tretej časti sú simulované rôzne podmienky pre vznik detonácií. Poslednou časťou praktických meraní je sledovanie zmien hodnôt konkrétnych plynov v emisiách. Výsledky sú zhodnotené v závere.

Kľúčové slová

Detonačné spaľovanie, klepanie, predstih, mapa predstihu, regulácia predstihu, zážihové motory.

Abstract

This bachelor thesis deals with a detailed analysis of the system which eliminates knocking in petrol engines. In the first chapter is the system described theoretically. The next part deals with mapping spark advance under normal operating conditions. In the third part there are simulated different conditions for the formation of detonations. The last part of practical measurements looks at changes in levels of specific gases in the emissions. The results are evaluated at the end.

Key words

Engine knocking, knocking, advance, advance map, ignition timing, spark ignition engines.

Zoznam symbolov a značiek

p_{atm}	Atmosférický tlak [mbar]
T_{val}	Teplota [°C] v pracovnom priestore motoru
p_{abs}	Absolútny tlak [mbar]
NTC	negative temperature coefficient (negatívny teplotný koeficient)
$H_{\text{preds.}}$	Celková hodnota predstihu [°]
$H_{\text{zákl.}}$	Základná hodnota predstihu [°]
$H_{\text{tepl.}}$	Hodnota korekcie predstihu vzhľadom na teplotu motoru [°]
$H_{\text{tepl.2}}$	Hodnota korekcie predstihu vzhľadom na teplotu nasávaného vzduchu [°]
H_{klep}	Hodnota korekcie predstihu vzhľadom na spätnú väzbu zo snímača klepania [°]
HÚ	Horná úvrat' motoru
DÚ	Dolná úvrat' motoru
HC	Uhl'ovodíky
CO	Oxid uhoľnatý
NO _x	Oxidy dusíku
H ₂ O	Voda
CO ₂	Oxid uhličitý
N ₂	Dusík
RAM	Random acces memory (pamäť s náhodným prístupom)
MCU	Multipoint control unit (riadiaca jednotka)
CAN	Controller area network (lokálna riadiaca sieť)
LIN	Local interconnect network (lokálna prepojovacia sieť)

Obsah

1. Úvod.....	9
1.1 Regulácia predstihu.....	11
2. Detekcia detonačného spaľovania	16
2.1 Spätný posun uhlu zážihu	20
3. Korekcie predstihu.....	22
3.1 Korekcie predstihu pre rôzne valce	24
4. Analýza v bežnej prevádzke	26
4.1 Priradenie absolútneho tlaku v saní hodnote zaťaženia.....	29
5. Analýza v podmienkach klepaniu prospievajúcich	30
6. Analýza v podmienkach potlačujúcich klepanie	34
7. Analýza emisií	37
8. Záver	40
9. Zoznam použitej literatúry a zdrojov	42
10. Zoznam príloh.....	43

1.Úvod

Detonačné spaľovanie je nežiadúci jav, vyskytujúci sa u zážihových motorov. Pre plynulý chod motoru a vyššiu životnosť jeho komponentov, je potrebné tento jav eliminovať v čo najväčšej miere. Dlhodobé vystavenie motorových komponentov detonačnému spaľovaniu môže mať za následok mechanické zlyhanie kľukového ústrojenstva, poškodenie piestov motoru, prasknutie hlavy valcov a podobne (obr.1). Motor, v ktorom dochádza k detonáciám má vyššie hodnoty nespálených uhľovodíkov a oxidu uhoľnatého, čo je pri moderných pohonných jednotkách nežiadúce.



Obr. 1 - Příklad poškodenia piestu detonačným spaľovaním

Aby nedošlo k detonáciám v spaľovacom priestore motoru, je potrebné stanoviť správny okamih zážihu zmesi paliva a vzduchu zapalovacou sviečkou. Pri správnom okamihu zážihu zmesi sa sila vytvorená horením zmesi, ktorá pôsobí na piest počas expanzného zdvihu, prenesie na kľukové ústrojenstvo postupne. Vtedy je kľukové ústrojenstvo motoru namáhané správnym spôsobom a taktiež dôjde k dobrému prehoreniu zmesi v pracovnom priestore motoru.

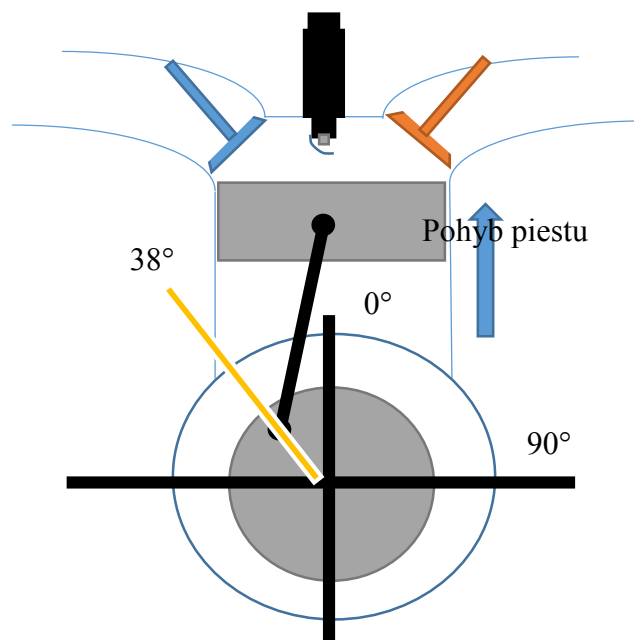
Správny počiatok zážihu zmesi je v zážihových motoroch charakterizovaný predstihom. Predstih je vyjadrený v stupňoch [°] natočenia kľukového hriadeľa. Určuje uhol o ktorý sa musí kľukový hriadeľ pootočiť aby piest dosiahol hornej úvrate motoru. Čím vyšší je predstih, tým väčšia je vzdialenosť piestu od hornej úvrate motoru.

Pri dobre zapálenej zmesi dôjde k lepšej premene energie zo zmesi paliva a vzduchu na mechanický pohyb častí motoru. Ideálny uhol predstihu nie je konštantný a s niektorými faktormi sa mení.

Hlavné faktory ovplyvňujúce hodnotu predstihu:

- otáčky motoru,
- pomer paliva/vzduchu v aktuálne spaľovanej zmesi,
- oktánové číslo paliva,
- aktuálne zaťaženie motoru,
- rýchlosť horenia zapaľovanej zmesi,
- kompresný pomer daného motoru,
- teplota motoru - daná snímačom teploty chladiacej kvapaliny,
- spätná väzba zo snímača klepania.

Niektoré z týchto parametrov sa v konkrétnom motore v čase nemenia. Zloženie zmesi, otáčky motoru, jeho zaťaženie, teplota, rýchlosť horenia zmesi a signál zo snímača klepania sa v čase menia.



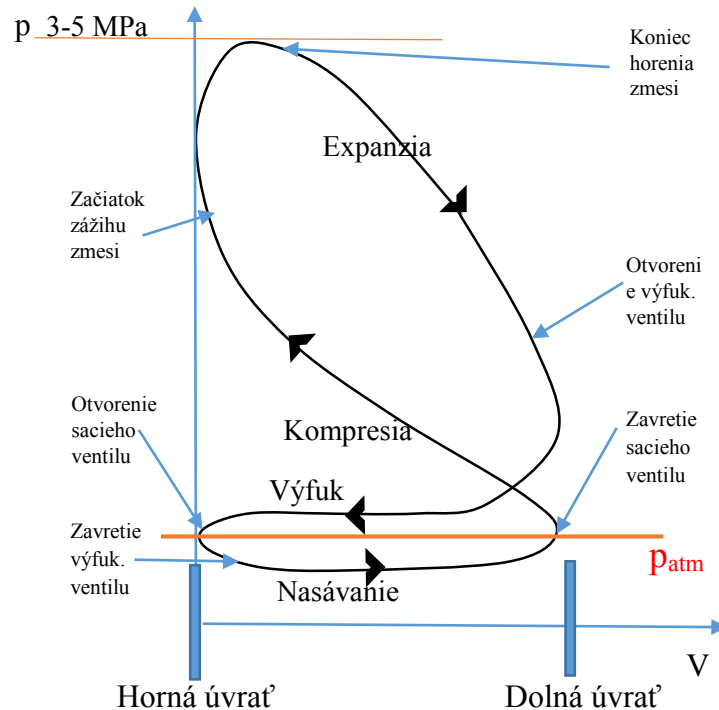
Obr. 2 - Uhol natočenia kľukového hriadeľa

1.1 Regulácia predstihu

Rozobratý je ideálny priebeh zážihu. Zmes paliva a vzduchu je zažihnutá napr. 10° pred hornou úvraťou. Musí byť zapálená pred hornou úvraťou, aby stihla dostatočne prehorieť a vytvorila najväčší tlak tesne za hornou úvraťou.

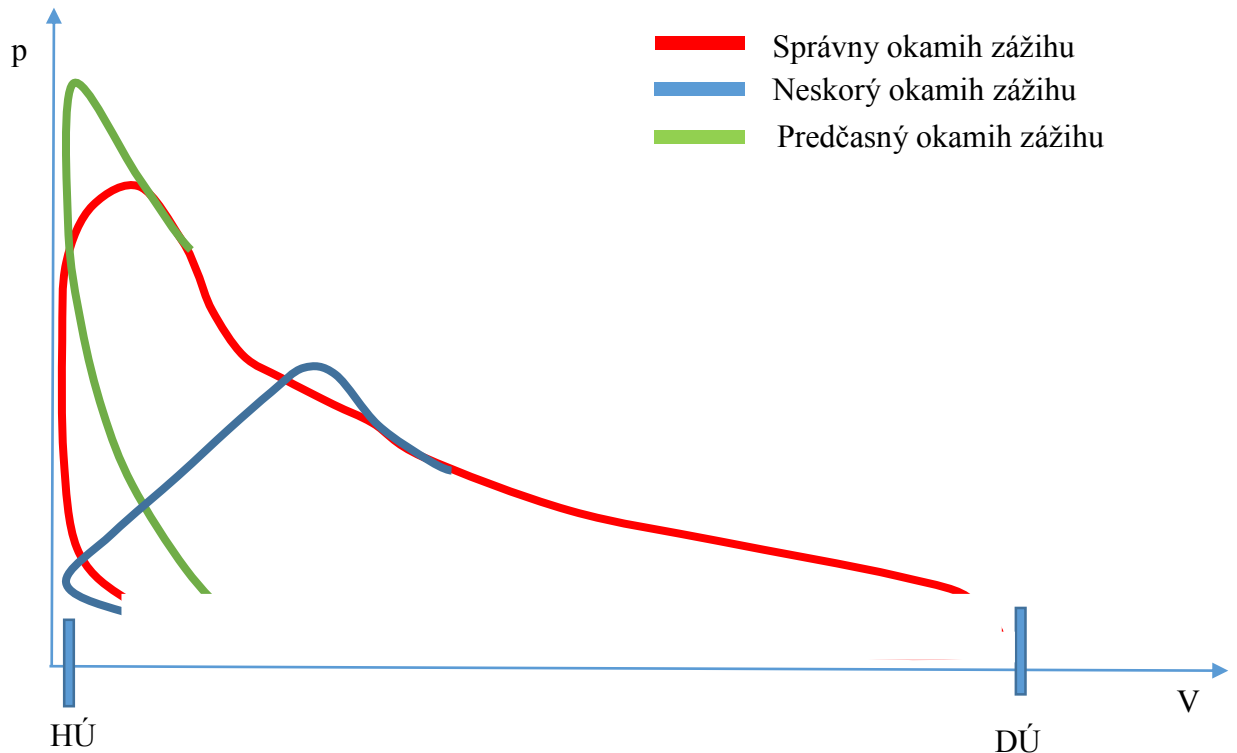
To znamená, že zmes je zapálená ešte v kompresnom zdvihu aby bol tlak vytvorený horením paliva najväčší práve na začiatku expanzného zdvihu, kedy nám piest prenáša na kľukový hriadeľ silu na najmenšom ramene. Tlak na piest priebehom expanzného zdvihu klesá, ale rameno na ktorom pôsobí sila vytvorená zapálením zmesi rastie. Sila je prenášaná cez ojnicu na kľukový hriadeľ. Páka, na ktorej pôsobí je určená vzdialenosťou od osy kľukového hriadeľa po os ojničného čapu. Týmto dostávame z motoru parameter, ktorý potrebujeme predovšetkým – krútiaci moment M [Nm].

V prípade, že je zmes zapálená v nesprávnom okamihu, napríklad príliš skoro, vzrastie tlak a teplota na maximálnu hodnotu ešte pred skončením kompresného zdvihu. Takto pôsobí tlak zapálenej zmesi v podstate proti pohybu piestu a vzniká neprirodzené mechanické zaťaženie motoru.



Obr. 3 - Ideálny priebeh p-V diagramu v zážihovom motore

Ak je zmes zapálená príliš neskoro, prebieha horenie ešte v expanznom zdvihu a nie je využitý celý potenciál zmesi na vytvorenie mechanického pohybu. Dochádza k prílišnému zahrievaniu motoru kvôli dohorievaniu zmesi vo výfukovom potrubí. Taktiež sú príliš tepelne namáhané výfukové ventily, čo môže mať za následok ich mechanické zlyhanie.



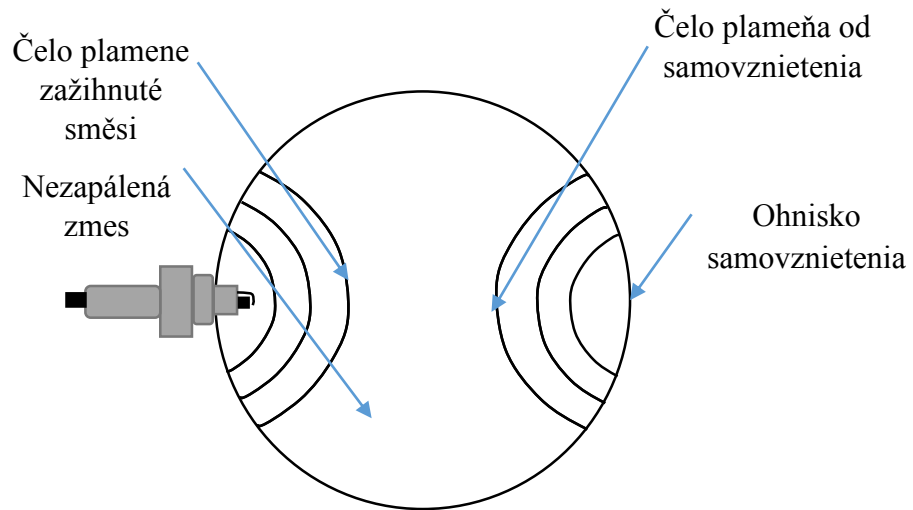
Obr. 4 *p-V diagram kompresie a expanzie [5]*

Ku detonáciám dochádza najmä pri vysokom zaťažení a otáčkach motoru, kedy je pracovný priestor motoru plnený intenzívnejšie a pri stlačovaní zmesi paliva a vzduchu dochádza k strmšiemu nárastu tlaku p [bar] a teploty T [°C]. Ďalšie faktory, ktoré prispievajú ku vzniku detonačného spaľovania sú:

- vysoká vlhkosť nasávaného vzduchu,
- vysoká teplota nasávaného vzduchu,
- vysoké otáčky motoru (u motorov s mechanickou reguláciou predstihu),
- vyššia teplota motoru (napríklad z dôvodu problematického chladenia),
- nekvalitné palivo.

Ak v pracovnom priestore motoru horí väčšia hmota zmesi, uvoľňuje sa z čela plameňa zapálenej zmesi viac tepla, ktoré ohrieva ešte nezapálenú zmes nachádzajúcu sa vo valci. Dôsledkom toho sa v zmesi vytvoria miesta ktoré sa z tohto tepla samovznietia.[3]

Dôjde ku kolízii čela plameňa idúceho od zapálenej zmesi, od sviečky a plameňa od samovznietených miest (obr. 5).



Obr. 5- Detonačné horenie zmesi [5]

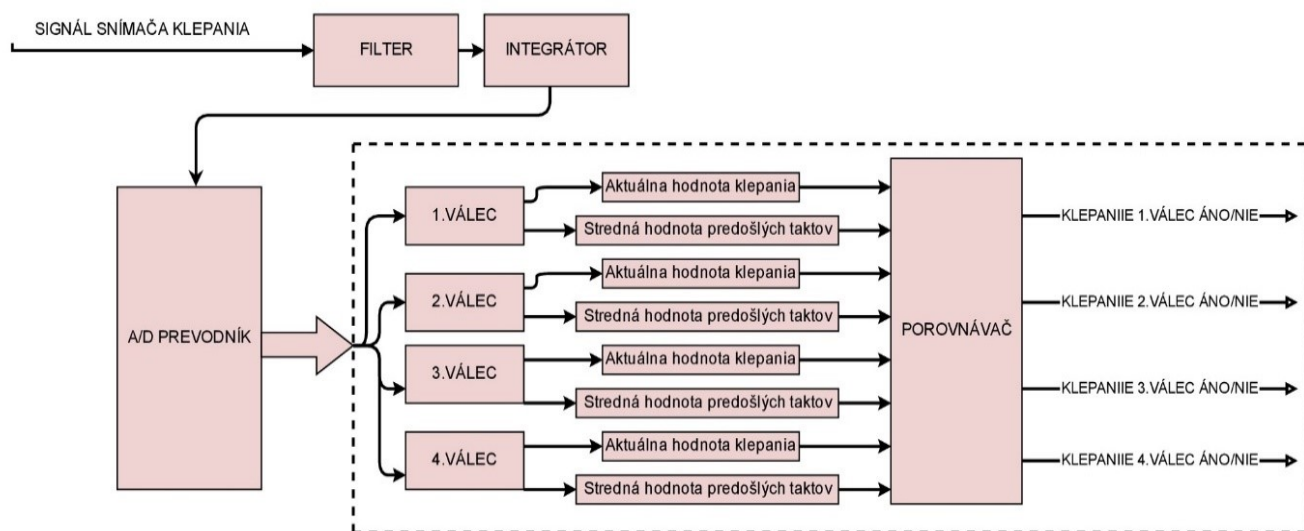
Zmes v pracovnom priestore motoru zhorí neprimerane rýchlo. Bežná rýchlosť horenia zmesi je 15-25 m/s a pri detonačnom spaľovaní dosahuje až 500 m/s. Pri takomto nárazovom zhorení zmesi vznikne sprievodný znak detonačného spaľovania, ktorým je nadmerná hlučnosť a klepanie motora.

Detonačné spaľovanie, alebo inak klepanie, je jav zaznamenávaný takzvaným snímačom klepania. Výstupom zo snímača klepania je napätový signál, ktorý ďalej spracováva riadiaca jednotka motoru. Princíp snímača je založený na fakte, že následkom deformácie dielektrického kryštálu vzniká na jeho povrchu elektrický náboj. Riadiaca jednotka sleduje charakteristické správanie motoru pri klepaní. Pri klepaní vzniká v pracovnom priestore motora rapidný nárast tlaku, čo sa prejavuje rázovými vlnami, ktoré deformujú spomenutý dielektrický kryštál.

Veľkosť výstupného napätia zo snímača klepania sa proporcionálne mení s veľkosťou oscilácií motora, resp. veľkosťou rázových vln, ktoré v ňom vznikajú.

Pre každý valec motoru je určená referenčná úroveň, ktorá je porovnávaná s dovolenými hodnotami uloženými v riadiacej jednotke motoru.

Priradenie signálu k príslušnému valcu je realizované pomocou snímača natočenia kľukového hriadeľa.

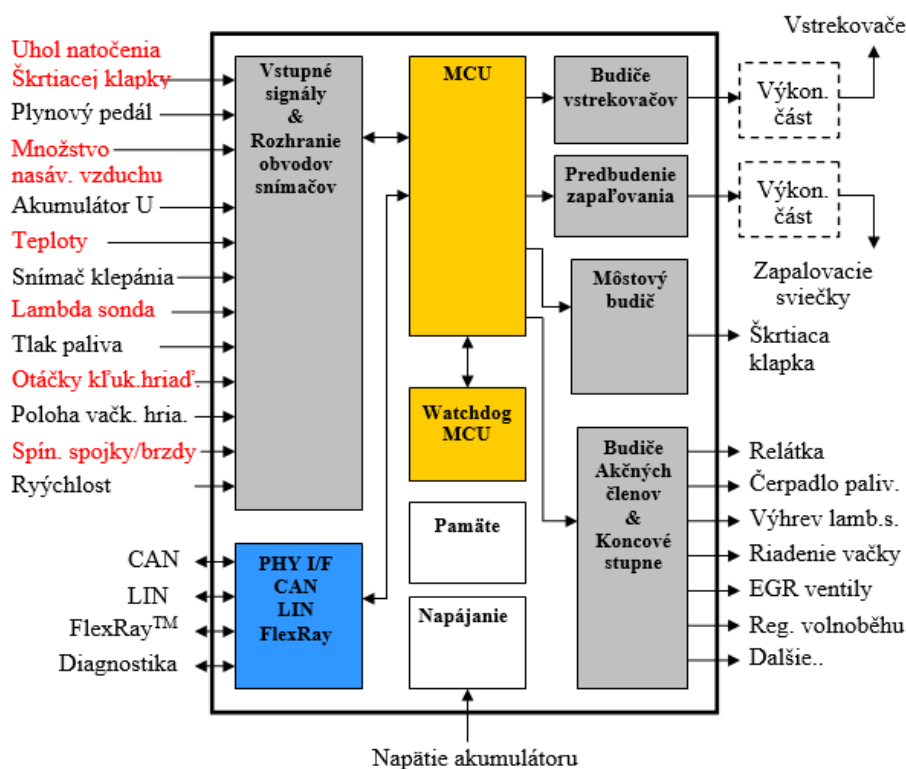


Obr. 6 - Schéma zisťovania klepania v jednotlivých valcoch [1]

K zaisteniu optimálneho predstihu potrebuje riadiaca jednotka zážihového motoru signál z rady snímačov. Signály zo snímačov sú spracovávané a daným podmienkam je ďalej priradený správny uhol predstihu. Hodnoty pre túto výkonovú časť obvodu riadiacej jednotky sú uložené v pamäti RAM.

Hlavnými parametrami, ktoré sú pri riadení predstihu dôležité sú otáčky motoru a jeho zaťaženie. Z tohto faktu vychádza meranie predstihu za ustálených podmienok. Jeho korekcie sú uskutočňované na základe ďalších hodnôt zo snímačov.

Obrázok 7 zobrazuje vstupy zo snímačov a akčné členy, potrebné pre chod moderného zážihového motoru. Hodnoty predstihu sú uložené v bloku označenom Pamäť.



Obr. 7 – Schéma riadiacej jednotky riadenia zážihového motoru

Detonačnému spaľovaniu môže byť zamedzené aj použitím iných regulačných procesov, ako je regulácia posunu uhlu zážihu. Z týchto procesov sú vybrané tie najznámejšie:

- zmena zloženia zmesi (bohatšia zmes)
- zmena tlaku v saní vzduchu pomocou privretia škrtiacej klapky (zníženie zaťaženia motoru)

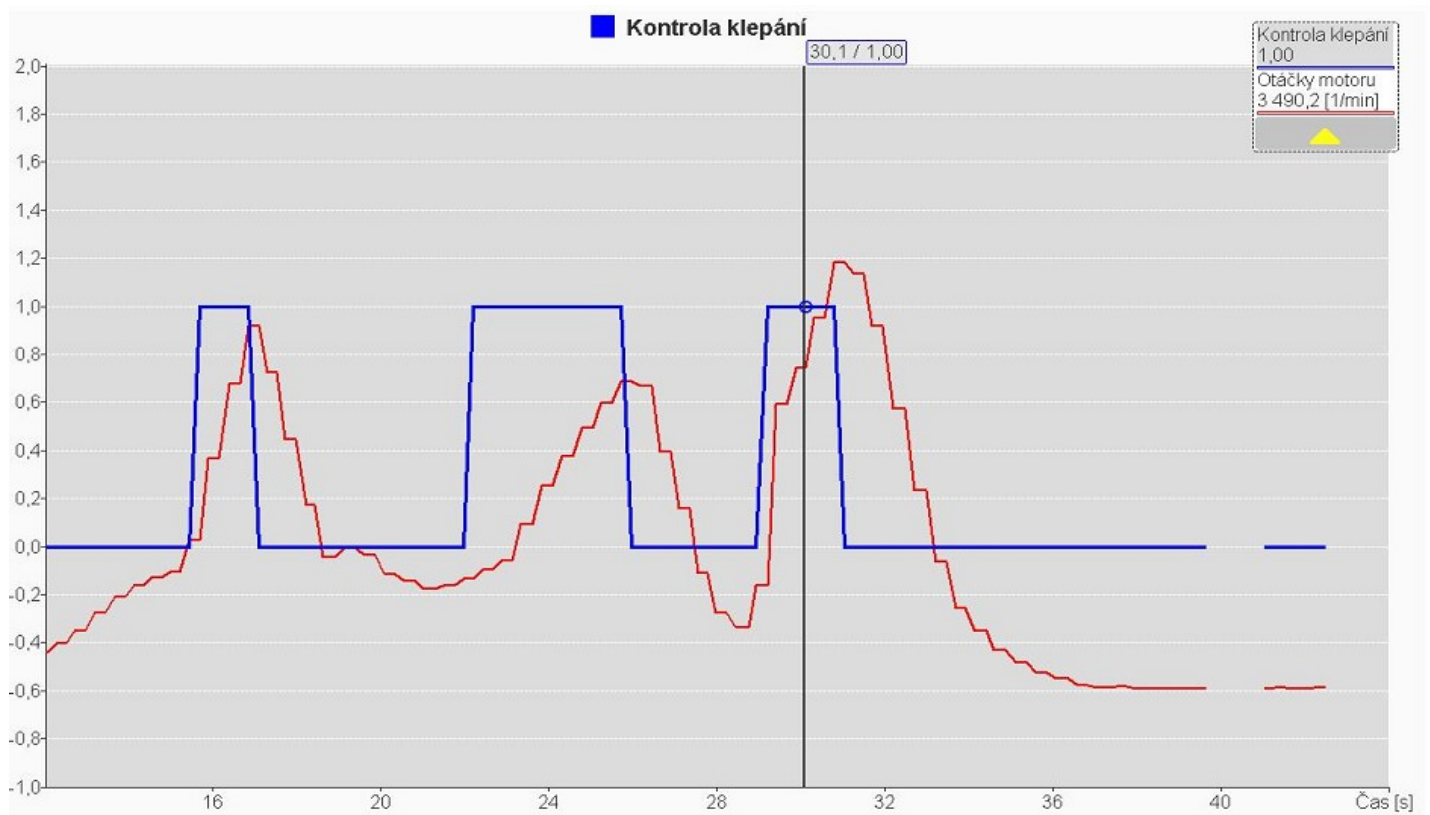
V prípade zmeny zloženia zmesi smerom k bohatšej, je znížená teplota v pracovnom priestore motoru z dôvodu prítomnosti väčšieho množstva látky (benzínu) v kvapalnom stave. Odparovaním benzínu v pracovnom priestore motora sa mierne zníži jeho teplota, čo pomáha redukovať detonácie.

Zmena zaťaženia znamená odľahčenie pre motor namáhaný detonáciami. Riadiaca jednotka by mala znížiť zaťaženie, až dokým neustanú detonácie.

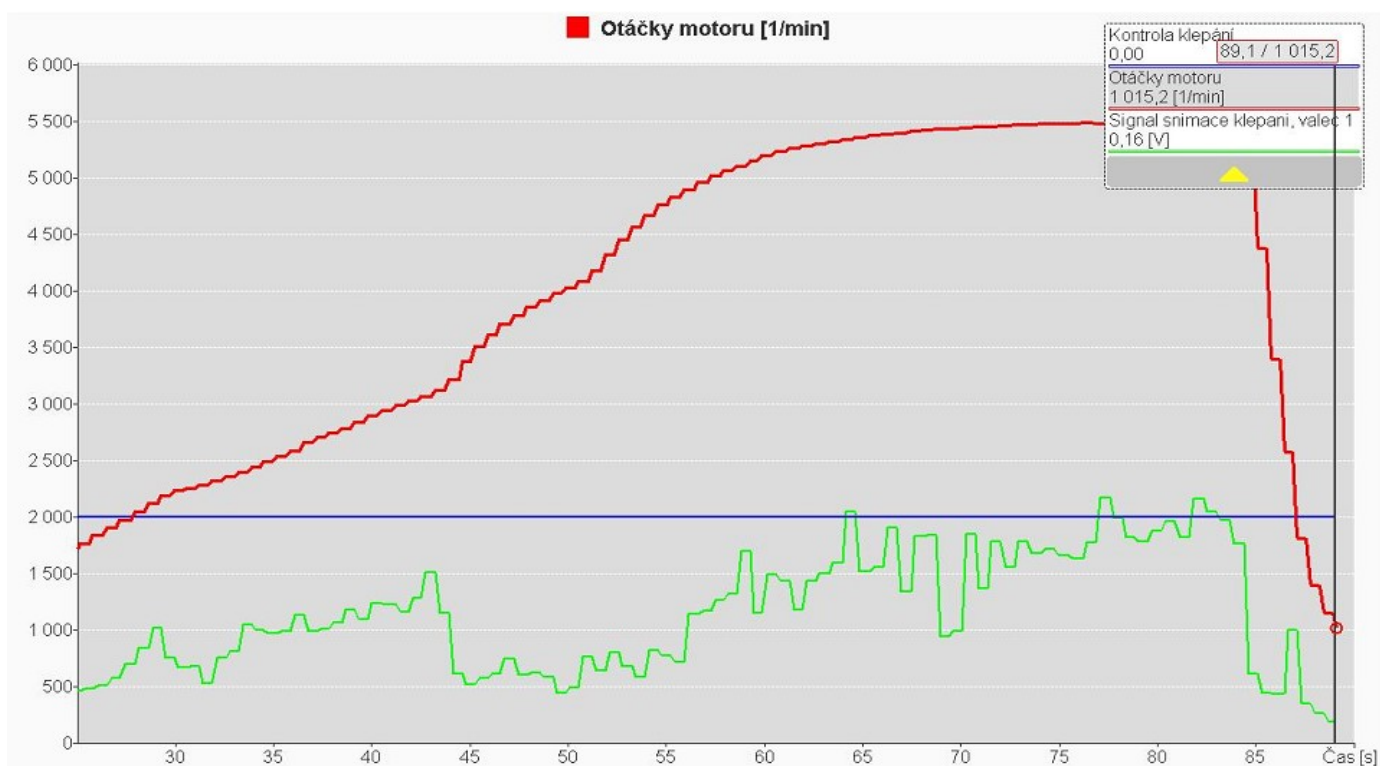
2. Detekcia detonačného spaľovania

Obr.8 zachytáva diskretný signál kontroly klepania (modrá) v závislosti na otáčkach motoru [min^{-1}] (červená). Namerané hodnoty naznačujú, že riadiaca jednotka vie kedy má klepanie očakávať. Pri mierne rastúcich alebo klesajúcich otáčkach a teda i zaťažení motoru riadiaca jednotka neráta s klepaním a preto je kontrola klepania na logickej 0. Pri prudkom náraste otáčok a zaťaženia sa kontrola klepania zopne s výstupom logickej 1.

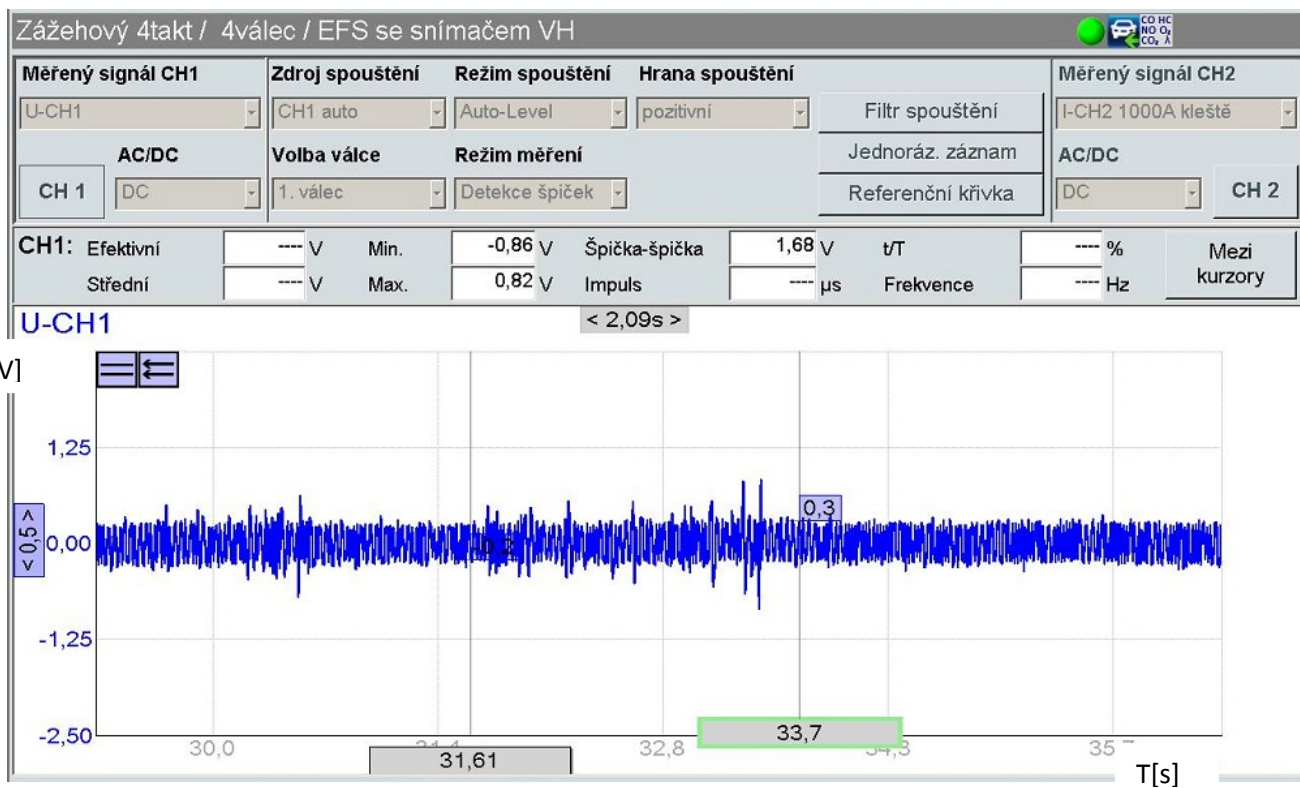
Obr. 9 potvrdzuje, že pri postupne rastúcich otáčkach a teda i zaťažení motora, riadiaca jednotka klepanie neočakáva a teda nezapína kontrolu na jeho obmedzenie. Na obr. 9 je viditeľný aj filtrovaný signál zo snímača klepania, v tomto prípade pre prvý valec. Jeho hodnota rastie spolu s narastajúcimi otáčkami.



Obr. 8 - Kontrola klepania



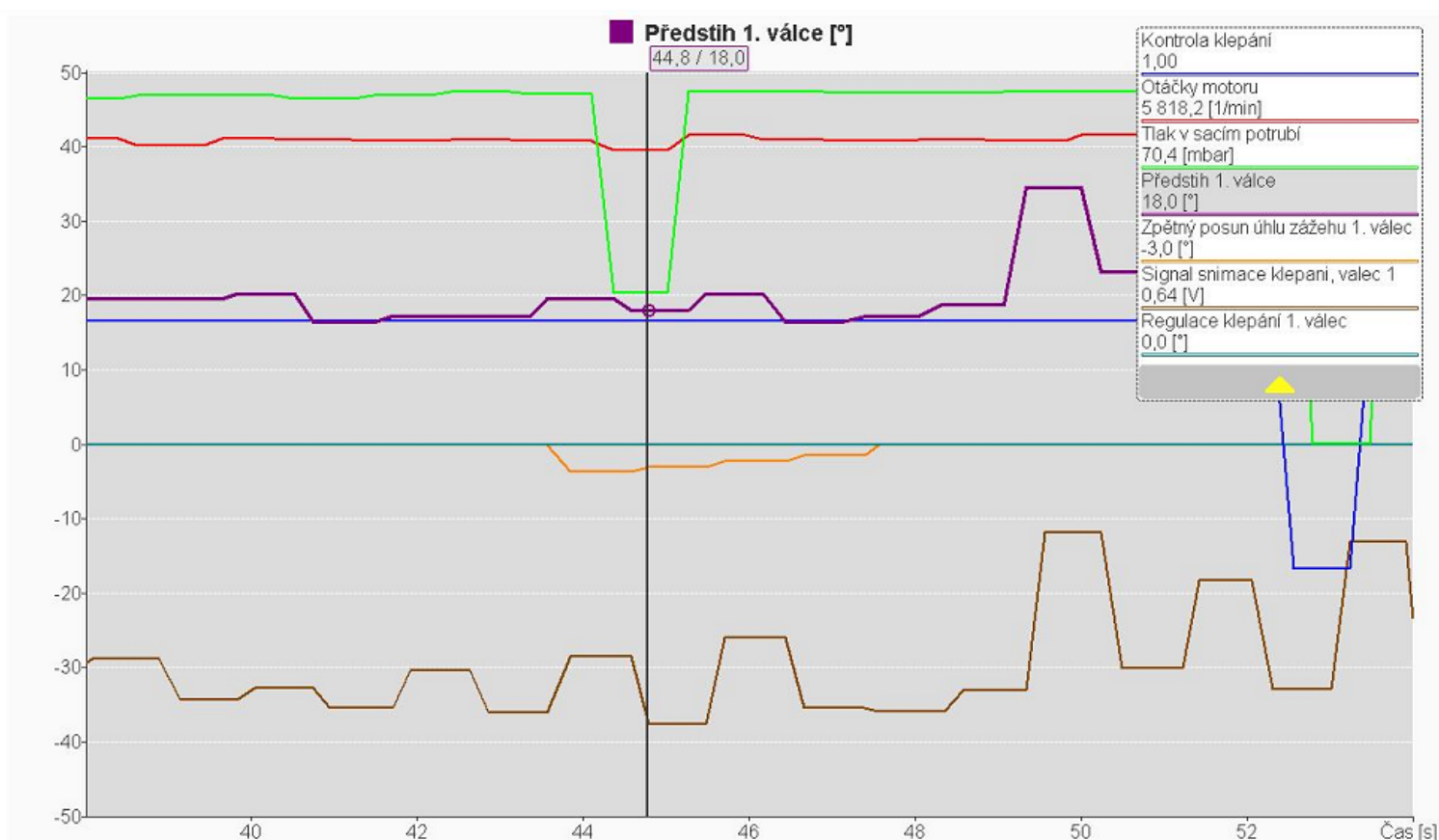
Obr. 9 - Kontrola klepania 2



Obr. 10 - Zachytený signál zo snímača klepania

Obr. 10 zachytáva medzi časmi 32,8 s a 33,7 s dve nápadné výchylky signálu zo snímača klepania, na ktoré regulácia klepania zareagovala znížením predstihu. K takejto výchylke napätia [V] na snímači klepania dochádza najmä pri prudkej zmene zaťaženia motoru.

Uvedená zmena zaťaženia je zachytená na obr.11, kde je možné sledovať zmenu zaťaženia motoru danú referenčnou hodnotou tlaku p_{abs} [mbar] v sacom potrubí (zelená). Hlavným parametrom ktorý je potrebné pri korekcii detonácii sledovať, je spätný posun uhlu zážihu (oranžová). Pri danom priebehu je predpoklad, že sa riadiaca jednotka vysporiadala so vzniknutými detonáciami. Ďalej je na obr. 11 vidno kontrolu klepania (modrá) s hodnotou logická 1.



Obr. 11- Klepanie pri zmene zaťaženia

Zjavné oneskorenie zmeny tlaku v saní za spätným posunom uhlu zážihu je pripísané tomu, že jav klepania prebehol rýchlejšie, než dokázala sériová diagnostika BOSCH zaznamenať zmenu tlaku v sacom potrubí.

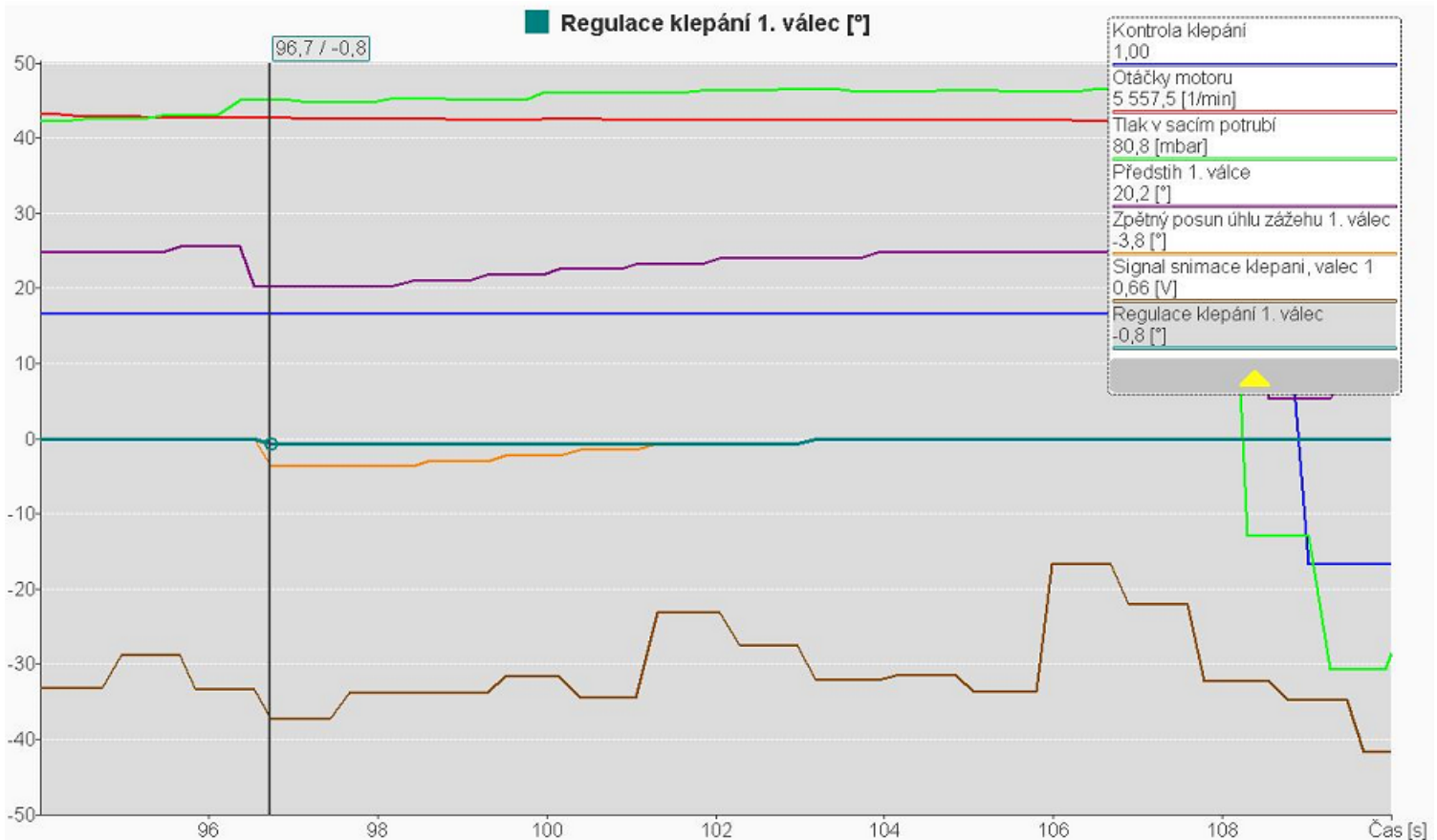
čas T [s]	Absolútny Tlak v saní [mbar]	Spätný posun uhlu zážihu [°]
43.8	970	0.00°
44.1	970	-3.80°
44.8	704	-3.00°
46	970	-2.20°
47	970	-1.60°
47.8	970	0.00°

Tabuľka 1 - Priebeh hodnôt obr. 11

2.1 Spätný posun uhlu zážihu

Riadiaca jednotka by mala na klepanie reagovať zmenšením predstihu. Aby regulácia prebehla musí ku klepaniu najprv dôjsť.

Zachytenie klepania pri ustálenom zaťažení a otáčkach je náročné, keďže pri ňom dochádza najmä pri prudkých zmenách zaťaženia. Napriek tomu bola regulácia klepania zachytená a následne zanalyzovaná.



Obr. 12 - Zmena predstihu pri detekcii klepania

Obr.12 zachytáva zmenu predstihu pri detekcii klepania. Regulácia klepania (svetlomodrá) a spätný posun uhlu zážihu (oranžová) naznačujú, že riadiaca jednotka zaznamenala v prvom valci detonáciu zmesi. Z mapy predstihu je možné jednoducho vyčítať hodnotu predstihu, ktorá je ideálna pre daný moment –85% zaťaženia (810 mbar) a 5500 otáčok [min⁻¹]. Predstih by teda mal mať hodnotu 23° pred hornou úvraťou motoru.

Riadiaca jednotka zasiahla zmenšením predstihu o $3,8^\circ$ natočenia kľukového hriadeľa. Malá odchýlka je spôsobená tým, že otáčky neboli presne na hodnote 5500 min^{-1} ale na 5550 min^{-1} .

Ak by bola ďalej sledovaná hodnota predstihu tak je zjavné, že spätný posun uhlu zážihu sa postupne znižuje a hodnota predstihu sa postupne vracia do naprogramovanej hodnoty. Znamená to, že riadiaca jednotka ďalej nedetekuje detonácie v prvom valci.

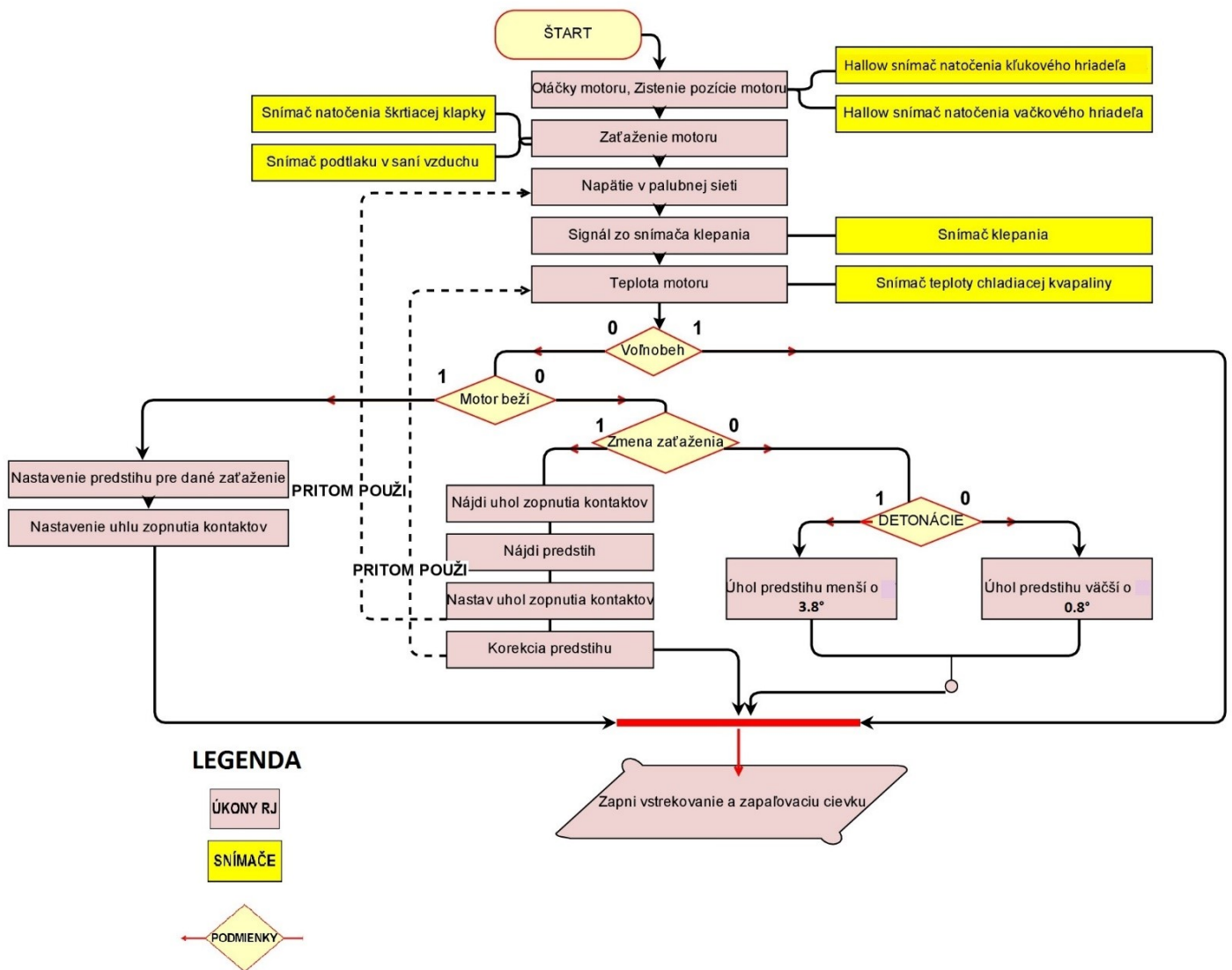
čas T[s]	Absolútny Tlak v saní [mbar]	Spätný posun uhlu zážihu [$^\circ$]	Predstih [$^\circ$]
96.5	810	0.00°	24.00°
96.7	810	-3.80°	20.20°
98.5	810	-3.00°	21.00°
99.5	810	-2.20°	21.80°
100.3	810	-1.60°	22.40°
101.2	815	-0.80°	23.20°
103.2	815	0.00°	24.00°

Tabuľka 2 - Priebeh hodnôt na obr. 12

Po zistení detonácií sa pri bežnej korekcii znížil uhol zážihu o 3.8° , tak aby k detonáciám ďalej nedochádzalo. Ak však klepanie nezanikne, riadiaca jednotka uhol zážihu ďalej znižuje. Daná hodnota zmeny uhlu zážihu platila iba toto meranie a v iných meraniach sa líšila.

Ďalej je z obr.12 a tabuľky 2 je zjavné, že jednotka má v tomto prípade naprogramovaný krok 0.8° k spätnému návratu k naprogramovanej hodnote predstihu. Dané hodnoty zmeny predstihu sa vzťahujú iba ku konkrétnemu motoru.

3. Korekcie predstihu



Obr.13 – Experimentálna schéma regulácie detonačného spaľovania pomocou predstihu[1]

Ako bolo spomenuté, ideálna hodnota predstihu sa mení spolu so zaťažením motora, ako aj s ďalšími faktormi. Obrázok 13 znázorňuje predpokladaný cyklus bežiaci v riadiacej jednotke za predpokladu, že pri bežnej prevádzke bude uhol zmenšenia a zväčšenia predstihu stále rovnaký.

Ideálna hodnota predstihu, ktorá je potrebná pre správny priebeh procesu spaľovania zmesi by mohla byť charakterizovaná aj pomocou rovnice (1).

$$H_{Preds.} = H_{zákl.} + H_{tlak} + H_{tepl.} + H_{tepl.2} + H_{klep.} [2] \quad (1)$$

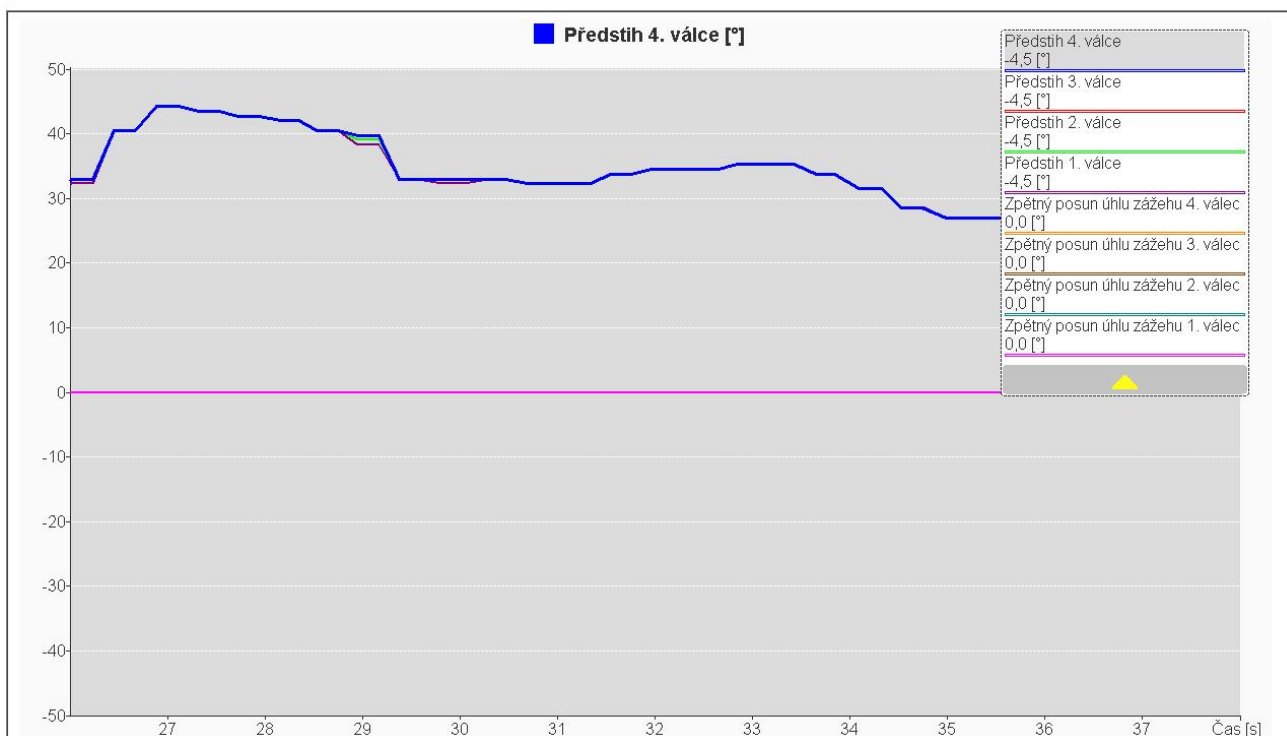
Kde $H_{Preds.}$ značí celkovú hodnotu predstihu, $H_{zákl.}$ je základná hodnota predstihu pre dané otáčky, H_{tlak} zodpovedá korekcii predstihu vzhľadom k aktuálnemu zaťaženiu, H_{tepl} značí korekciu kvôli teplote motora a $H_{tepl.2}$ je korekcia pre rôzne teploty nasávaného vzduchu.

Najdôležitejšou korekciou pre životnosť mechanických komponentov je hodnota $H_{klep.}$, ktorá označuje zmenu predstihu, ktorú vyhodnotí riadiaca jednotka za pomoci regulačného obvodu klepania.

3.1 Korekcie predstihu pre rôzne valce

Meraný motor 1.6 GD je vybavený plne elektronicky riadeným zapalovaním. Na každú zapalovaciu sviečku pripadá jedna elektronicky ovládaná indukčná cievka. Toto usporiadanie umožňuje regulovať predstih pre každý valec osobitne. Riadiaca jednotka priradzuje výstupné hodnoty napätia zo snímača klepania pomocou Hallowho snímača natočenia kľukovej hriadele.

Pri malých zmenách zaťaženia pracujú všetky 4 valce s totožnými hodnotami predstihu, zriedka sa vyskytujú malé výchyľky, čo zachytáva obrázok 14. Hodnoty predstihu splývajú do jednej čiary na grafe.

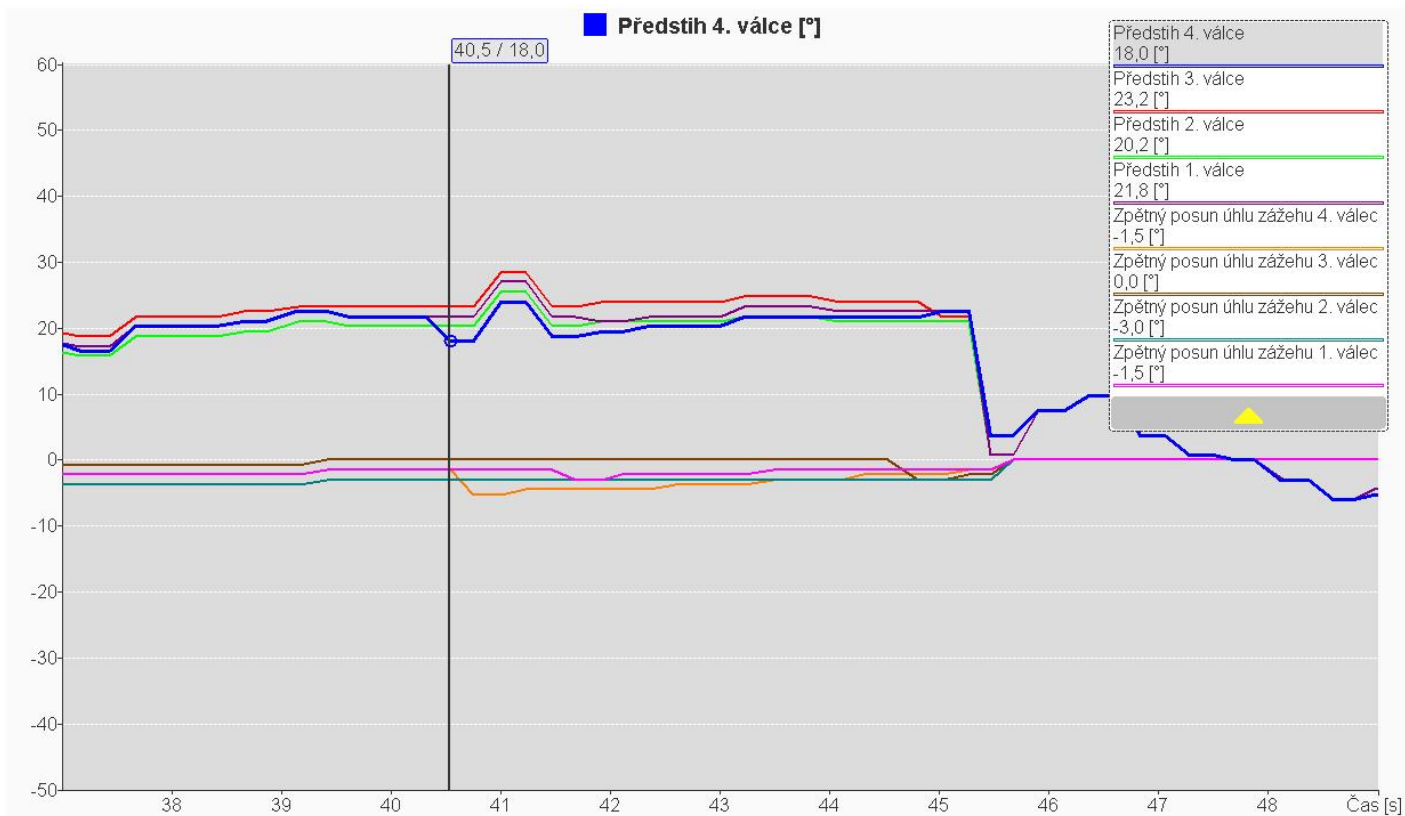


Obr.14 - Porovnanie hodnôt predstihu všetkých 4 valcov

Čas [s]	27	28	29	30	31	32	33	34
Predstih [°]	45.00°	41.50°	40.00°	32.00°	31.50°	33.50°	35.00°	31.50°

Tabuľka 3- Hodnoty z obr. 14

Malý rozdiel hodnôt predstihu medzi jednotlivými valcami bol spôsobený zmenou zaťaženia. Zmena nebola však dostatočne veľká, aby vyvolala klepania motoru, ktorú by bolo možné sledovať na spätnom posune uhlu zážihu. Pri tomto meraní boli všetky hodnoty spätného posunu uhlu zážihu zachované na nulovej úrovni.



Obr.15 - Korekcie predstihu pre všetky 4 valce

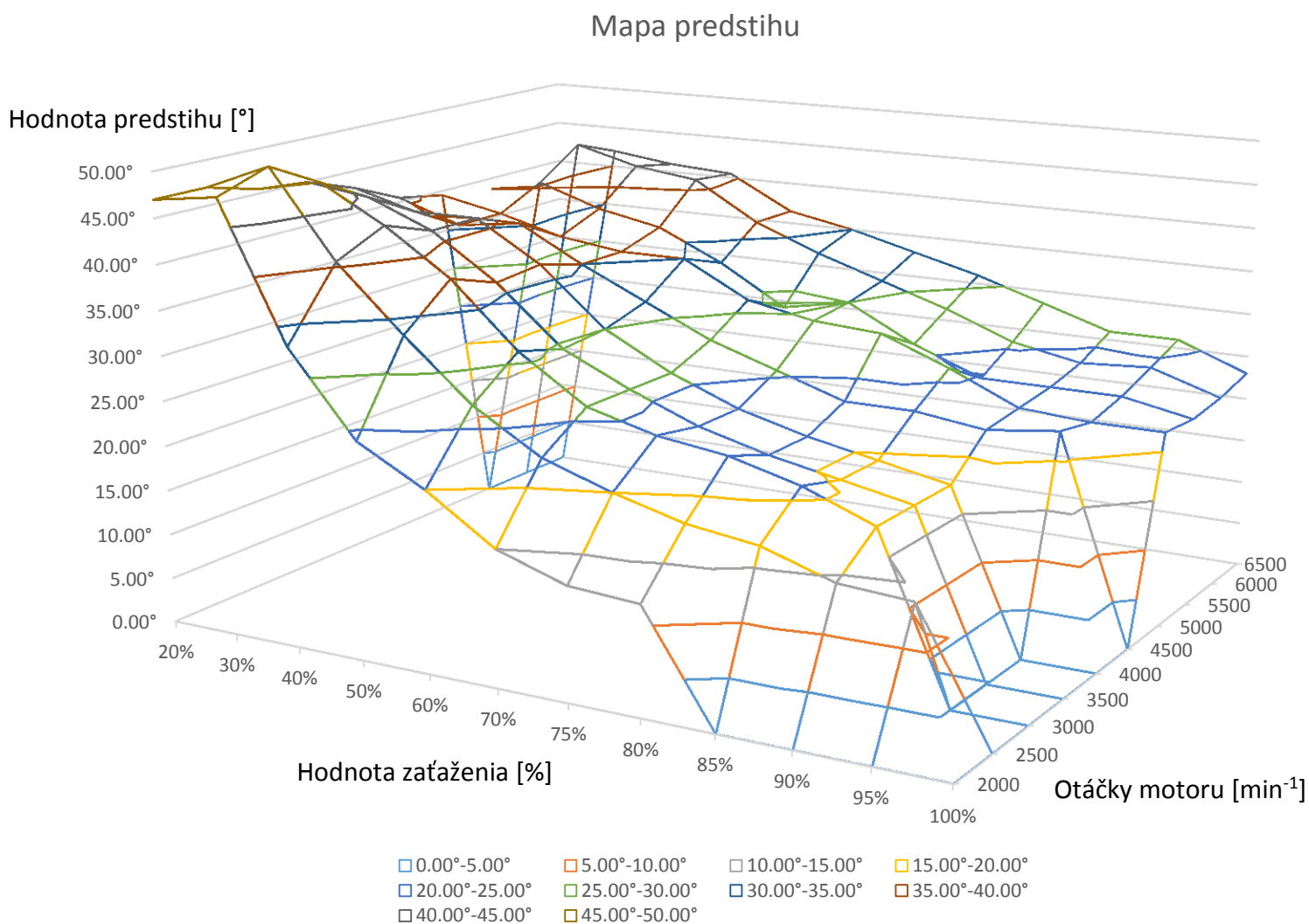
Hodnoty pre obr. 15, uvedené v tabuľke 4 vykazujú spomenutú korekciu predstihu pre rôzne valce. Meranie bolo uskutočnené rovnako ako ostatné merania s konštantnou teplotou motoru 99 [°C] a teplotou nasávaného vzduchu 23 [°C]. Meranie ukazuje hodnoty predstihu a jeho korekcie pri otáčkach 5500 min⁻¹ a plnom zaťažení motoru.

čas[s]	Predstih 1. valec [°]	Predstih 2. valec [°]	Predstih 3. valec [°]	Predstih 4. valec [°]	Spätný posun uhlu zážihu 1. valec [°]	Spätný posun uhlu zážihu 2. valec [°]	Spätný posun uhlu zážihu 3. valec [°]	Spätný posun uhlu zážihu 4. valec [°]
40.5	21.8	20.2	23.2	18	-1.5	-3	0	-1.5
41	22.8	21.2	24.2	19	-1.5	-3	0	-5
42	22.8	21.2	24.2	20	-2	-3	0	-4
43	23.3	21.7	24.7	20.5	-1.5	-3	0	-3.5
44	22.5	21	24	22.8	-1	-3	0	-3
45	22	21.5	21	22	-1	-3	-3	-3
46	2	6	6	6	0	0	0	0

Tabuľka 4- Hodnoty korekcie predstihu pre všetky 4 valce

4. Analýza v bežnej prevádzke

Ako už bolo spomenuté hlavným parametrom, ktorý pri regulácii detonačného spaľovania sledujeme je uhol zážihu zmesi - predstih. Pre sledovanie regulácie detonačného spaľovania bola vytvorená mapa predstihu (Graf 1), aby boli k dispozícii referenčné hodnoty predstihu, kedy k detonáciám nedochádza. Pre predstih platí, že sa ustálených podmienok je jeho hodnota rovnaká. Táto vlastnosť dovoľuje vytvoriť mapu predstihu. Tento plošný graf je najčastejším vyjadrením hodnôt predstihu pre rôzne zaťaženia a otáčky.



Graf 1 - Mapa predstihu

Meranie bolo prevedené za ustálených podmienok teploty motora a teploty nasávaného vzduchu. Zapojením potenciometrov namiesto NTC tepelných snímačov, mala riadiaca jednotka k dispozícii údaje o teplote motora 99 [°C] a teplotu nasávaného vzduchu 23 [°C].

Uvedený postup zamedzí riadiacej jednotke úpravy predstihu vzhľadom na uvedené teploty. Ako palivo bol použitý 95 oktánový benzín, ktorý je pre meraný motor štandardný.

Ďalšie faktory ovplyvňujúce hodnoty predstihu, ktoré sú vymenované na strane 10 tejto práce, sú pre ustálené otáčky a zaťaženie motoru rovnaké a netreba ich upravovať. Dôležitým korekčným faktorom je ale spätná väzba zo snímača klepania.

Je potrebné spomenúť, že uvedená mapa predstihu platí len pre motor 1.6 GD G4FD s nepriamym vstrekovaním typu MPI.

		Zaťaženie motoru											
		20%	30%	40%	50%	60%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%
Otáčky motoru(min)	2000	47.00°	48.00°	33.00°	24.00°	20.00°	15.00°	12.50°	12.00°				
	2500	47.00°	50.00°	40.50°	33.50°	27.00°	22.50°	20.00°	18.00°	17.00°	14.50°	14.00°	
	3000	45.50°	47.00°	43.00°	38.00°	31.00°	26.00°	24.00°	23.00°	21.00°	18.00°		
	3500	45.00°	44.00°	41.00°	36.00°	29.50°	26.00°	23.00°	21.00°	19.50°	18.00°		
	4000	43.00°	41.00°	41.00°	36.50°	30.00°	26.00°	23.00°	21.00°	19.50°	18.00°		
	4500	40.50°	38.00°	39.00°	35.00°	31.50°	28.00°	25.50°	23.00°	23.00°	22.00°	23.00°	
	5000	39.50°	38.00°	36.00°	35.00°	35.00°	31.00°	29.50°	29.00°	26.00°	22.50°	22.00°	22.00°
	5500		40.50°	38.00°	36.50°	33.00°	28.50°	30.00°	26.00°	23.00°	23.00°	23.00°	21.50°
	6000		44.00°	42.00°	41.00°	36.50°	33.50°	31.00°	28.50°	25.50°	24.00°	24.50°	22.00°
	6500		42.00°	41.00°	40.50°	36.50°	35.00°	33.00°	31.00°	28.50°	26.00°	26.00°	23.00°

Tabuľka 5- Hodnoty mapy predstihu

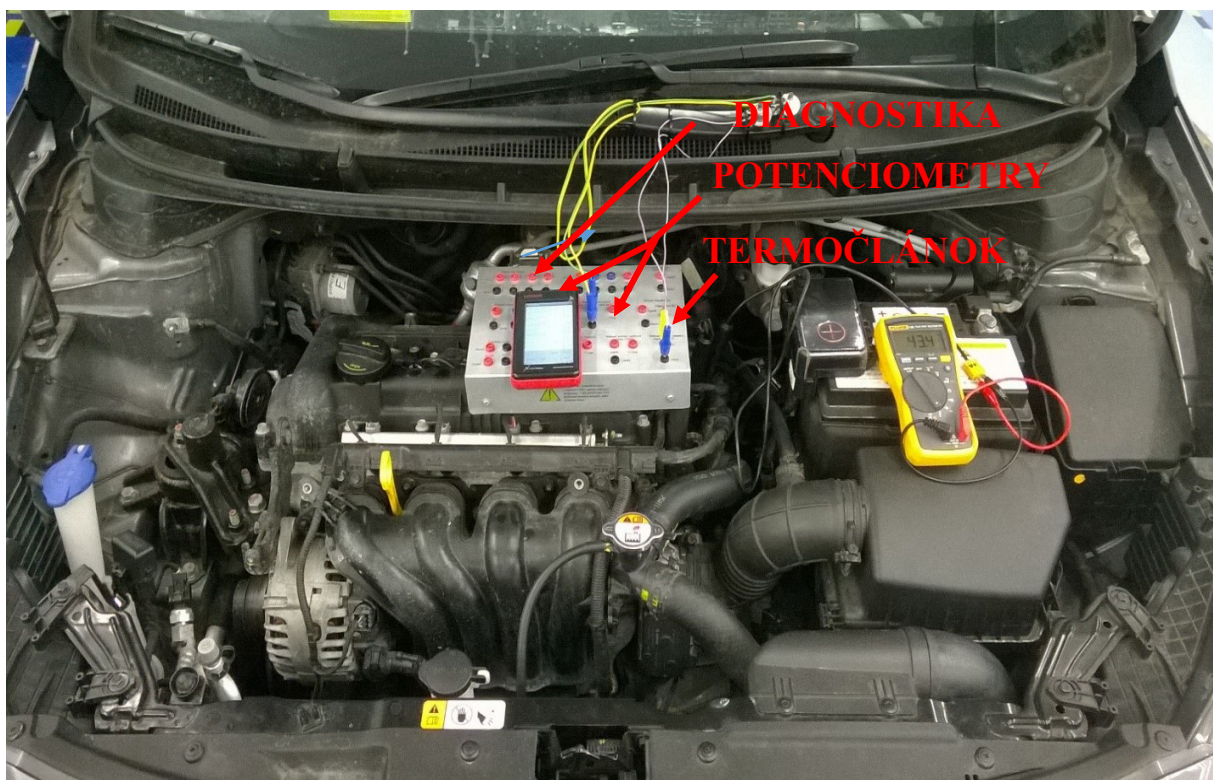
Na uvedenom grafe a aj v tabuľke je vidno, že predstih s vyššími otáčkami rastie. K jeho zníženiu dochádza so zvyšujúcim sa zaťažením.

S otáčkami rastie predstih kvôli zrýchľujúcej sa výmene zmesi v pracovnom priestore motora a so zaťažením sa znižuje kvôli rastúcej bohatosti zmesi. Bohatšia zmes horí rýchlejšie preto potrebuje menej času na prehorenie.

Hodnoty predstihu, otáčok a zaťaženia motoru boli odčítané zo sériovej diagnostiky LAUNCH X-431 Diagun. Hodnoty boli niekoľkonásobne overené, aby nedošlo k chybným určeniam hodnôt posunu predstihu.

Zaťaženie motoru je hodnota, ktorá je vypočítaná riadiacou jednotkou a ďalej poskytovaná cez diagnostické rozhranie. Pre účely tejto práce je postačujúca, keďže predmetom tejto bakalárskej práce nie je vytvorenie vzorca pre výpočet zaťaženia motoru. Odčítanie predstihu zo sériovej diagnostiky je jediný spôsob ako zaznamenať predstih meniaci sa v reálnom čase.

Potreba konštantných otáčok pri meniacom sa zaťažení bola zabezpečená pomocou výkonovej valcovej skúšobne MAHA LPS 3000. Táto valcová skúšobňa má funkciu kladenia odporu motoru pri konštantných otáčkach. Na základe tejto funkcie je možné meniť zaťaženie a pomerne jednoducho ho udržiavať na ustálenej hodnote pre odčítanie predstihu.



Obr. 16 - Meranie predstihu

K motoru bol prichytený externý termočlánok, kvôli sledovaniu reálnej teploty bloku motoru a zamedzenie jeho prehriatia.

4.1 Priradenie absolútneho tlaku v saní hodnote zaťaženia

Nakoľko ďalej používaná diagnostika Bosch KTS 540 (integrovaná v meracej stanici FSA 740) nepodporuje funkciu sledovania hodnoty zaťaženia motoru v rámci sériovej diagnostiky, bolo potrebné zaťaženiu motoru priradiť referenčnú hodnotu, ktorú môžeme pri meraní predstihu pri klepaní sledovať. Bola vybraná hodnota absolútneho tlaku v saní vzduchu do pracovného priestoru motoru.

		Zaťaženie motoru [%]								
		50%	60%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%
Otáčky [min ⁻¹]	5500	480	570	660	710	750	810	820	860	940
	6000	530	580	660	720	740	790	820	860	940
	6500	510	600	680	730	760	800	830	850	940

Tabuľka 6 - Priradenie hodnôt tlaku v saní hodnotám zaťaženia motoru

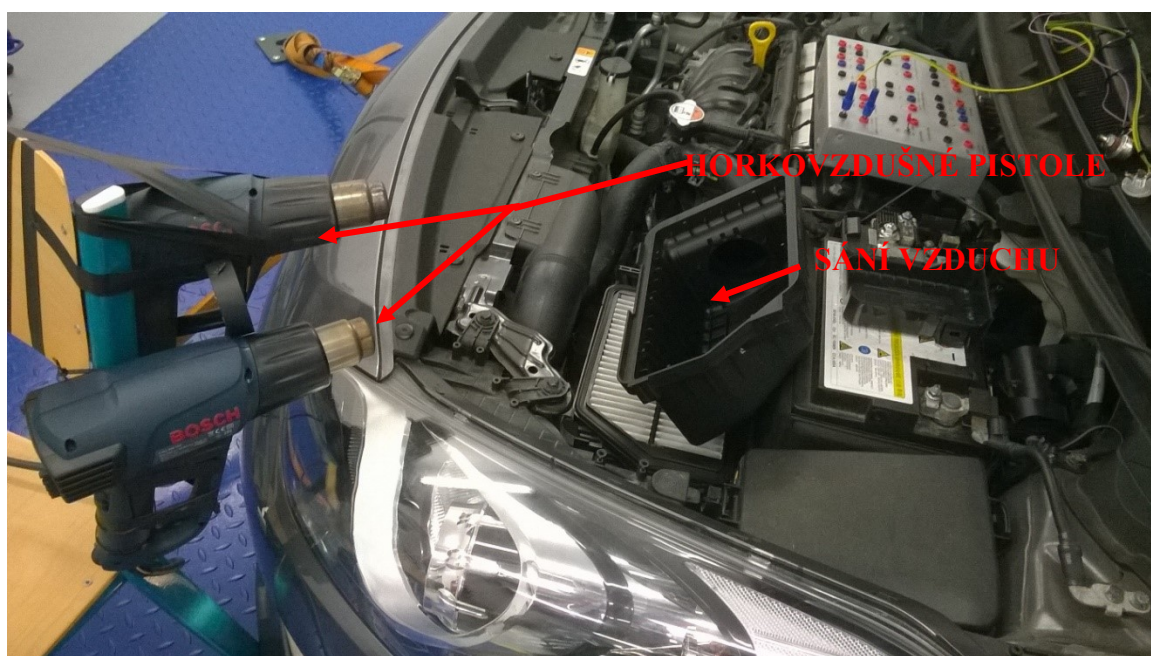
Uvedené hodnoty v tabuľke 6, sú hodnoty absolútneho tlaku p_{abs} [mbar]. Tieto hodnoty boli taktiež odmerané za ustálených hodnôt otáčok, teploty v saní a teploty motoru. Nebola prevedená celá mapa predstihu kvôli faktu, že k detonáciám dochádza pri vysokých otáčkach a pri vysokom zaťažení motoru.

Pri priradzovaní hodnôt zaťaženia hodnotám absolútneho tlaku v saní je potrebné myslieť na to, že atmosférický tlak sa neustále mení a preto je tento prevod relevantný iba pre určité časové obdobie.

5. Analýza v podmienkach klepaniu prospievajúcich

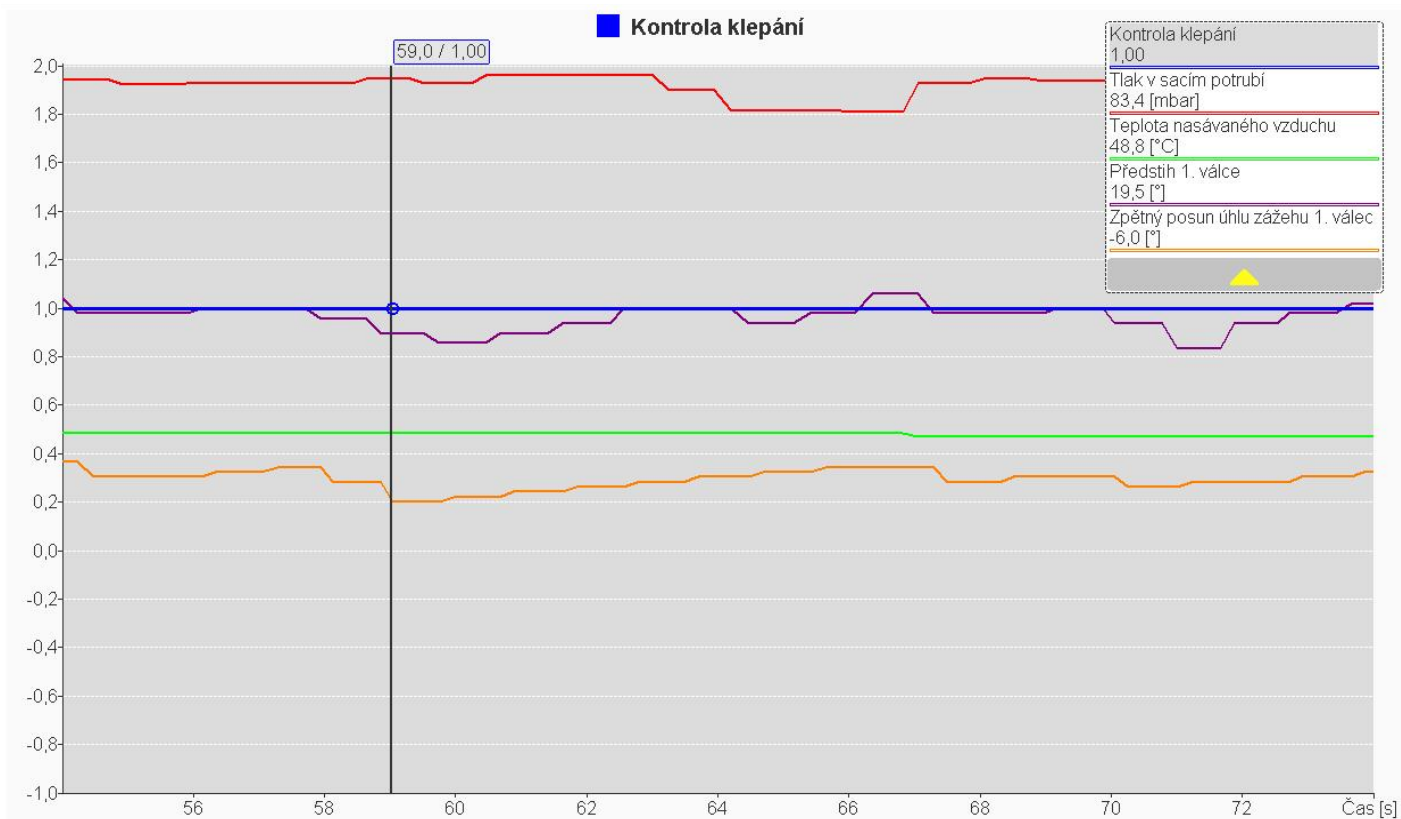
Po meraniach detonačného spaľovania v ustálených stavoch zaťaženia, teploty motoru a teploty nasávaného vzduchu bolo zistené, že ku klepaniu dochádza hlavne pri prudkých zmenách zaťaženia. V ustálených stavoch k detonáciám dochádza v malom množstve a riadiaca jednotka sa s nimi rýchlo vysporiada zmenšením uhlu zážihu.

Nebolo možné jednoznačne určiť hodnoty otáčok a zaťaženia motoru, kedy k detonáciám dochádza najviac, preto bolo potrebné motoru nasimulovať zhoršené podmienky prevádzky. Konkrétne bolo vybrané zásobovanie motorového priestoru zohriatym vzduchom.



Obr. 17 - Zásobovanie motoru prehriatym vzduchom

Meranie bolo realizované s ustálenou teplotou motoru 99 °C, ustálenými otáčkami 5500 min⁻¹ a s rôznymi hodnotami zaťaženia motoru, za účelom definovania bodu, kedy má motor klepať najviac. Dané meranie bolo vybrané kvôli rade faktorov. Vysoké otáčky a vysoké zaťaženia boli vybrané kvôli tomu, aby sa v pracovnom priestore motoru nachádzala bohatá zmes, ktorá má vyššiu tendenciu k detonáciám. Prehriaty vzduch, ktorým bol motor zásobovaný, má za účel zvýšiť teplotu zmesi v pracovnom priestore motoru T_{val} [°C].



Obr. 18 - 90% zátěžení s horkým vzduchem

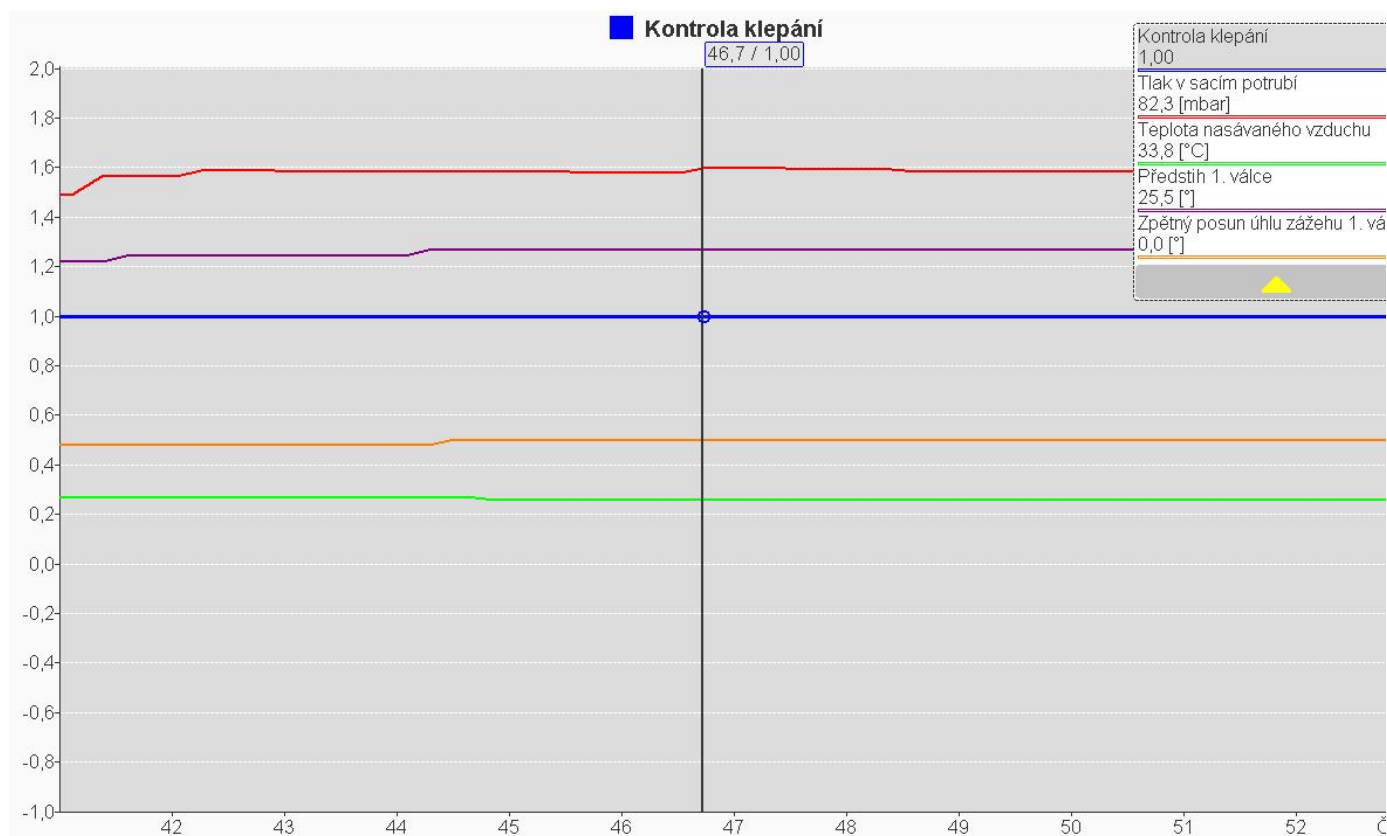
Túto teplotu nie je možné merať priamo. Ak má zmes vo valci vyššiu teplotu, majú sa v zmesi tendenciu vytvárať miesta, ktoré sa samovznietia.

Čas [s]	Tlak v sacom potrubí [mbar]	Teplota nasávaného vzduchu [°C]	Předstih 1. válca [°]	Spätný posun uhlu zážihu 1.válec [°]
50.6	823	48.8	24	0
51.3	821	48.8	22.5	-1.5
52.2	824	48.8	23.2	-0.8
53.4	822	48.8	24.8	0
54.5	833	48.8	22.5	-2.2
56.3	830	48.8	22.5	-1.5
57.3	829	48.8	23.2	-0.8
58.1	830	48.8	21.8	-3
59	834	48.8	19.5	-6
60	830	48.8	18	-5.2
76	159	48.8	6	0

Tabuľka 7 - 90% zátěžení s horkým vzduchem

V tomto meraní vzrástla teplota nasávaného vzduchu za pomoci 2 teplovzdušných pištolí na teplotu 48.8 °C, čo odpovedá viac ako 2-násobku predošlých meraní. Výsledkom tohto merania bolo to, že riadiaca jednotka pri relatívne ustálenom zaťažení neustále upravovala uhol zážihu. V podstate korekcia pomocou spätného posunu uhlu zážihu neprestala, až dokým nebol motor uvedený do nižšieho zaťaženia.

Pre zrovnanie hodnôt spätného posunu uhlu zážihu pri nasávaní vzduchu s teplotou 33.8°C slúži obr. 19. Na uvedenom obrázku môžeme sledovať, ako vyzerá priebeh merania pri bežnej prevádzke, pri rovnakom zaťažení ako pri predošlom meraní.



Obr. 19 - meranie v bežnej prevádzke, 90% zaťaženia

Výsledkom merania bolo tiež zistenie, že analyzovaný motor má najvyšší sklon detonovať pri 90% zaťaženia pri otáčkach motoru 5500 min⁻¹. Meranie má poukázať na fakt, že pre zážihový motor je vhodná chladnejšia zmes.

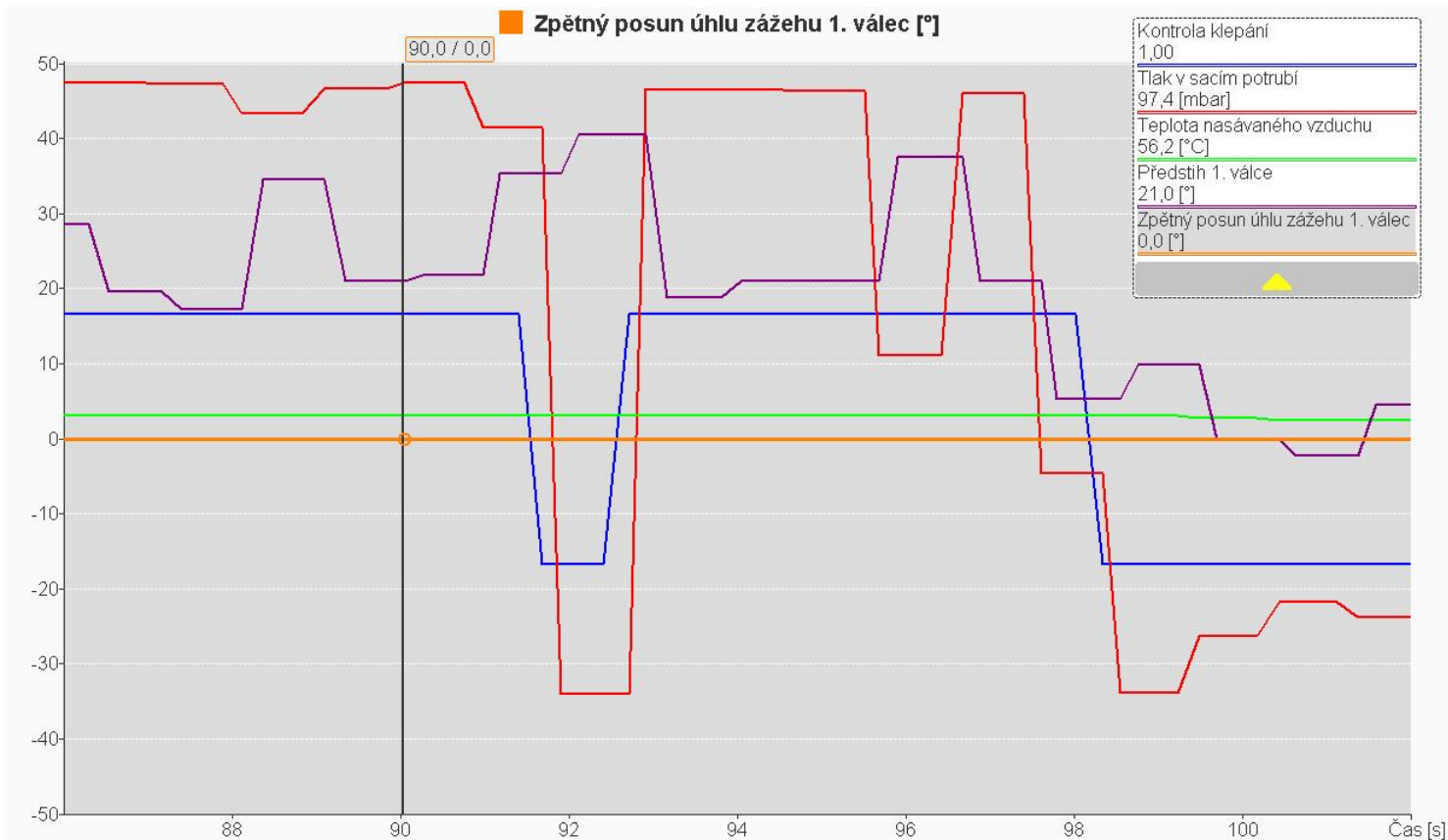
Čas [s]	Tlak v sacom potrubí [mbar]	Teplota nasávaného vzduchu [°C]	Predstih 1. valca [°]	Spätný posun uhlu zážihu 1.válec [°]
42.3	820	33.8	24.8	0.8
44.5	818	33.8	25.5	0
46.7	818	33.8	25.5	0

Tabuľka 8 - meranie v bežnej prevádzke, 90% zaťaženia

6. Analýza v podmienkach potlačujúcich klepanie

Antidetonačná schopnosť paliva je daná oktánovým číslom, označuje pomer heptánu (0 oktánov) a izooktánu (100 oktánov). Napríklad 95 oktánový benzín bude obsahovať tieto 2 zložky v pomere 95:5. Čím vyššie je oktánové číslo paliva, tým nižšiu má z neho vytvorená zmes náchylnosť k detonovaniu.

Doterajšie merania boli uskutočnené za použitia 95 oktánového benzínu, na ktorý bol meraný motor nadimenzovaný. Pre ďalšie meranie bol použitý benzín s označením Maxxx Motion Premium Natural s deklarovaným oktánovým číslom 100.



Obr. 20 - Zmeny zaťaženia s horkým vzduchom, otáčky 5500min⁻¹

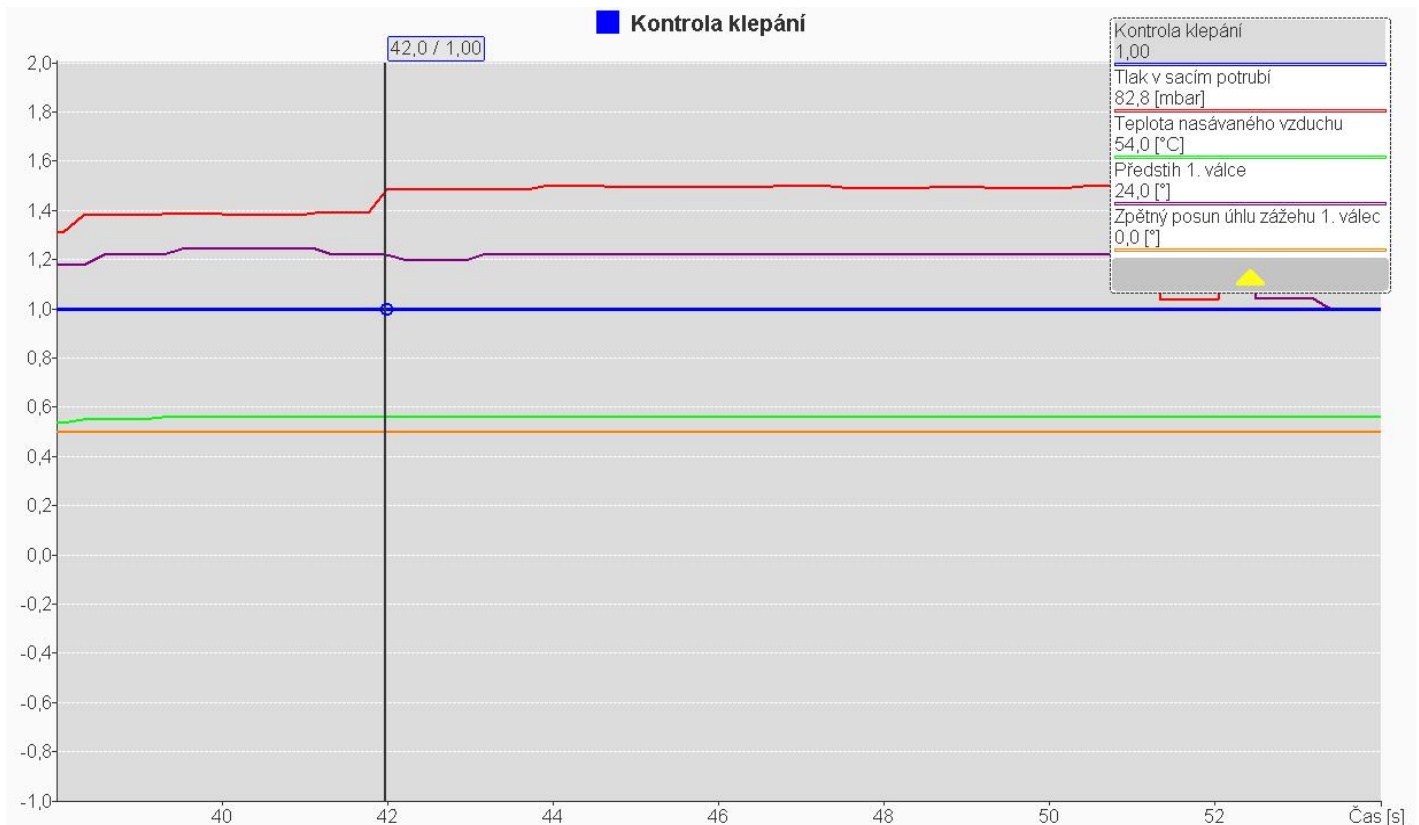
Motoru boli v tomto meraní nasimulované podmienky, ktoré v predošlých meraniach vykazovali najvyššie výskyt detonačného spaľovania. Obr. 19 zachytáva prudké zmeny zaťaženia dané výkyvmi tlaku v sacom potrubí [mbar](červená). Teplota nasávaného vzduchu bola 56.2°C, čo je hodnota, ktorá bežným podmienkam prevádzky nevyhovuje. Pri týchto podmienkach by mala byť hodnota spätného posunu uhlu zážihu rôzna od 0°.

Čas[s]	Tlak v sacom potrubí [mbar]	Teplota nasávaného vzduchu [°C]	Predstih 1. valca [°]	Spätný posun uhlu zážihu 1.válec [°]
90	974	56.2	21	0
91	915	56.2	21.8	0
91.9	160	56.2	35.2	0
92.9	965	56.2	40.5	0
95.5	962	56.2	21	0
95.7	611	56.2	21	0
96.7	959	56.2	37.5	0

Tabuľka 9 -Zmeny zaťaženia s horkým vzduchom, otáčky 5500min⁻¹

Motor sa s daným palivom nedostal do klepania ani pri opakovaných meraniach s prudkými zmenami zaťaženia.

Ďalšie meranie zachytáva zmeny predstihu pri ustálených otáčkach motoru a zaťažení. V tomto meraní bola taktiež zvýšená teplota nasávaného vzduchu. Pri opakovaných meraniach nebola sledovaná zmena predstihu, ani pri podmienkach ktoré detonáciám napomáhajú.



Obr. 21 - Ustálené zaťaženie 90%

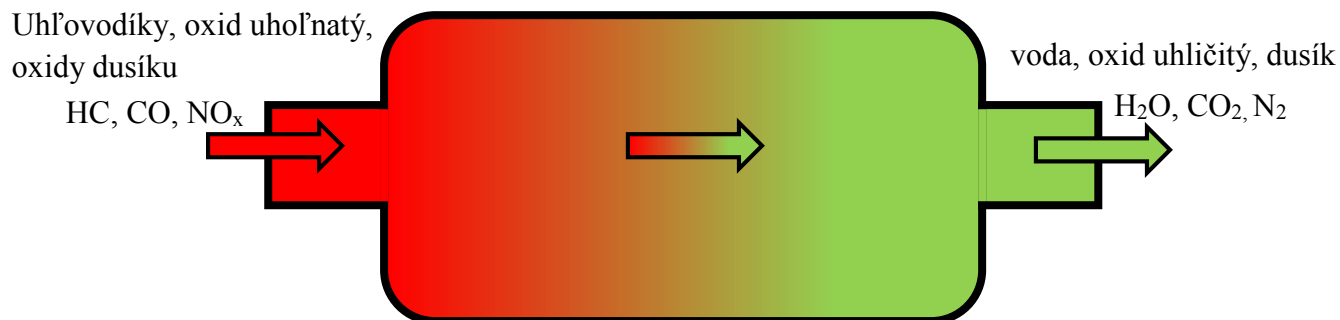
Je potrebné spomenúť, že za rovnakým podmienok ale s užitím 95 oktánového benzínu k detonačnému spaľovaniu dochádzalo vo vysokej miere. Predstih pre dané otáčky a zaťaženie si by mal byť podľa tabuľky 1 rovný 23.00°. V prípade tohto merania sa ustálil na hodnote 24°, čo dokazuje ako blízko k optimálnym podmienkam prevádzky sa dostal v tomto meraní motor použitím 100 oktánového benzínu.

Čas[s]	Tlak v sacom potrubí [mbar]	Teplota nasávaného vzduchu [°C]	Predstih 1. valca [°]	Spätný posun uhlu zážihu 1.válec [°]
42	828	54	24	0
46	831	54	24	0
50.6	833	54	24	0

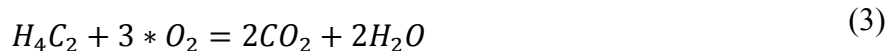
Tabuľka 10 - ustálené zaťaženie

7. Analýza emisií

Pre nasledujúce merania bol použitý motor 1.6 G4FC, vybavený nepriamym vstrekaním typu MPI. Táto pohonná jednotka bola použitá z dôvodu sledovania emisií, tvorených spaľovacím procesom. Merané vozidlo naďalej nemá katalyzátor.



Obr. 22 - Ideálny rozklad spalín v trojcestnom katalyzátore



Rovnice (2), (3) a (4) označujú ideálny rozklad jednotlivých plynov pomocou 3-cestného katalyzátora. Pri ideálnom rozklade by za katalyzátorom boli namerané iba hodnoty oxidu uhličitého (CO₂), dusíku (N₂) a bola by zaznamenaná prítomnosť vody (H₂O).

V reálnych meraniach je za katalyzátorom možné zaznamenať prítomnosť nespálených uhl'ovodíkov (HC) a oxidu uhoľnatého (CO). V prípade meraní uvedených v tejto práci, bude koncentrácia plynov vyššia kvôli chýbajúcemu katalyzátoru.

K meraniu emisií bola využitý Emisný analyzátor BOSCH BEA 050, ktorý ponúka meracia stanica Bosch FSA 740. Aby bolo možné objektívne zhodnotenie množstva plynov v emisiách za určitý čas, boli vyhotovené protokoly o meraní emisií vozidla so zážihovým motorom.

Pre dokázanie zvýšenej prítomnosti nežiadúcich plynov počas detonačného spaľovania, boli na vozidle uskutočnené 3 merania:

1. so zapojenou spätnou väzbou od snímača klepania a s bežnými prevádzkovými podmienkami,
2. so zapojenou spätnou väzbou od snímača klepania a so zvýšenou teplotou nasávaného vzduchu,
3. s odpojenou spätnou väzbou od snímača klepania a so zvýšenou teplotou nasávaného vzduchu.

Voľnobeh	Otáčky [min ⁻¹]	Obsah CO[%]	Obsah HC[ppm]	Obsah CO2[%]	Obsah O2[%]	Lambda[-]
Meranie 1	660	0.376	278	14.48	0.91	1.017
Meranie 2	660	0.445	284	14.4	0.951	1.016
Meranie 3	660	0.437	266	14.48	0.89	1.015

Tabuľka 11 - hodnoty plynov v emisiách pri voľnobežných otáčkach

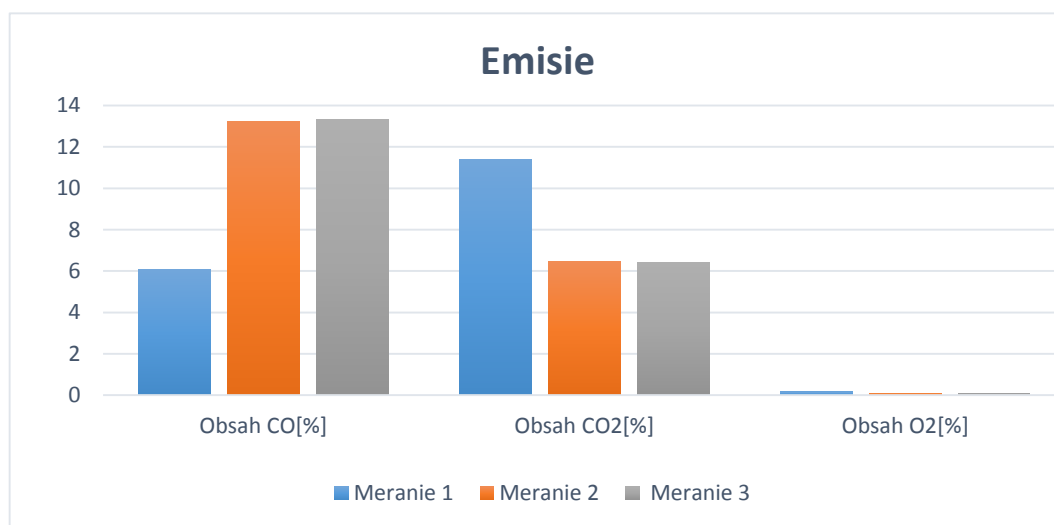
Zvýš.otáčky	Otáčky [min ⁻¹]	Obsah CO[%]	Obsah HC[ppm]	Obsah CO2[%]	Obsah O2[%]	Lambda[-]
Meranie 1	5210	6.076	115	11.41	0.17	0.84
Meranie 2	5180	13.23	183	6.49	0.08	0.65
Meranie 3	5190	13.3	209	6.44	0.07	0.647

Tabuľka 12 - hodnoty plynov v emisiách pri zvýšených otáčkach

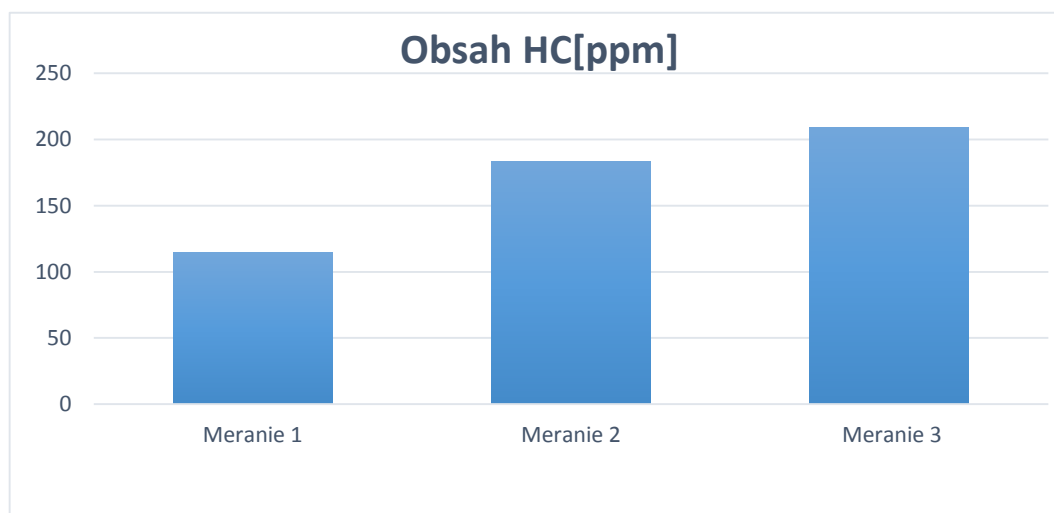
Prítomnosť zvýšeného množstva uhlíkov (HC) v meraniach 2 a 3 naznačuje, že v spalinách sa nachádza nedokonale prehorené palivo. K nedokonalému prehoreniu paliva dochádza pri detonačnom spaľovaní. Týmto meraním potvrdzujeme zhoršenie samotného spaľovacieho procesu následkom prítomnosti detonačného spaľovania.

Zvýšené hodnoty oxidu uhoľnatého (CO) sú následkom nepremeného oxidu uhoľnatého (CO) na oxid uhličitý (CO₂), čo je možné z časti pripísať chýbajúcemu katalyzátoru (bežne by u analyzovaného vozidla pri zaťažení s katalyzátorom mali byť emisii CO necelé 4% obj. a u vozidla bez katalyzátoru necelých 6% obj.). Čiastočne môžeme tento fakt pripísať aj zníženému množstvu kyslíku (O₂). Merania 2 a 3 so zvýšenou teplotou nasávaného vzduchu ukazujú zvýšene množstvo oxidu uhoľnatého (CO) v porovnaní s meraním 1.

Pri meraniach 2 a 3 (zvýšená teplota nasávaného vzduchu), dochádzalo k markantnému navýšeniu emisií oxidu uhoľnatého (CO), čo dokazuje okrem nedokonalého spaľovania uhoľovodíkov (HC) aj problém s dodávkou kyslíku pri horení zmesi.



Graf 2 – Obsah plynov v emisiách

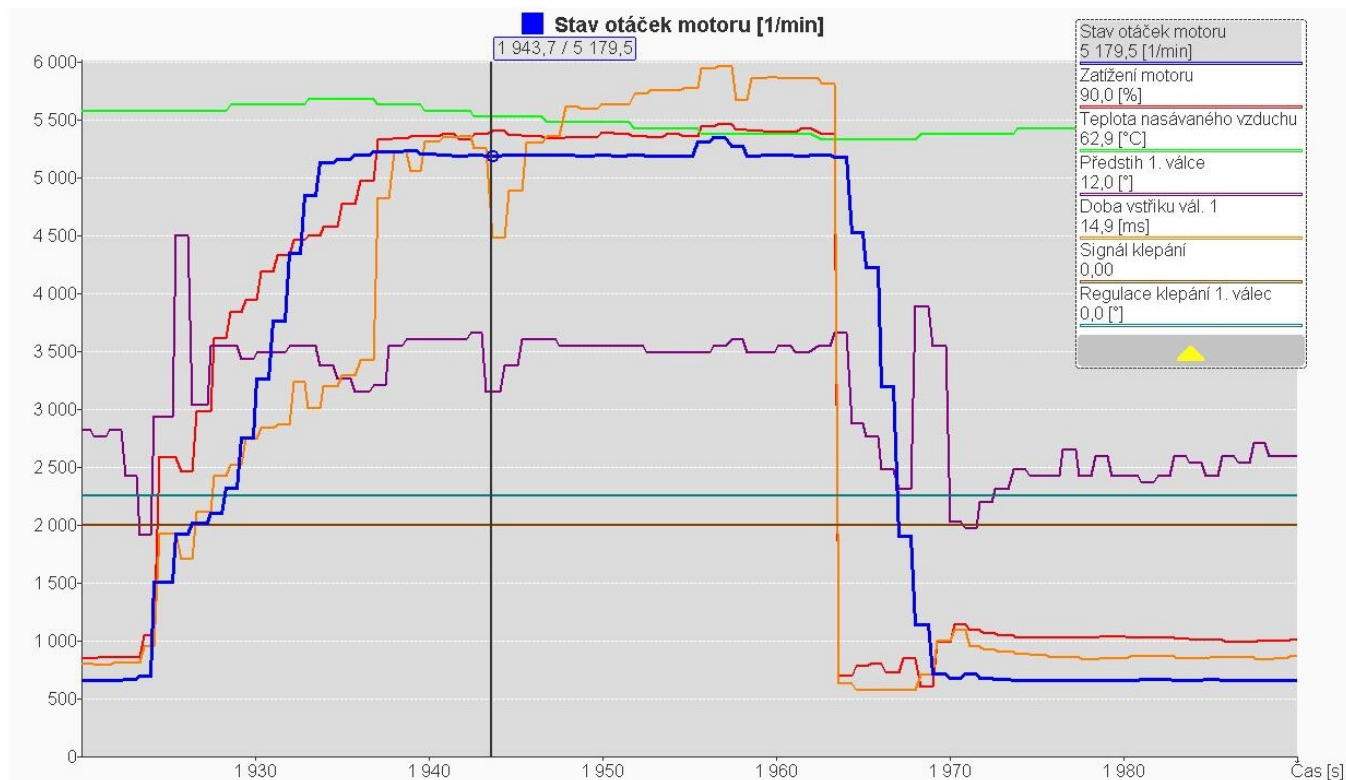


Graf 3 - Obsah uhoľovodíkov

Že ku regulácii klepania dochádzalo zachytáva obrázok 23, kde pri ustálenom zaťažení 90% (červená) a ustálených otáčkach 5180 min⁻¹ (modrá) dochádzalo k jasným výchylkám hodnôt predstihu (fialová).

Dané výchylky sú obdobami výchyliek pri regulácii predstihu pomocou spätného posunu uhlu zážihu. Pri tejto pohonnej jednotke však sériová diagnostika Bosch FSA 740 túto funkciu nepodporuje.

Fakt, že hodnoty signál klepání (hnedá) a regulácia klepání 1. válec (svetlomodrá) neboli vychýlené, nebol ďalej analyzovaný. Hodnoty sa nevychýlili ani pri sledovaní hodnôt regulácie ostatných valcov, pritom zmeny hodnôt predstihu sú zjavné.



Obr. 23 - Regulácia klepania pri meraní emisií

8. Záver

Cieľom tejto práce bola analýza regulačného obvodu klepania, analýza chovania zážihového motoru v stavoch klepania a v stavoch bežnej prevádzky, vrátane emisnej analýzy.

V úvodnej časti bolo samotné klepanie rozobraté teoreticky, ako aj jeho regulácia pomocou správnej hodnoty predstihu. Následne boli analyzované anomálie v oblasti predstihu v prípade zistenia detonačného spaľovania riadiacou jednotkou. Bol vytvorený aj predpoklad riadiaceho algoritmu pre konkrétny motor, ktorý je zachytený vo vývojovom diagrame.

Praktická časť meraní začala vytvorením mapy predstihu v ustálených stavoch zaťaženia a za ustálených otáčok. Táto mapa slúži ako súbor referenčných hodnôt, kedy ku detonáciám nedochádza. Ďalej nasledujú merania s rôznymi podmienkami pre vznikanie detonačného spaľovania. Základom týchto meraní boli určité teoretické predpoklady, ktoré boli následne overené prakticky. Výsledky meraní sú zhodnotené v príslušných kapitolách.

Uskutočnené boli rozsiahle merania emisií v stavoch klepania, kde bol sledovaný priebeh klepania nepriamo, pomocou hodnôt určitých zložiek výfukových plynov. Výsledky emisnej analýzy sú v príslušnej kapitole v tejto práci a časť je dodaná v prílohách.

Ako posledná bola vytvorená laboratórna úloha, ktorá by mala študentom pri praktickej výuke princípov elektronického riadenia zážihového motoru priblížiť tematiku detonačného spaľovania.

V závere je možné konštatovať, že boli splnené všetky body zadania bakalárskej práce.

9. Zoznam použitej literatúry a zdrojov

- [1] Advanced Automotive Fault Diagnosis, 2nd Edition. USA 2004, Butterworth-Heinemann Ltd. 2006, 288 p., ISBN 0-7506-6991-8
- [2] RIBBENS, B., W.: Understanding Automotive Electronics, Sixth Edition, USA 2003, Elsevier Science, 480p., ISBN 0-7506-7599-3
- [3] Elektronika v motore, Robert Bosch GmbH, D70442 Stuttgart DE 1990, ISBN 80-967761-0-X
- [4] Osciloskop a jeho využití v autoopravarské praxi, Štěpán Jičínský, ISBN 82-247-1417-5
- [5] Brandštetter, P.: Elektronika. Učební texty pro kombinované a distanční studium. VŠB-TU Ostrava, 2010.
- [6] Robert Bosch GmbH: Bosch odborné příručky – žlutá řada, Bosch technická literatura, 1996-2014
- [7] Šimoník, P.: Elektronické systémy automobilů, Učební texty pro kombinované a distanční studium, VŠB – TU Ostrava, 2015
- [8] Štěřba, P.: Elektronika a elektrotechnika automobilů: Elektrická zařízení, diagnostika a odstraňování závad. Praha 2004, Computer Press, ISBN 80-251-0211-4
- [9] Vlk, F.: Elektrická zařízení motorových vozidel. Prof. Ing. František Vlk, DrSc., nakladatelství a vydavatelství, Brno 2005, ISBN 80-239-3718-9
- [10] F.: Elektronické systémy motorových vozidel 1, 2. Prof. Ing. František Vlk, DrSc., nakladatelství a vydavatelství, Brno 2002, ISBN 80-238-7282-6

10. Zoznam príloh

- A. Typizovaná laboratórna úloha
- B. Protokoly o meraní emisií vozidla so zážihovým motorom
- C. Záznamy z merania emisií