

**Sledování vztahu hodnot charakteristických veličin  
a provozuschopnosti Wankelova motoru**

**Diplomová práce**

**Vedoucí diplomové práce:**

**prof. Ing. Jan Mareček, DrSc., dr. h. c.**

**Vypracoval:**

**Bc. Milan Král**

**Brno 2017**



## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci: **Přílohy** vypracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace jsou uvedeny v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů, a v souladu s platnou *Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací*.

Jsem si vědom, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., zákon o právu autorském, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity o tom, že předmetná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně dne 27. 5. 2017

---

Rád bych na tomto místě poděkoval za odborné připomínky a vedení této práce prof. Ing. Janu Marečkovi, DrSc., dr. h. c. Dále všem, kteří mne podporovali, Jiřímu Benešovi za spolupráci při měření, své přítelkyni RNDr. Ireně Bartoňové za jazykovou kontrolu a Mgr. Aleně Bartoňové za vedení při zpracování statistiky.

**Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá vztahy mezi relevantními charakteristickými veličinami a provozuschopností Wankelova motoru. Jsou popsány příčinné souvislosti mezi opotřebením vrcholových těsnících lišt, skříň rotoru a uložení klikové hřídele z důvodu nedodržení specifické servisní údržby, která je pro tento motor klíčovým předpokladem bezproblémové funkce. V práci je analyzován vztah mezi počtem ujetých kilometrů a tlaky na jednotlivých plochách pístů motoru.

**Klíčová slova**

Wankel, rotační motor, rotor, skříň rotoru, hřídel, vrcholová lišta, kompresní tlak plochy pístu (rotoru).

**Abstract**

The thesis deals with the relations between the relevant characteristic variables and the operability of Wankel engine. There is a causal link between the wear of the rotor apex seals, the rotor housing and the crankshaft bearing due to non-compliance with the specific maintenance service, which is a key factor for trouble-free operation of this type of engine. The relationship between the number of kilometers traveled and the compression values on individual surfaces of the rotors are also analyzed.

**Keywords**

Wankel, rotary engine, rotary piston, piston, rotor housing, shaft, apex seal, Compression pressure of the piston (rotor) surface.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>Rotační motor</b>	<b>11</b>
2.1	Vývoj rotačního motoru.....	11
2.2	Popis funkce .....	13
2.3	Srovnání klasického a Wankelova motoru.....	14
2.4	Výhody a nevýhody .....	15
2.5	Použití Wankelova motoru.....	17
<b>3</b>	<b>Testy kompresních tlaků</b>	<b>19</b>
3.1	Testy komprese a jejich rozdílnost oproti klasickému motoru.....	19
3.2	Kompresiometry.....	20
3.3	Možné chyby při měření kompresních tlaků.....	22
3.4	Závislost funkce motoru na naměřených hodnotách kompresních tlaků..	24
<b>4</b>	<b>Praktická část a výsledky měření</b>	<b>27</b>
4.1	Metodika měření kompresních tlaků a zpracování údajů.....	27
4.2	Výsledky měření kompresních tlaků zkoumaných motorů.....	28
4.3	Sumarizace měření kompresních tlaků .....	31
4.4	Provozní schopnost jednotlivých zkoumaných motorů .....	32
4.5	Rozdíly kompresních tlaků na předních a zadních pístech .....	33
4.6	Závislost kompresních tlaků motorů na počtu ujetých kilometrů.....	35
<b>5</b>	<b>Diskuze</b>	<b>37</b>
<b>6</b>	<b>Závěr</b>	<b>38</b>
<b>7</b>	<b>Seznam použité literatury</b>	<b>40</b>

---

## Seznam obrázků

Obr. 1	Wankelův motor Zdroj: vfr800.mysteria.cz	12
Obr. 2	Kompresiometr RCT V5 Zdroj: vlastní fotografie	21
	Kompresiometr ReCT-TRTa Zdroj: vlastní fotografie	22
Obr. 3	Tabulka přepočtu kompresních tlaků Zdroj vlastní zpracování v programu Open Office – Calc	23
Obr. 4	Graf závislosti naměřeného kompresního tlaku na otáčkách měřeného motoru Zdroj: servisní manuál Mazda Motor Corporation	24
Obr. 5	Krabicový graf (zdroj: vlastní zpracování v programu EXCEL)	34
Obr. 6	Graf závislosti kompresních tlaků jednotlivých pístů na počtu ujetých kilometrů. (zdroj: vlastní zpracování v programu EXCEL)	35
Obr. 7	Graf závislosti kompresních tlaků na počtu ujetých kilometrů. (zdroj: vlastní zpracování pomocí programu EXCEL)	36
Obr. 8	Viditelné poškození hrany pístu	41
Obr. 9	Poškození uložení těsnící lišty a boční hrany pístu	42
Obr. 10	Kliková hřídel. Poškození uložení klikové hřídele	43
Obr. 11	Vnitřní ozubení pístu	44
Obr. 12	Píst motoru, zřetelná karbonizace	45
Obr. 13	Uložení pístu	46
Obr. 14	Graf měření kompresních tlaků pístu (1) a (2) motoru č. 1	46
Obr. 15	Graf měření kompresních tlaků pístu (1) a (2) motoru č. 2	47
Obr. 16	Graf měření kompresních tlaků pístu (1) a (2) motoru č. 3	47

---

<b>Obr. 17</b>	<b>Graf měření kompresních tlaků pístu (1) a (2) motoru č. 4</b>	<b>48</b>
<b>Obr. 18</b>	<b>Graf měření kompresních tlaků pístu (1) a (2) motoru č. 5</b>	<b>48</b>
<b>Obr. 19</b>	<b>Graf měření kompresních tlaků pístu (1) a (2) motoru č. 6</b>	<b>49</b>
<b>Obr. 20</b>	<b>Graf měření kompresních tlaků pístu (1) a (2) motoru č. 7</b>	<b>49</b>
<b>Obr. 21</b>	<b>Graf měření kompresních tlaků pístu (1) a (2) motoru č. 8</b>	<b>50</b>
<b>Obr. 22</b>	<b>Graf měření kompresních tlaků pístu (1) a (2) motoru č. 9</b>	<b>50</b>
<b>Obr. 23</b>	<b>Graf měření kompresních tlaků pístu (1) a (2) motoru č. 10</b>	<b>51</b>



---

## Seznam tabulek

<b>Tab. 1</b>	<b>Příklad tabulky zaznamenávající hodnoty kompresních tlaků ploch pístu [kPa] při 250 [min<sup>-1</sup>], počet ujetých [km] a datum měření.</b>	<b>22</b>
<b>Tab. 2</b>	<b>Měření č. 1</b>	<b>28</b>
<b>Tab. 3</b>	<b>Měření č. 2</b>	<b>28</b>
<b>Tab. 4</b>	<b>Měření č. 3</b>	<b>29</b>
<b>Tab. 5</b>	<b>Měření č. 4</b>	<b>29</b>
<b>Tab. 6</b>	<b>Měření č. 5</b>	<b>29</b>
<b>Tab. 7</b>	<b>Měření č. 6</b>	<b>29</b>
<b>Tab. 8</b>	<b>Měření č. 7</b>	<b>30</b>
<b>Tab. 9</b>	<b>Měření č. 8</b>	<b>30</b>
<b>Tab. 10</b>	<b>Měření č. 9</b>	<b>30</b>
<b>Tab. 11</b>	<b>Měření č. 10</b>	<b>31</b>
<b>Tab. 12</b>	<b>Souhrnné výsledky měření</b>	<b>31</b>
<b>Tab. 13</b>	<b>Vyhodnocení provozuschopnosti měřených motorů</b>	<b>33</b>

# 1 Úvod

Tato práce jednak popisuje obecné postupy měření, diagnostiky a oprav, které jsou specifické pro rotační - Wankelův motor a dále zaznamenává praktické zkušenosti s provozem a opravami Wankelova motoru. Soustředuje se na specifické problémy a souvislosti s danou tematikou. Shrnuje poznatky měření specifických veličin, zaznamenává je a díky dlouholeté praktické zkušenosti s používáním Wankelova motoru podává co nejucelenější obraz o provozuschopnosti automobilů s tímto typem motoru v závislosti na kvalitě prováděného servisu. Veškerá měření byla prováděna podle postupů daných specifickostí konstrukce motoru a v souladu s požadavky dnes prakticky jediného sériového výrobce firmou Mazda motor corporation Japonsko. Údaje a naměřené hodnoty byly zaznamenávány do měřicích protokolů, jež jsou součástí této práce.

---

## 2 Rotační motor

### 2.1 Vývoj rotačního motoru

Felix Wankel na myšlenku motoru s rotačním pístem přišel už v roce 1924 a po roce 1926 začal pracovat ve vlastní konstruktérské dílně, která vyvíjela součástky hlavně pro letecké motory. Za války pracoval přímo pro armádu. Vynálezy jeho dílny našly uplatnění v leteckých motorech a zbraňových systémech, zejména pak novátorské typy těsnění a rotační ventily.

Na konci války byla ale Wankelova dílna zničena a sám konstruktér byl znovu zatčen a uvězněn. Veškerá dokumentace byla zabavena a říká se, že kdyby Wankel nepřišel o své nákresy, výpočty a poznámky, jeho motor by se prosadil mnohem dříve. Po propuštění začal znovu pracovat a v roce 1951 se dočkal podpory od Sdružení německých průmyslníků, které pomohlo zainvestovat nové vývojové centrum v Lindau. To už se Felix Wankel plně věnoval myšlence sestrojení motoru s rotačním pístem. V roce 1957 vznikl první první prototyp motoru s rotujícím pístem pod názvem Drehkolbenmotor (DKM54). U něj rotoval nejen píst, ale i samotný blok. Prototyp byl schopen dosáhnout až 17 000 [min<sup>-1</sup>]. Byl ale konstrukčně příliš složitý. Např. pro výměnu svíčky se musel celý motor rozebrat.



Obr. 1 Wankelův motor  
Zdroj: vfr800.mysteria.cz

Prvním Wankelem v podobě, který se používá dodnes, byl až další typ, tzv. Kreis-kolbenmotor z roku 1958. Tento motor používá stacionární blok a krouživý píst.

Licenci na výrobu Wankelova motoru si zakoupilo několik automobilek. První automobil s rotačním motorem byl NSU Spider představený v roce 1963.

Po neúspěchu ve vozech NSU prakticky Wankelův motor z Evropy zmizel, ale japonská Mazda se ho držela stále.

Mazda investovala do vývoje značné sumy a postupem času dokázala zbavit motor s rotačním pístem všech známých neduhů. Zůstala jen vyšší spotřeba oleje a benzínu. Nicméně na závodní dráze motor sklízel úspěchy a například při 24h Le Mans v roce 1991 s ním Mazda 787B zvítězila. Bylo to první, ale také jediné vítězství jiného než klasického spalovacího pístového motoru v Le Mans. (autoweb)

V současné době automobilka Mazda intenzivně pracuje na dokončení vývoje zcela nového rotačního motoru, který využívá všech výhod stávající koncepce motoru, ale současně reaguje na přísné emisní normy. Wankelův motor s přímým vstřikováním připravila Mazda pro novou verzi Mazdy RX7. Nese označení Renesis16X a přináší tyto změny:

zlepšení spalovacího prostoru, méně chladných míst

zvýšení objemu jedné komory na [800 cm<sup>3</sup>]

zavedení přímého vstřikování, které sníží spotřebu paliva a produkci emisí

snížení hmotnosti motoru

zvýšení točivého momentu v nižších otáčkách

(Hromádko J. 2012)

## 2.2 Popis funkce

Wankelův motor s rotačním třívrcholovým pístem se liší od klasického pístového motoru především tím, že nepotřebuje složitý klikový mechanismus pro převod posuvného pohybu na otáčivý. Rotační motor je navíc téměř dokonale vyvážen, takže chod motoru je tichý a kultivovaný. Wankelův motor je velmi lehký, konstrukčně jednoduchý, až primitivní.

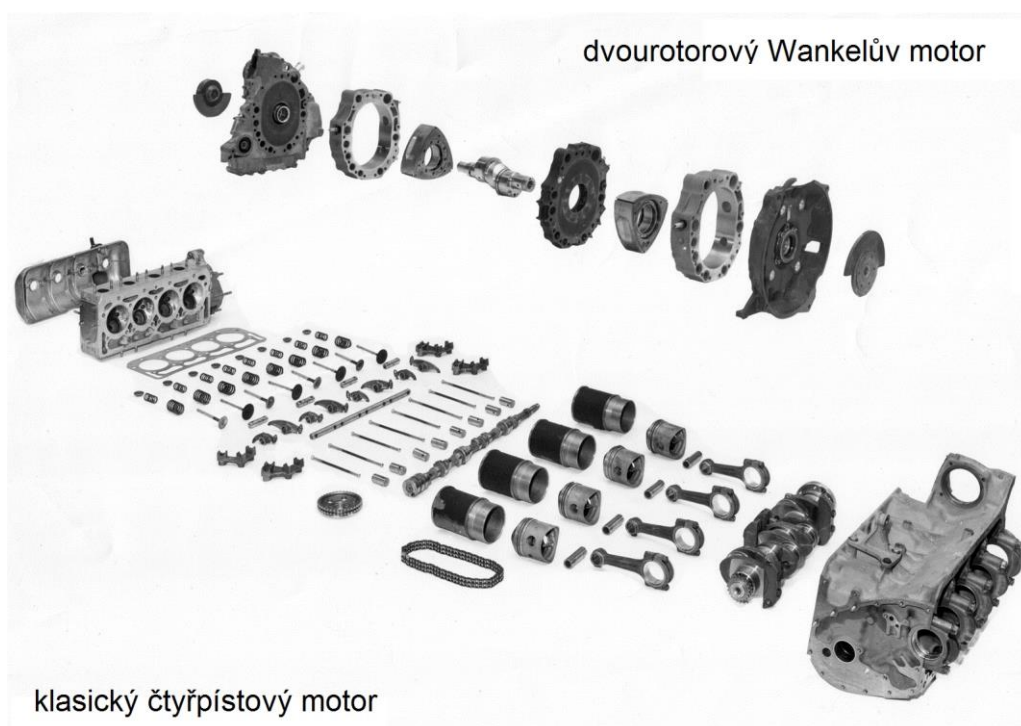
Na rozdíl od pístového motoru, který může provádět v daném okamžiku jen jednu činnost – sání, stlačení, expanzi a pak výfuk, v případě motoru Wankel jsou všechny čtyři doby prováděny současně (obr. 1). Z počátku se experimentovalo jak s dvouvrcholovým pístem, tak i se čtyřvrcholovým, ale nakonec právě třívrcholové uspořádání se ukázalo jako nejlepší – rotační píst tedy připomíná tvarem „nafouklý trojúhelník. Výhodou motoru s rotačním pístem je jeho konstrukční jednoduchost. Právě díky absenci vačkové hřídele a klikového mechanismu zabírá celá konstrukce velmi málo místa a je lehká, proto našla své uplatnění i v motocyklech.

## 2.3 Srovnání klasického a Wankelova motoru

Wankelův – rotační motor má oproti klasickému Ottovu motoru díky své konstrukci, jednoduchosti, kompaktnosti a malému množství součástí nízkou hmotnost. Odpadají rázy spojené s přeměnou přímočarého pohybu na rotační.

Wankelův motor s rotačním třívrcholovým pístem se liší od klasického pístového motoru především tím, že nepotřebuje složitý klikový mechanismus pro převod posuvného pohybu na otáčivý. Rotační motor je navíc téměř dokonale vyvážen, takže chod motoru je tichý a kultivovaný. Wankelův motor je velmi lehký, konstrukčně jednoduchý, až primitivní.

Na rozdíl od pístového motoru, který může provádět v daném okamžiku jen jednu činnost – sání, stlačení, expanzi a pak výfuk, v případě motoru Wankel jsou všechny čtyři doby prováděny současně. Wankelův motor dosahuje také mnohem vyšších otáček než klasický. U původního typu DKM to bylo až 17000 [min<sup>-1</sup>], dnešní motory mají běžně až 9000 [min<sup>-1</sup>].



1. Vyobrazení rozdílu Wankelova a klasického motoru  
Zdroj: citroenet.org.uk (2005)

## 2.4 Výhody a nevýhody

Zatímco byl zpočátku Wankelův motor přijímán s nadšením, postupem času začaly vyplouvat na povrch jeho hlavní nedostatky – vyšší spotřeba paliva a oleje a kupodivu i nižší spolehlivost, která právě měla být jeho hlavní výhodou vyplývající z konstrukční jednoduchosti.

Problém Wankelova motoru spočívá v tom, že jeho spalovací prostor nemá kompaktní tvar a výhodný poměr mezi povrchem a objemem. A to způsobuje ztrátu tepla (energie), která se projevuje vyšší spotřebou paliva (spalováním benzínu vzniká teplo – energie).

---

Wankelův motor také vykazuje velkou spotřebu oleje. Ovšem nejzávažnějším problémem bylo velké opotřebenění pístů a komory, což vedlo k reklamacím prvních aut. Během počátečních let se podařilo problémy s těsněním pístu a s jeho opotřebením vyřešit. (zdroj: autoweb).

Nevýhodou této konstrukce je nemožnost rovnoměrného chlazení jednotlivých celků. Dochází tím k rozdílům teplot u bloků na straně hoření a výfuku a na straně sání. Zdaleka největší problém nastává s utěsněním pracovních komor. Ty jsou potřeba utěsnit jak v radiální, tak v axiální ose. V důsledku opotřebenění těsnících lišt dochází ke snižování kompresních tlaků jednotlivých komor a tím i ke snížení výkonu motoru a jeho provozuschopnosti. Opotřebením těsnících lišt dochází rovněž ke karbonizaci prostoru uložení lišty a prostoru pod ní a tím i ke snížení přitlaku lišty.

K velkým slabinám Wankelu vždy patřila vysoká spotřeba paliva. Při jeho zdvihovém objemu to může znít jako nesmysl, důvod je ale jinde, v řešení samotného motoru a jeho termální účinnosti. Spalovací komora se totiž u Wankelu pohybuje směrem od svíček, a tak plamen musí urazit poměrně dlouhou vzdálenost, než všechna směs v ní shoří. A než se tak stane, zbytek nespálené směsi vyletí ven výfukovým otvorem. Proto jsou u aut s Wankely časté plameny z výfuku - všechno palivo zkrátka nestihne shořet, než rotační píst odkryje výfukový otvor.

Když se podíváme na srovnání spotřeby prvního modelového roku Mazdy RX-8 a dalších aut, zjistíme, že RX-8 je na tom se spotřebou dle realistických norem americké EPA hůře než Chevrolet Corvette, který byl v té době v generaci C5 a měl 5,7litrový osmiválec. Srovnání s Golfem V GTI, podobně výkonným autem, vyznívá pro RX-8 ještě hůře. (www.autoforum.cz).

Wankelův motor má ale stále i řadu výhod. Je to především jeho jednoduchá konstrukce, tichý a hladký chod. Motor nepotřebuje ventily, kliky, vačkové hřídele a další součástky, které obsahuje klasický motor. To vede k jednodušší údržbě. Ne-



---

hrozí zničení motoru v případě selhání některé části. Motor je mnohem menší a lehčí než pístový motor.

Vzhledem k tomu, že v motoru nedochází k vratnému pohybu, ale pouze k pohybu rotačnímu, je jeho chod nesrovnatelně hladší než u běžného motoru. Díky tomu také dosahuje mnohem větších otáček.

## 2.5 Použití Wankelova motoru

Rotační motor se díky jeho jednoduchosti a malému zastavitelnému prostoru začal používat v automobilovém, motocyklovém, leteckém i lodním průmyslu. V automobilovém průmyslu hned jeho první velká aplikace ve voze NSU Ro80 poukázala na jeho nevýhody. Lépe dopadlo použití v modelech značky, kterou si dnes s Wankelem spojujeme skoro automaticky - v Mazdách. Mnoho příznivců si získal zejména v modelech RX-7 a RX-8. Dvourotorový Wankel v RX-8 měl až 241 koní při objemu pouze 1,3 litru bez turbodmychadla. Motor zvládal až 9000 [min<sup>-1</sup>].

Mazda RX-8 se udržela ve výrobě asi devět let a měla dvě generace. Ty se od sebe lišily jen trochu, ale přesto dost na to, aby ta novější byla pevnější ve zkrutu a měla lepší zrychlení. Klíčem k jejímu úspěchu ale nebyl to ani její design, ale byl to právě motor. Přesto se RX-8 stala posledním produkčním autem s Wankelovým motorem na světě. Na jednom z posledních autosalónů Mazda představila nejnovější model s rotačním motorem. Jeho pracovní název je Mazda RX-Vision, případně RX-9. Mazda prozatím neoznámila začátek sériové výroby tohoto modelu.

Kromě automobilů se očekávala velká budoucnost tohoto motoru ve výrobě motocyklů. Wankelův motor měl nahradit dosud používaný dvoutakt. Používalo ho například sdružení IFA, Fichtel a Sachs v motocyklu Hercules nebo Suzuki. Sériově se však motocykly začaly vyrábět až za deset let po automobilech. Po několika letech se definitivně od jeho použití upustilo. (Král, 2015).

Výše popisované nevýhody použití rotačních motorů časem převážily, a tak se kromě připravovaného modelu Mazdy RX-Vision od použití rotačních motorů v průmyslové výrobě upustilo, jeho návrat ovšem je možný v případě konstrukčních změn a dalšího vylepšení.

## 3 Testy kompresních tlaků

### 3.1 Testy komprese a jejich rozdílnost oproti klasickému motoru

Test kompresního tlaku u Wankelova motoru nemůže být proveden pomocí standardního analogového testeru kompresí pro pístové motory.

Analogový tester pístového motoru je jednoduše našroubován nebo přitlačen místo zapalovací svíčky. Při měření je hodnota kompresního tlaku odečtena z ukazatele. Záznam hodnoty tlaku v konkrétním měřeném válci je vynesena na registrační štítek kompresimetru. Měření se provede pro každý válec zvlášť.

U rotačního motoru je měření kompresního tlaku provedeno jinak. U rotačního motoru máme jednu svíčku a tři měřené plochy pístu, a tedy tři naměřené hodnoty komprese za jednu otáčku. Neexistuje žádný způsob, jak by mohl jednoduchý analogový tester zaznamenávat každou hodnotu nezávisle na tom, jak se otáčí hřídel. Vždy bude zaznamenána jen jedna nejvyšší naměřená hodnota.

U pístových motorů není velký rozdíl v měření komprese při malých a vyšších otáčkách. Rotační motor má více prostorů, kudy může tlak unikat a je velice reálný rozdíl v tom, při jakých otáčkách kompresi měříme. Čím vyšší otáčky motoru, tím jsou naměřené hodnoty vyšší. Dokonce při 9000 [min<sup>-1</sup>] je možné zcela odstranit těsnící lištu pístu a budeme mít dostatek komprese pro to, aby motor běžel. Mimo toho, že potřebujeme měřit kompresní tlak pro tři kompresní plochy během jedné otáčky, je navíc vyžadováno měřit je za konstantních otáček. Nebo je alespoň mít možnost relevantně přepočítat. Přesnost měření je zde mimořádně důležitá. Kompresimetry pro měření rotačního Wankelova motoru byly vybaveny pouze specializované servisy značky Mazda. V České republice řeší opravy v rámci záruky 100000 [km] nebo tří let od koupě vozu výměnou celého bloku motoru za nový. Prakticky se profesionální opravou Wankelova motoru nezabýval nikdo z oficiální distribuce a servisu českého zastoupení Mazdy.

V roce 2003 byl na trh uveden model RX-8 s modifikovanou a vylepšenou verzí Wankelova motoru RENESIS (Rotary Engine geNESIS), v němž se konstruktéři společnosti Mazda snažili o udržení výkonu s předchozí verzí FD s turbodmychadlem na jedné straně a o snížení emisí na straně druhé. Při konstrukci na rozdíl od předchozích verzí montovaných motorů, jež používaly boční sání a periferní výfukové otvory bylo použito u motoru RENESIS sacích i výfukových otvorů v bočních skříních. To eliminuje překrývání otevření sacích a výfukových otvorů a zvyšuje účinnost spalování.

Pro takto modifikovaný motor RENESIS je zapotřebí mít modernější měřicí přístroje, které jsou reálně dostupné pouze na americkém trhu. Ten je na rozdíl od evropského mnohem větší a zároveň zkušenější z hlediska oprav a servisů tohoto motoru.

### **3.2 Kompresiometry**

Pro měření tlaků jednotlivých ploch pístu motoru bylo použito kompresiometru od společnosti ROTARY COMPRESSIRON TESTER RCT – V5 (obr. 3). Ten není vybaven přepočtem naměřeného tlaku na 250 [min<sup>-1</sup>]. Pokud by kompresiometr nebyl schopen zaznamenat hodnoty kompresních tlaků na pístu jednotlivě, nebylo by možné zjistit stav motoru. Hodnota tlaku na ukazateli kompresiometru je uvedena v [kPa]. Pokud nelze měřit všech šest kompresních tlaků na plochách pístů a nejsme schopni přepočítat na požadované otáčky hřídele [RPM], není možné správně stanovit diagnózu a stav jednotlivých rotorů a těsnících lišt. V takovém případě nelze posoudit ani celkovou provozuschopnost motoru. Stav komprese můžeme měřit rovněž v jednotkách [psi], které jsou dodávány především pro americký trh. Hodnota [RPM] na ukazateli kompresiometru udává počet otáček hřídele rotoru, při kterých tlak měříme.



Obr. 2 Kompresiometr RCT V5  
Zdroj: vlastní fotografie

Naměřené hodnoty kompresních tlaků a otáčky motoru jsou vyobrazeny na displeji. Hodnoty jsou přepsány do tabulky měřených kompresních tlaků.

Dalším použitým měřicím přístrojem je kompresiometr od společnosti **Rotary Diagnostics Systems** model **ReCT-TRTa, Two-rotor Tester** (obr. 4). U tohoto kompresiometru jsou zaznamenávány hodnoty v digitální formě. Pro zobrazení dat byl použit program WINDAQ. Při měření získáme šest hodnot, tři pro každý píst. Každá z hodnot udává kompresní jednotlivý tlak plochy pístu. Hodnota kompresního tlaku je udaná v [kPa] a vztažena na 250 [min<sup>-1</sup>].



Kompresiometr ReCT-TRTa

Zdroj: vlastní fotografie

Tento kompresiometr naměří kompresní tlaky všech třech ploch pístu a na obou pístech současně. Hodnoty kompresních tlaků se zobrazují v [kPa].

Tab. 1 Příklad tabulky zaznamenávající hodnoty kompresních tlaků ploch pístu [kPa] při 250 [min<sup>-1</sup>], počet ujetých [km] a datum měření.

28	kompresní tlak plochy č. 1 [kPa]	kompresní tlak plochy č. 2 [kPa]	kompresní tlak plochy č. 3 [kPa]	průměrný kompresní tlak pístu [kPa]	rozdíl tlaků pístů [kPa]	kompresní tlak motoru [kPa]
přední píst (1)	<b>689</b>	<b>648</b>	<b>674</b>	670	84	629
zadní píst (2)	<b>571</b>	<b>592</b>	<b>597</b>	587		
22000						
25.2.12						

Zdroj: Vlastní zpracování v programu EXCEL

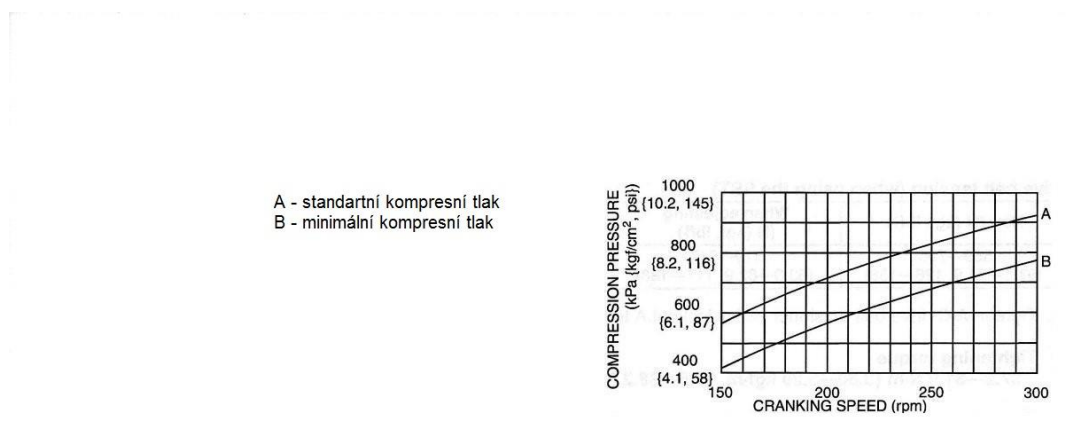
### 3.3 Možné chyby při měření kompresních tlaků

Pokud je test komprese proveden nesprávně, může to znamenat špatné hodnoty směrem nahoru nebo dolů. Pokud je stav oleje v motoru vyšší, než je požadováno,

bude neměřeno vyšších hodnot kompresních tlaků. Pokud nebyl test kompresního tlaku proveden při 250 [min<sup>-1</sup>], tak hodnoty tlaku, které jsou naměřeny, je třeba přepočítat na standardizovanou hodnotu 250 [min<sup>-1</sup>]. Použijeme kalkulačku Mazdy. Foxed.ca - Kalkulačka komprese rotoru.

		Tabulka přepočtu kompresních tlaků																
63.9	4.4	441	5.70	5.50	5.40	5.20	5.10	5.00	4.90	4.70	4.60	4.50	4.40	4.30	4.20	4.10	4.10	4.00
14.2	4.5	97.9	5.80	5.60	5.50	5.30	5.20	5.10	5.00	4.80	4.70	4.60	4.50	4.40	4.30	4.20	4.20	4.10
66.7	4.6	460	6.00	5.70	5.60	5.40	5.30	5.20	5.10	4.90	4.80	4.70	4.60	4.50	4.40	4.30	4.30	4.20
68.2	4.7	470	6.10	5.90	5.80	5.50	5.40	5.30	5.20	5.00	4.90	4.80	4.70	4.60	4.50	4.40	4.40	4.30
69.6	4.8	480	6.20	6.00	5.90	5.70	5.60	5.40	5.30	5.10	5.00	4.90	4.80	4.70	4.60	4.50	4.50	4.40
71	4.9	490	6.30	6.10	6.00	5.80	5.70	5.60	5.40	5.20	5.10	5.00	4.90	4.80	4.70	4.60	4.60	4.40
72.4	5	499	6.50	6.20	6.10	5.90	5.80	5.70	5.60	5.30	5.20	5.10	5.00	4.90	4.80	4.70	4.60	4.50
73.8	5.1	509	6.60	6.40	6.20	6.00	5.90	5.80	5.70	5.40	5.30	5.20	5.10	5.00	4.90	4.80	4.70	4.60
75.3	5.2	519	6.70	6.50	6.40	6.10	6.00	5.90	5.80	5.50	5.40	5.30	5.20	5.10	4.90	4.90	4.80	4.70
76.7	5.3	529	6.80	6.60	6.50	6.20	6.10	6.00	5.90	5.60	5.50	5.40	5.30	5.20	5.00	5.00	4.90	4.80
78.1	5.4	539	7.00	6.70	6.60	6.40	6.20	6.10	6.00	5.70	5.60	5.50	5.40	5.30	5.10	5.10	5.00	4.90
79.5	5.5	548	7.10	6.80	6.70	6.50	6.30	6.20	6.10	5.80	5.70	5.60	5.50	5.40	5.20	5.20	5.10	5.00
80.9	5.6	558	7.20	7.00	6.80	6.60	6.50	6.30	6.20	6.00	5.80	5.70	5.60	5.40	5.30	5.20	5.20	5.10
82.4	5.7	568	7.30	7.10	7.00	6.70	6.60	6.40	6.30	6.10	5.90	5.80	5.70	5.50	5.40	5.30	5.30	5.20
83.8	5.8	578	7.50	7.20	7.10	6.90	6.70	6.60	6.40	6.20	6.00	5.90	5.80	5.60	5.50	5.40	5.40	5.20
85.2	5.9	587	7.60	7.30	7.20	7.00	6.80	6.70	6.50	6.30	6.10	6.00	5.90	5.70	5.60	5.50	5.50	5.30
86.6	6	597	7.70	7.50	7.30	7.10	6.90	6.80	6.60	6.40	6.20	6.10	6.00	5.80	5.70	5.60	5.60	5.40
88	6.1	607	7.80	7.60	7.40	7.20	7.00	6.90	6.70	6.50	6.30	6.20	6.10	5.90	5.80	5.70	5.60	5.50
89.5	6.2	617	8.00	7.70	7.60	7.30	7.10	7.00	6.80	6.60	6.40	6.30	6.20	6.00	5.90	5.80	5.70	5.60
90.9	6.3	627	8.10	7.80	7.70	7.40	7.30	7.10	6.90	6.70	6.50	6.40	6.30	6.10	6.00	5.90	5.80	5.70
92.3	6.4	636	8.20	7.90	7.80	7.50	7.40	7.20	7.10	6.80	6.60	6.50	6.40	6.20	6.10	6.00	5.90	5.80
93.7	6.5	646	8.40	8.10	7.90	7.60	7.50	7.30	7.20	6.90	6.70	6.60	6.50	6.30	6.20	6.10	6.00	5.90
95.1	6.6	656	8.50	8.20	8.00	7.70	7.60	7.40	7.30	7.00	6.80	6.70	6.60	6.40	6.30	6.20	6.10	6.00
96.6	6.7	666	8.60	8.30	8.20	7.90	7.70	7.60	7.40	7.10	7.00	6.80	6.60	6.50	6.30	6.30	6.20	6.00
98	6.8	676	8.70	8.40	8.30	8.00	7.80	7.70	7.50	7.20	7.10	6.90	6.70	6.60	6.40	6.30	6.30	6.10
99.4	6.9	685	8.90	8.60	8.40	8.10	7.90	7.80	7.60	7.30	7.20	7.00	6.80	6.70	6.50	6.40	6.40	6.20
101	7	695	9.00	8.70	8.50	8.20	8.00	7.90	7.70	7.40	7.30	7.10	6.90	6.80	6.60	6.50	6.50	6.30
102	7.1	705	9.10	8.80	8.60	8.30	8.20	8.00	7.80	7.50	7.40	7.20	7.00	6.90	6.70	6.60	6.60	6.40
104	7.2	715	9.20	8.90	8.80	8.40	8.30	8.10	7.90	7.60	7.50	7.30	7.10	7.00	6.80	6.70	6.70	6.50
105	7.3	725	9.40	9.00	8.90	8.60	8.40	8.20	8.10	7.70	7.60	7.40	7.20	7.10	6.90	6.80	6.70	6.60
107	7.3	734	9.50	9.20	9.00	8.70	8.50	8.30	8.20	7.80	7.70	7.50	7.30	7.20	7.00	6.90	6.80	6.70
108	7.4	744	9.60	9.30	9.10	8.80	8.60	8.40	8.30	7.90	7.80	7.60	7.40	7.30	7.10	7.00	6.90	6.80
109	7.5	754	9.70	9.40	9.20	8.90	8.70	8.60	8.40	8.00	7.90	7.70	7.50	7.40	7.20	7.10	7.00	6.80
111	7.6	764	9.90	9.50	9.40	9.00	8.80	8.70	8.50	8.10	8.00	7.80	7.60	7.50	7.30	7.20	7.10	6.90
112	7.7	774	10.00	9.70	9.50	9.10	9.00	8.80	8.60	8.30	8.10	7.90	7.70	7.50	7.40	7.30	7.20	7.00
114	7.8	783	10.10	9.80	9.60	9.20	9.10	8.90	8.70	8.40	8.20	8.00	7.80	7.60	7.50	7.40	7.30	7.10
115	7.9	793	10.30	9.90	9.70	9.40	9.20	9.00	8.80	8.50	8.30	8.10	7.90	7.70	7.60	7.50	7.40	7.20
116	8	803	10.40	10.00	9.80	9.50	9.30	9.10	8.90	8.60	8.40	8.20	8.00	7.80	7.70	7.50	7.50	7.30
118	8.1	813	10.50	10.10	10.00	9.60	9.40	9.20	9.00	8.70	8.50	8.30	8.10	7.90	7.70	7.60	7.60	7.40
119	8.2	822	10.60	10.30	10.10	9.70	9.50	9.30	9.10	8.80	8.60	8.40	8.20	8.00	7.80	7.70	7.70	7.50
121	8.3	832	10.80	10.40	10.20	9.80	9.60	9.40	9.30	8.90	8.70	8.50	8.30	8.10	7.90	7.80	7.70	7.60
122	8.4	842	10.90	10.50	10.30	9.90	9.70	9.60	9.40	9.00	8.80	8.60	8.40	8.20	8.00	7.90	7.80	7.60
124	8.5	852	11.00	10.60	10.40	10.10	9.90	9.70	9.50	9.10	8.90	8.70	8.50	8.30	8.10	8.00	7.90	7.70
125	8.6	862	11.10	10.80	10.60	10.20	10.00	9.80	9.60	9.20	9.00	8.80	8.60	8.40	8.20	8.10	8.00	7.80
126	8.7	871	11.30	10.90	10.70	10.30	10.10	9.90	9.70	9.30	9.10	8.90	8.70	8.50	8.30	8.20	8.10	7.90
128	8.8	881	11.40	11.00	10.80	10.40	10.20	10.00	9.80	9.40	9.20	9.00	8.80	8.60	8.40	8.30	8.20	8.00
[psi] [bar] [kPa]			170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320

Obr. 3 Tabulka přepočtu kompresních tlaků  
Zdroj vlastní zpracování v programu Open Office – Calc



Obr. 4 Graf závislosti naměřeného kompresního tlaku na otáčkách měřeného motoru  
Zdroj: servisní manuál Mazda Motor Corporation

### 3.4 Závislost funkce motoru na naměřených hodnotách kompresních tlaků

Zde uvedené hodnocení životnosti motoru je založeno na zkušenosti s měřením kompresních tlaků motorů u vozů Mazda RX-8. Jedná se zde o praktické empirické zkušenosti s různými technickými stavy a nájezdy motorů v podmínkách specializovaných opraven rotačních motorů.

Výsledky měření komprese Wankelova motoru v amerických podmínkách ukazují přibližně na tyto závislosti:

850 [kPa] (a více)

Kompresní tlaky motoru jsou vynikající. Takto naměřené hodnoty kompresního tlaku jsou vzácné. Při měření vždy zkontrolujeme stav oleje v motoru. Vyšší hladina oleje může mít za následek zkreslení naměřených hodnot ve smyslu jejich zvýšení.



800 – 850 [kPa]

Je to velmi dobrý motor s dobrým výkonem. Tento výkon je možno při správné údržbě ještě dlouho udržet.

750 – 800 [kPa]

Motor je ještě v přijatelné kondici. Většinou se setkáváme u vozů značky Mazda s tímto stavem. Motor je ještě v toleranci.

700 – 750 [kPa]

Motor je ještě provozuschopný, ale stává se, že občas nejde nastartovat za tepla. Ztráta komprese se začne zvyšovat a urychlovat.

650 – 700 [kPa]

Motor už nebude mít delší životnost. Ztráta komprese v komorách se bude dále urychlovat.

600 – 650 [kPa]

Zřetelné selhávání. Velmi náchylné k zahlcení i za použití silnějšího nového startéru. Motor bude mít problém se spuštěním za tepla, ztrácí výkon a má potíže s volnoběhem.

550 – 600 [kPa]

Špatné hodnoty. Motor je mimořádně náchylný k zahlcení. Za tepla bude takřka nemožné ho udržovat při volnoběhu. Významná ztráta výkonu.

500 – 550 [kPa]

Tento motor je pravděpodobně možné nastartovat roztažením za jiným vozem. Pro každodenní použití téměř nemožné.

Méně jak 500 [kPa]

Tento motor nebude zřejmě vůbec možné nastartovat.

(rx8help.com)

Naším cílem bylo provést srovnání měření kompresních tlaků v našich podmínkách a měření amerického RX-8 klubu a potvrzení či vyvrácení jejich závěrů.

## 4 Praktická část a výsledky měření

### 4.1 Metodika měření kompresních tlaků a zpracování údajů

Měření bylo provedeno při startování na nezahřátém motoru, při otevřené sací klapce a při standardní hladině oleje, jak je předepsáno výrobcem, firmou Mazda Motor Corporation. Byl dodržen postup měření tak, aby data, která naměříme, byla srovnatelná a mohla sloužit pro další zpracování. Hodnoty tlaků na jednotlivých plochách pístů byly zaznamenány do tabulky pro každý motor. V této dílčí tabulce jsou zapsány kompresní tlaky na jednotlivých plochách pístů. Z nich byl vypočítán průměr pro přední a zadní píst. Tyto dvě hodnoty byly opět zprůměrovány a výsledkem byl celkový kompresní tlak daného motoru.

Podle naměřených hodnot, které byly přepočteny na  $250 \text{ [min}^{-1}\text{]}$ , bylo možno stanovit úroveň stavu kondice motoru. Údaje pro jednotlivé motory (automobily) byly zpracovány pomocí statistických charakteristik včetně grafického zobrazení pomocí lineárního a krabicového modelu (obr.6–8). Naměřené hodnoty byly vzhledem ke svému charakteru zkoumány na existenci závislosti pomocí regresní funkce. Protože se jednalo o motory (automobily), u kterých je byl známý provozní stav v době měření, bylo možné dát do souvislosti veličiny kompresních tlaků motoru a celkovou provozuschopnost automobilu.

Pro statistické porovnání tlaků předního a zadního pístu bylo použito statistické metody t-test, která umožňuje ověřit některou z hypotéz. (1) Zda normální rozdělení, z něhož pochází určitý náhodný výběr má určitou konkrétní střední hodnotu, přičemž rozptyl je neznámý. (2) Zda dvě normální rozdělení mající stejný (byť neznámý) rozptyl, z nichž pocházejí dva nezávislé náhodné výběry mají stejné střední hodnoty (resp. rozdíl těchto hodnot je roven určitému danému číslu).

Pro statistické porovnání byla zkoumána závislost kompresních tlaků na počtu ujetých kilometrů, a to pomocí statistické metody v lineárním regresním modelu. Ten nám pomocí statistické analýzy objasňuje vztah mezi závisle proměnnou (vy-

světlovanou proměnnou,  $y$ ) a nezávisle proměnnými (vysvětlujícími proměnnými,  $x$ ).

## 4.2 Výsledky měření kompresních tlaků zkoumaných motorů

Tabulky (2–11) popisují výsledky naměřených hodnot kompresních tlaků na jednotlivých plochách pístů a jejich průměrné hodnoty pro píst jako celek a současně i pro celý motor. Dále je zde zaznamenán počet ujetých kilometrů a datum měření. Z těchto tabulek lze dále vyčíst i rozdíl kompresních tlaků na předním (1) a zadním (2) pístu. Takto získané hodnoty byly dále statisticky zkoumány.

Každé této tabulce odpovídá jeden graf (příloha, obr. č. 14-23), kde je zobrazeno měření zvláště prvního a druhého pístu s jednotlivými měřeními kompresními plochami pístů.

Tab. 2 Měření č. 1

1	kompresní tlak plochy č. 1 [kPa]	kompresní tlak plochy č. 2 [kPa]	kompresní tlak plochy č. 3 [kPa]	průměrný kompresní tlak pístu [kPa]	rozdíl tlaků pístů [kPa]	kompresní tlak motoru [kPa]
přední píst (1)	<b>847</b>	<b>755</b>	<b>778</b>	793	1	793
zadní píst (2)	<b>806</b>	<b>802</b>	<b>769</b>	792		
	26000					
	25.3.15					

Tab. 3 Měření č. 2

2	kompresní tlak plochy č. 1 [kPa]	kompresní tlak plochy č. 2 [kPa]	kompresní tlak plochy č. 3 [kPa]	průměrný kompresní tlak pístu [kPa]	rozdíl tlaků pístů [kPa]	kompresní tlak motoru [kPa]
přední píst (1)	<b>261</b>	<b>94</b>	<b>127</b>	161	-145	233
zadní píst (2)	<b>359</b>	<b>249</b>	<b>309</b>	306		
	175000					
	30.7.11					

Tab. 4 Měření č. 3

3	kompresní tlak plochy č. 1 [kPa]	kompresní tlak plochy č. 2 [kPa]	kompresní tlak plochy č. 3 [kPa]	průměrný kompresní tlak pístu [kPa]	rozdíl tlaků pístů [kPa]	kompresní tlak motoru [kPa]
přední píst (1)	<b>538</b>	<b>527</b>	<b>523</b>	529	56	501
zadní píst (2)	<b>480</b>	<b>480</b>	<b>460</b>	473		
80000						
17.12.11						

Tab. 5 Měření č. 4

4	kompresní tlak plochy č. 1 [kPa]	kompresní tlak plochy č. 2 [kPa]	kompresní tlak plochy č. 3 [kPa]	průměrný kompresní tlak pístu [kPa]	rozdíl tlaků pístů [kPa]	kompresní tlak motoru [kPa]
přední píst (1)	<b>702</b>	<b>670</b>	<b>688</b>	687	74	650
zadní píst (2)	<b>626</b>	<b>607</b>	<b>571</b>	613		
100000						
3.4.12						

Tab. 6 Měření č. 5

5	kompresní tlak plochy č. 1 [kPa]	kompresní tlak plochy č. 2 [kPa]	kompresní tlak plochy č. 3 [kPa]	průměrný kompresní tlak pístu [kPa]	rozdíl tlaků pístů [kPa]	kompresní tlak motoru [kPa]
přední píst (1)	<b>589</b>	<b>548</b>	<b>574</b>	570	30	555
zadní píst (2)	<b>571</b>	<b>552</b>	<b>497</b>	540		
56000						
25.5.16						

Tab. 7 Měření č. 6

6	kompresní tlak plochy č. 1 [kPa]	kompresní tlak plochy č. 2 [kPa]	kompresní tlak plochy č. 3 [kPa]	průměrný kompresní tlak pístu [kPa]	rozdíl tlaků pístů [kPa]	kompresní tlak motoru [kPa]
přední píst (1)	<b>629</b>	<b>562</b>	<b>615</b>	602	137	533
zadní píst (2)	<b>509</b>	<b>460</b>	<b>425</b>	465		

59000
15.3.17

Tab. 8 Měření č. 7

7	kompresní tlak plochy č. 1 [kPa]	kompresní tlak plochy č. 2 [kPa]	kompresní tlak plochy č. 3 [kPa]	průměrný kompresní tlak pístu [kPa]	rozdíl tlaků pístů [kPa]	kompresní tlak motoru [kPa]
přední píst (1)	<b>608</b>	<b>591</b>	<b>582</b>	594	116	536
zadní píst (2)	<b>491</b>	<b>482</b>	<b>460</b>	478		
100000						
27.4.14						

Tab. 9 Měření č. 8

8	kompresní tlak plochy č. 1 [kPa]	kompresní tlak plochy č. 2 [kPa]	kompresní tlak plochy č. 3 [kPa]	průměrný kompresní tlak pístu [kPa]	rozdíl tlaků pístů [kPa]	kompresní tlak motoru [kPa]
přední píst (1)	<b>707</b>	<b>652</b>	<b>352</b>	570	-176	659
zadní píst (2)	<b>774</b>	<b>767</b>	<b>699</b>	747		
72000						
16.11.12						

Tab. 10 Měření č. 9

9	kompresní tlak plochy č. 1 [kPa]	kompresní tlak plochy č. 2 [kPa]	kompresní tlak plochy č. 3 [kPa]	průměrný kompresní tlak pístu [kPa]	rozdíl tlaků pístů [kPa]	kompresní tlak motoru [kPa]
přední píst (1)	<b>851</b>	<b>810</b>	<b>829</b>	830	-26	843
zadní píst (2)	<b>861</b>	<b>849</b>	<b>859</b>	856		
0						
14.4.11						

Tab. 11 Měření č. 10

10	kompresní tlak plochy č. 1 [kPa]	kompresní tlak plochy č. 2 [kPa]	kompresní tlak plochy č. 3 [kPa]	průměrný kompresní tlak pístu [kPa]	rozdíl tlaků pístů [kPa]	kompresní tlak motoru [kPa]
přední píst (1)	<b>498</b>	<b>492</b>	<b>492</b>	494	15	487
zadní píst (2)	<b>484</b>	<b>479</b>	<b>474</b>	479		
67000						
8.4.16						

Zdroj Tab.( 2 – 11): Vlastní zpracování v programu EXCEL

### 4.3 Sumarizace měření kompresních tlaků

Tabulka (12) ukazuje souhrn naměřených hodnot pro všech deset zkoumaných motorů. Je zde přehledně uveden počet ujetých kilometrů i datum měření. Z této tabulky byla použita data pro zkoumání závislosti naměřených hodnot kompresních tlaků na počtu ujetých kilometrů u jednotlivých automobilů.

Tab. 12 Souhrnné výsledky měření

motor automobilu č.	vzdálenost [v tisících km]	datum měření	průměrný kompresní tlak (1) pístu [kPa]	průměrný kompresní tlak (2) pístu [kPa]	Rozdíl průměrných kompresních tlaků (1) a (2) pístu [kPa]	kompresní tlak motoru [kPa]
1	26	25.3.15	793	792	1	793
2	175	30.7.11	161	306	-145	233
3	80	17.12.11	529	473	56	501
4	100	3.4.12	687	613	74	650
5	56	25.5.16	570	540	30	555
6	59	15.3.17	602	465	137	533
7	100	27.4.14	594	478	116	536
8	72	16.11.12	570	747	-176	659
9	0	14.4.11	830	856	-26	843
10	67	8.4.16	494	479	15	487

Zdroj: Vlastní zpracování v programu EXCEL

#### 4.4 Provozuschopnost jednotlivých zkoumaných motorů

Motor č. 1 – stav výborný. Motor nastartuje jak za studena i za provozní teploty.

Motor č. 2 - stav nevyhovující provozu. Nelze nastartovat ani roztažením.

Motor č. 3 – lze nastartovat za studena s pomocí startéru s vyššími otáčkami. Za standartní provozní teploty nelze nastartovat.

Motor č. 4 – stav podmíněně dobrý, lze nastartovat za všech podmínek, nad 6000 [min<sup>-1</sup>] je patrný úbytek výkonu, nerovnoměrný chod na volnoběh.

Motor č. 5 – motor ještě lze v některých případech nastartovat za studena, za tepla pouze roztažením, znatelný úbytek výkonu nad 6000 [min<sup>-1</sup>]

Motor č. 6 – motor lze za studena nastartovat pomocí výkonnějšího startéru, za tepla nelze nastartovat, pouze roztažením a lze pozorovat výraznější snížení výkonu nad 5000 [min<sup>-1</sup>] a zvýšenou hlučnost od 3000 [min<sup>-1</sup>].

Motor č. 7 – motor lze za studena nastartovat pomocí výkonnějšího startéru, za tepla pouze roztažením, má snížený výkon nad 6000 [min<sup>-1</sup>]

Motor č. 8 – lze nastartovat za všech podmínek, ztrácí výkon až kolem hranice 8000 [min<sup>-1</sup>], stav motoru je dobrý, má vyšší rozdíl tlaků mezi písty a prokázané poškození uložení klikové hřídele a poškození jedné plochy skříně pístu

Motor č. 9 – zcela nový motor

Motor č. 10 – motor lze nastartovat pouze roztažením, chod motoru je pravidelný, úbytek výkonu nad 4000 [min<sup>-1</sup>] je výrazně znatelný.

Na základě těchto praktických pozorování bylo vytvořeno následující rozdělení závislosti provozuschopnosti motoru na hodnotách kompresní tlaků.

A - nad 700 [kPa] - motor ve výborném stavu

B – 600 až 700 [kPa] - dobrý provozní stav

C – 500 až 600 [kPa] - podmíněná provozuschopnost



D – pod 500 [kPa] - motor není provozuschopný

Nyní můžeme doplnit naši tabulku měření o hodnocení provozuschopnosti motorů.

Tab. 13 Vyhodnocení provozuschopnosti měřených motorů

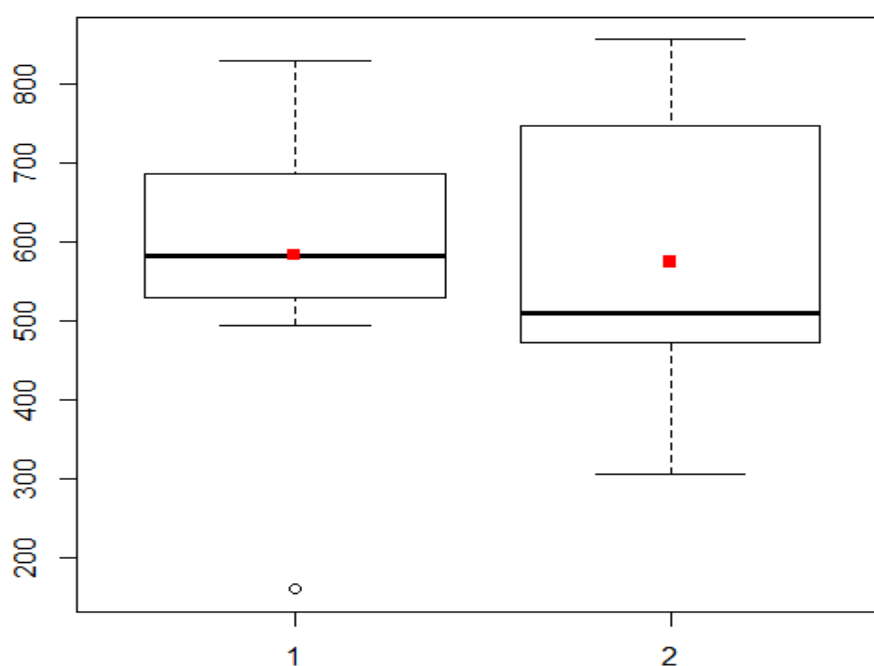
motor automobily č.	vzdálenost [v tisících km]	průměrný kompresní tlak (1) pístu [kPa]	průměrný kompresní tlak (2) pístu [kPa]	Rozdíl průměrných kompresních tlaků (1) a (2) pístu [kPa]	rozdíl tlaků pístů [kPa]	Vyhodnocení provozuschopnosti
1	26	778	769	793	1	A
2	175	127	309	161	-145	D
3	80	523	460	529	56	C
4	100	688	571	687	74	B
5	56	574	497	570	30	C
6	59	615	425	602	137	C
7	100	582	460	594	116	C
8	72	352	699	570	-176	B
9	0	829	859	830	-26	A
10	67	492	474	494	15	D

Zdroj: Vlastní zpracování v programu EXCEL

#### 4.5 Rozdíly kompresních tlaků na předních a zadních pístech

Na zkoumaném souboru motorů jsme dále provedli porovnání kompresních tlaků na předním a zadním pístu každého motoru. Z praxe je ověřeno, že většinou má přední píst vyšší tlak než zadní a rozdíl se s počtem ujetých kilometrů zvyšuje. Zkoumaný soubor je příliš malý na to, abychom mohli směrodatně tuto hypotézu potvrdit či vyvrátit, přesto i zde převládá tato tendence. Dva zkoumané motory se výrazněji liší od tohoto předpokladu. Motor č. 9 je příklad nového motoru, který

nebyl zajetý a vrcholové těsnící lišty nebyly usazeny, a tedy zadní píst měl v průměru nepatrně vyšší tlaky než přední píst. Po demontáži motoru č. 8 byla zjištěna závada utěsnění kompresní plochy pístu, a to vylomením vrcholové těsnící lišty. Z grafu předního pístu bylo patrné výrazné snížení tlaku u třetí kompresní plochy (obr. č. 21).

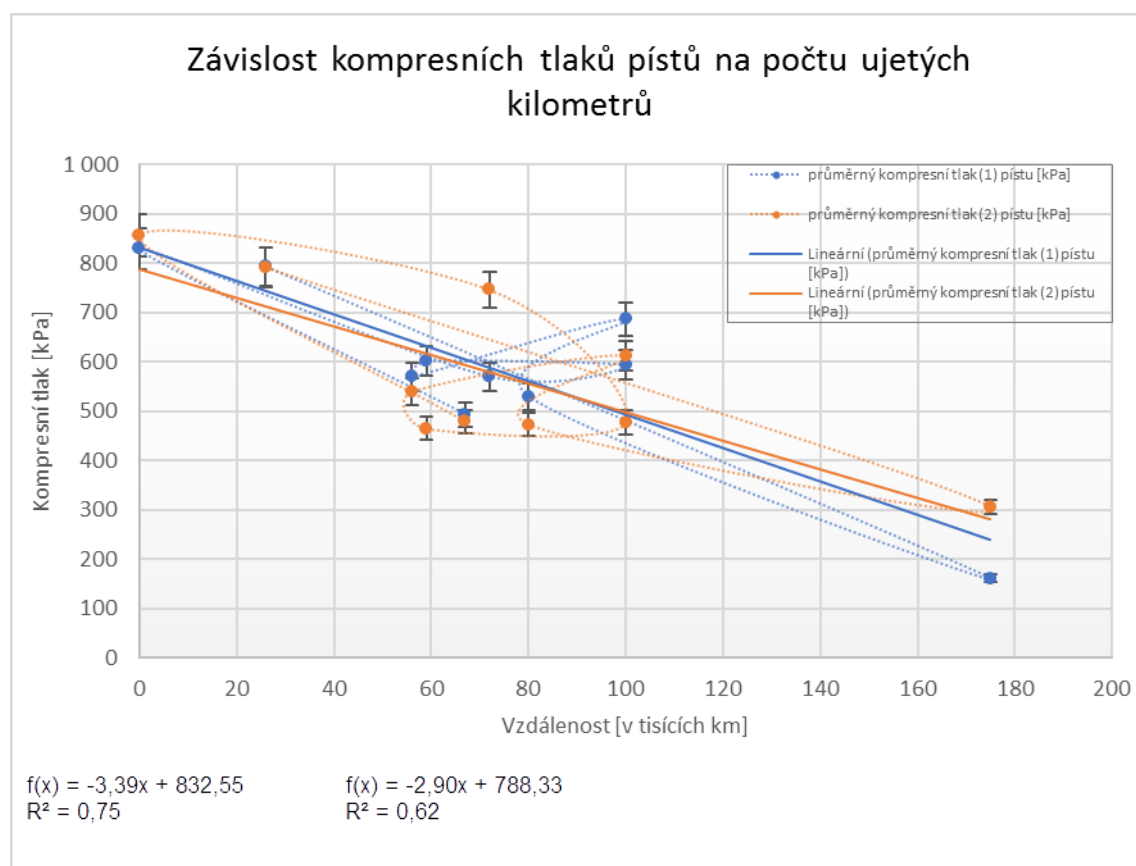


Obr. 5 Krabicový graf  
(zdroj: vlastní zpracování v programu EXCEL)

Pro oba soubory dat proměnných byl setaven krabicový graf (obr. 6). Z grafu jsou patrné rozdíly mezi naměřenými hodnotami tlaku předního (1) a zadního (2) rotoru. Čtvereček na obrázku znázorňuje průměr, černá silná čára znázorňuje medián, spodní a horní tenká čára znázorňuje maximum a minimum, prázdné kolečko znázorňuje mezní nezapadající hodnotu, krabice - horní a dolní kvartil (50% dat spadá do těchto hodnot = 25 % nahoru, 25 % dolů).

## 4.6 Závislost kompresních tlaků motorů na počtu ujetých kilometrů

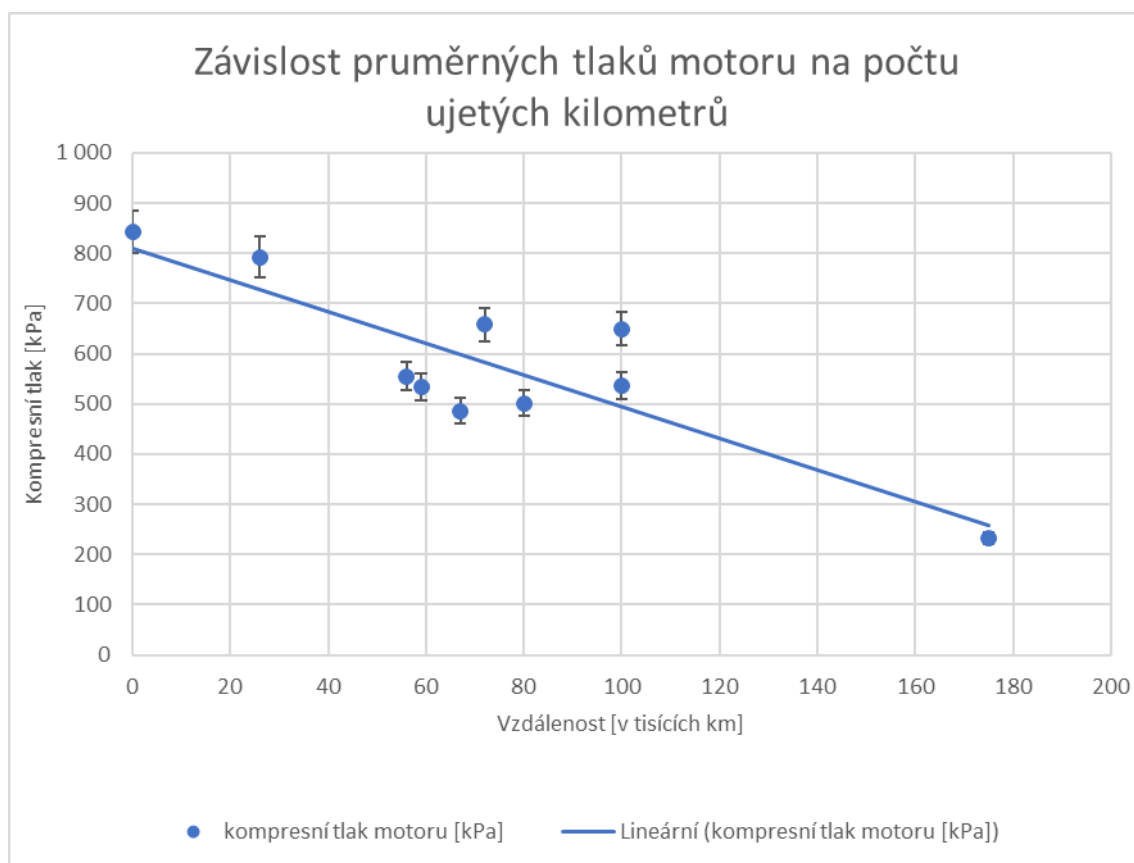
Závislost kompresních tlaků motorů na počtu ujetých kilometrů jsme vyhodnotili pomocí lineárního modelu (obr. 7 a 8). Byla nalezena signifikantní závislost v tom smyslu, že při zvyšování počtu ujetých kilometrů se kompresní tlaky motorů snižují.



Obr. 6 Graf závislosti kompresních tlaků jednotlivých pístů na počtu ujetých kilometrů. (zdroj: vlastní zpracování v programu EXCEL)

Naměřené hodnoty kompresních tlaků pístů byly statisticky zpracovány pomocí metody t test (obr. 6). Ten neprokázal signifikantní rozdíl mezi tlakem předního a

zadního pístu. ( $t=0,101$ ;  $df=1, 18$ ;  $p=0,9$ ). V levém spodním rohu grafu jsou popsány rovnice regresních přímek pro kompresní tlaky (1) a (2) pístů.



Obr. 7 Graf závislosti kompresních tlaků na počtu ujetých kilometrů.  
(zdroj: vlastní zpracování pomocí programu EXCEL)

Zkoumaná data byla statisticky analyzována pomocí regresního lineárního modelu (obr 7). Ten prokázal signifikantní závislost hodnoty kompresního tlaku motoru na počtu ujetých kilometrů. ( $F=23,43$ ;  $df 1, 8$ ;  $p<0,01$ ).

## 5 Diskuze

V práci je analyzováno chování motoru při určitých hodnotách kompresních tlaků měřených na příslušných plochách pístu. Je potřeba vzít do úvahy, že je rozdíl v naměřených hodnotách kompresního tlaku v porovnání mezi předním a zadním pístem. Tento rozdíl kompresních tlaků nemá být větší než 105 [kPa]. Při větším rozdílu je možné a velice pravděpodobné, že došlo k poškození ložiska jak na hlavní hřídeli, tak u ložiska pístu nebo jiné závadě, např. k poškození vrcholové těsnící lišty. To má za následek, že se při chodu motoru nejprve zadní a následně postupem času i přední vrcholová hrana pístu dotýká ocelových bloků statoru (obr. 10 a 11) a rovněž se nerovnoměrně stírá vrcholová lišta pístu o oběžnou plochu statoru. Při malém počtu měření nebylo možné prokázat rozdíl tlaků na předním a zadním rotoru na počtu ujetých kilometrů. Zjišťovali jsme závislost provozuschopnosti automobilu na naměřených hodnotách kompresních tlaků a srovnávali jsme naše výsledky se zkušenostmi amerického klubu RX-8 (kap. 3.4). Náš závěr se jejich výsledky shoduje, ale škála hodnocení provozuschopnosti motorů byla zúžena do čtyř stupňů (A až D). Každý stupeň popisuje chování daných motorů.

V práci byla prověřována závislost kompresních tlaků motorů na počtu ujetých kilometrů. Celkově vyplývá, že při zvyšování počtu najetých kilometrů tlaky klesají. Graf ukázal lineární závislost hodnot tlaků na počtu najetých kilometrů. V praxi je ověřeno, že pouhý počet najetých kilometrů není limitujícím faktorem provozuschopnosti motoru. Ta závisí rovněž na provozní držbě, tzn. například na neustálém sledování a doplňování oleje, který musí být v předepsané kvalitě. Dále i na převažujícím charakteru provozu automobilu, který není vhodný na krátké trasy a pro městský provoz. Z těchto důvodů byly motory použity pro vysloveně sportovní vozy.

## 6 Závěr

Cílem této práce bylo potvrzení nebo vyvrácení hypotézy, která předpokládá, že je možné z naměřených hodnot kompresních tlaků Wankelova motoru poměrně přesně odhadnout jeho další životnost a provozuschopnost. Tento předpoklad práce potvrdila. Současně bylo zjištěno, že počet ujetých kilometrů v tomto smyslu není vždy směrodatný. Opotřebením motoru závisí na mnoha dalších faktorech, především na jeho stálé údržbě, použitém oleji, převažujícím způsobu provozu (delší cesty anebo jízdy po městě) atd.

Při instalaci výkonnějšího startéru je možné zdánlivě zlepšit provozní stav motoru. Ten podle výsledků naměřených hodnot pouze uměle vyvolá zvýšenou kompresi pro start. Tím umožní nastartování motoru a jeho provoz, ale rovněž způsobuje větší výchylku těsnící lišty, která je již mechanicky opotřebená a mnohdy nesplňuje požadavek výrobce pro její usazení. Ve velké většině poškození motoru je to způsobeno vyložením lišty z pouzdra. Další příčinou poškození rotoru a housingu je opotřebené kluzné ložisko klikové hřídele a ložisko rotoru. To způsobí jeho vyosení a obroušení hran rotoru a vyrytí rýh do bloku rotoru i do bočních bloků.

Z praktického hlediska naše výsledné tabulky umožňují pro konkrétní motory (automobily) Wankelova typu vytvořit premisu, jakým způsobem je potřeba s nimi v budoucnu zacházet a jakou údržbu a servis je nutné provést tak, aby jejich funkčnost bylo co nejdelší a zároveň investice do opravy bylo co nejmenší. Při opakovaném měření daného motoru v pravidelných cyklech lze jejich nutnou údržbu velmi přesně načasovat a tím ušetřit náklady. Pro praxi je doporučeno co nejčastější sledování stavu motoru kontrolou kompresních tlaků a rovnoměrnosti chodu. Při každém náznaku nerovnoměrnosti je nutná okamžitá kontrola v servisu. Měření kompresních tlaků je potřeba přesně zaznamenat s datem měření a počtem ujetých kilometrů. Konstrukčně by bylo vhodné vyřešit mazání horní těsnící lišty separátně od mazání klikové hřídele, aby nedocházelo k přerušení jejich mazání. Toto je častá příčina závad, protože provozovatel automobilu nedoplní včas olej do moto-

ru. V okamžiku, kdy se na ukazateli zobrazí kontrolka mazání, je už stav hladiny oleje příliš nízký a dochází k přerušení mazání horní těsnicí lišty.

---

## 7 Seznam použité literatury

BEDNÁŘ, M. Proč musel zemřít Wankelův rotační motor.

<http://www.autoforum.cz/technika/proc-musel-zemrit-wankeluv-rotacni-motor-toto-jsou-4-duvody/>

[http://www.rx8help.com/before\\_you\\_buy/compression\\_test.html](http://www.rx8help.com/before_you_buy/compression_test.html)

[https://cs.wikipedia.org/wiki/Wankel%C5%AFv\\_motor](https://cs.wikipedia.org/wiki/Wankel%C5%AFv_motor)

HROMÁDKO, J. Speciální spalovací motory a alternativní pohony, Grada Publishing a. s., 2012)

HROMÁDKO, J. Spalovací motory. Praha: Grada, 2011

KOVAŘÍK, Ladislav. Motory Wankelovy a jim příbuzné: Určeno [také] studentům odb. i vys. škol. 1. vyd. Praha: SNTL, 1970. 204, [2] s. Řada strojír. Literatury.

KRÁL, M. Wankelův motor. Bakalářská práce. MENDELU Brno, 2015.

ULRICH, R. -- SKOUPÝ, A. Provozní spolehlivost strojů: (cvičení). 1. vyd. Brno: Vysoká škola zemědělská, 1990. 71 s.



## Přílohy



Obr. 8 Viditelné poškození hrany pístu



Obr. 9 Poškození uložení těsnící lišty a boční hrany pístu



Obr. 10 Kliková hřídel. Poškození uložení klikové hřídele



Obr. 11 Vnitřní ozubení pístu

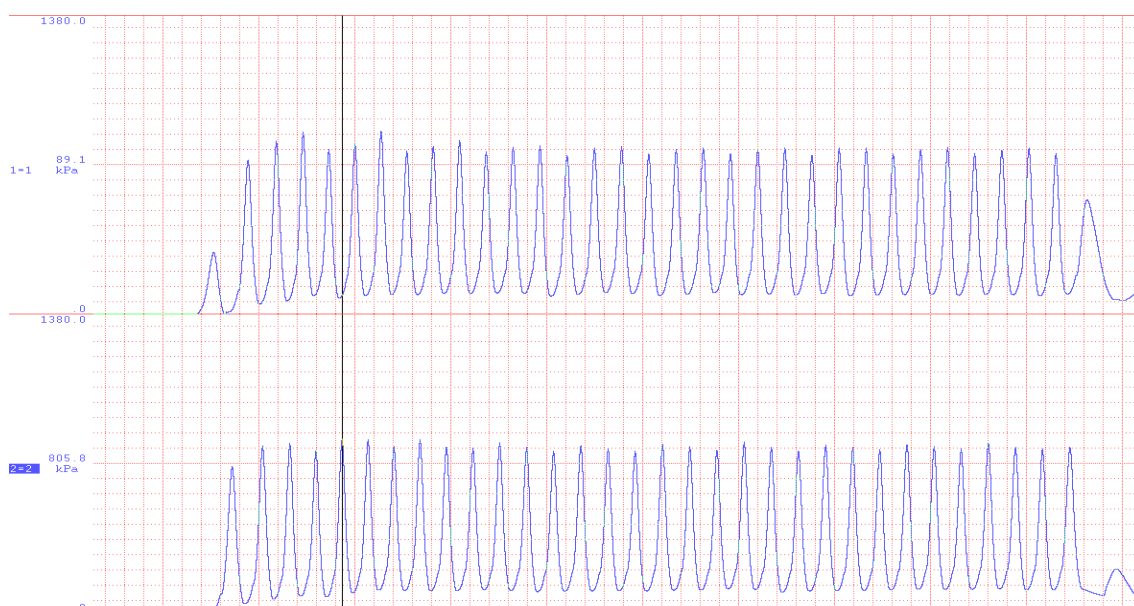




Obr. 12 Píst motoru, zřetelná karbonizace



Obr. 13 Uložení pístu



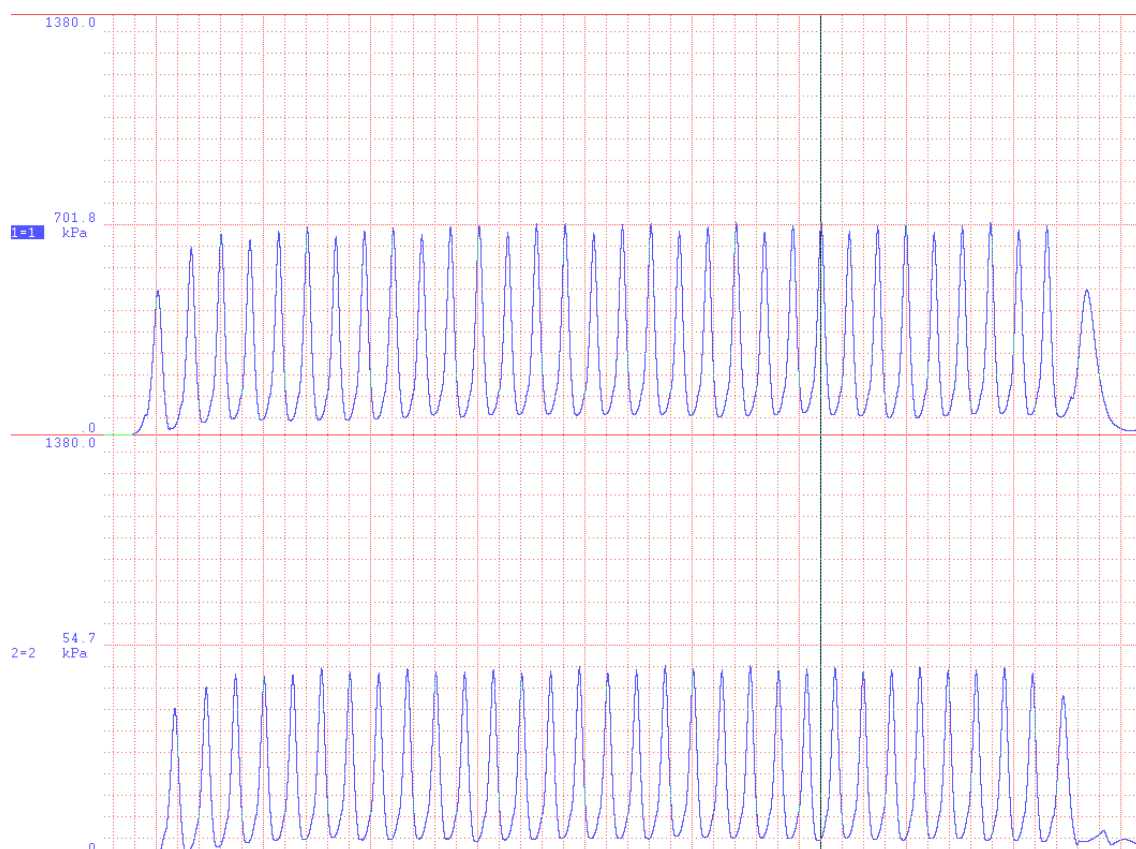
Obr. 14 Graf měření kompresních tlaků pístu (1) a (2) motoru č. 1



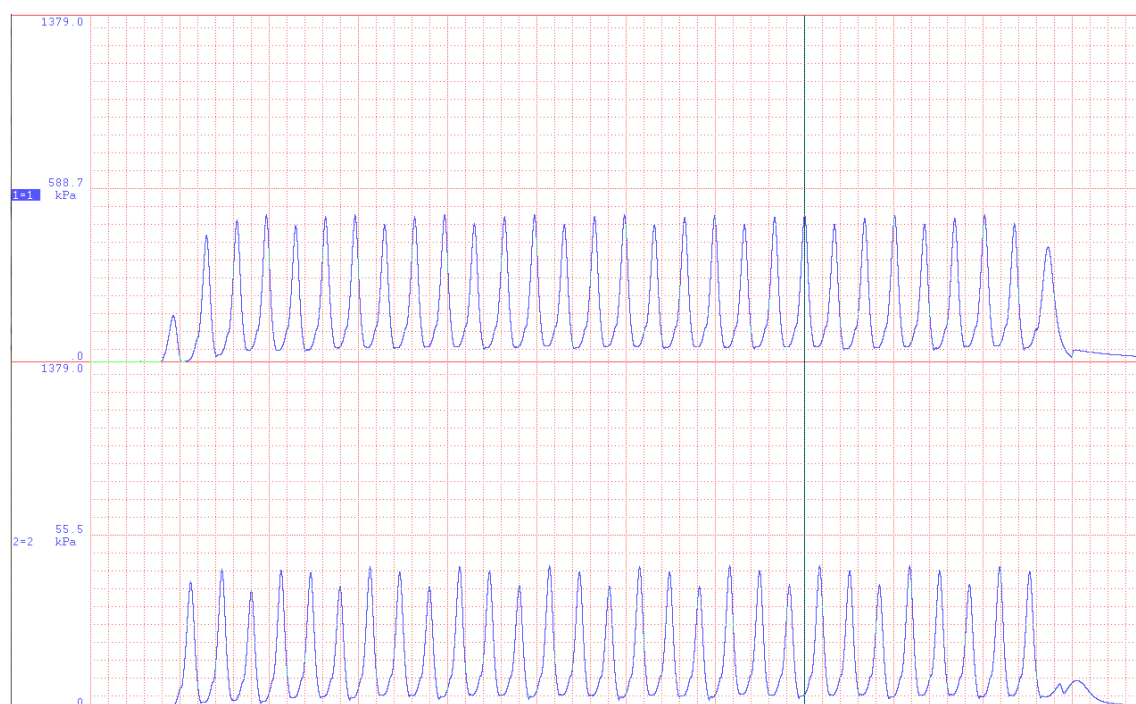
Obr. 15 Graf měření kompresních tlaků pístu (1) a (2) motoru č. 2



Obr. 16 Graf měření kompresních tlaků pístu (1) a (2) motoru č. 3

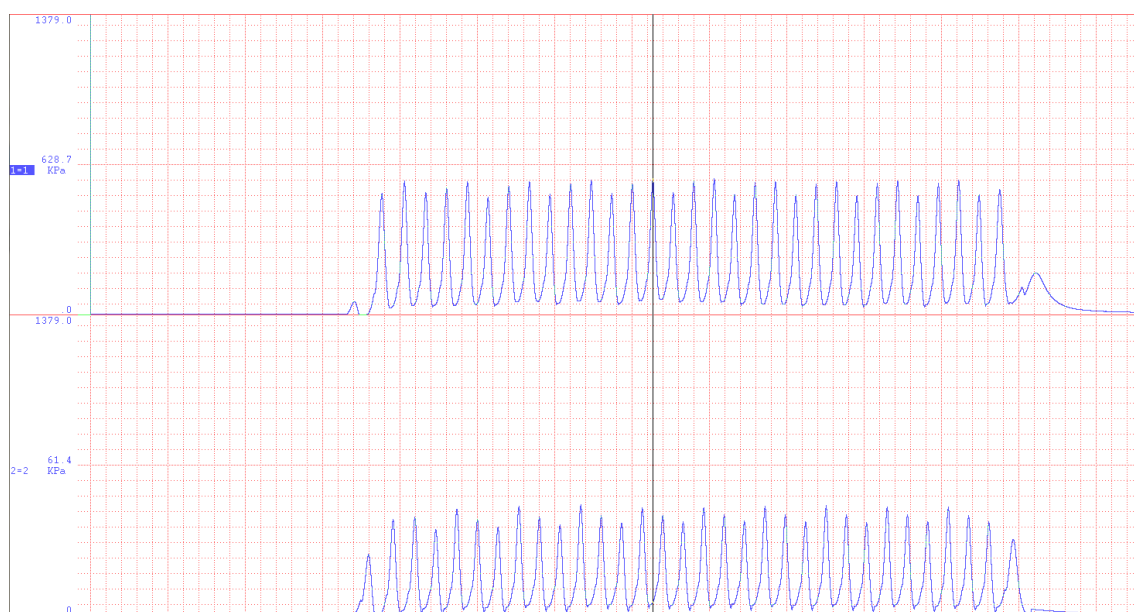


Obr. 17 Graf měření kompresních tlaků pístu (1) a (2) motoru č. 4

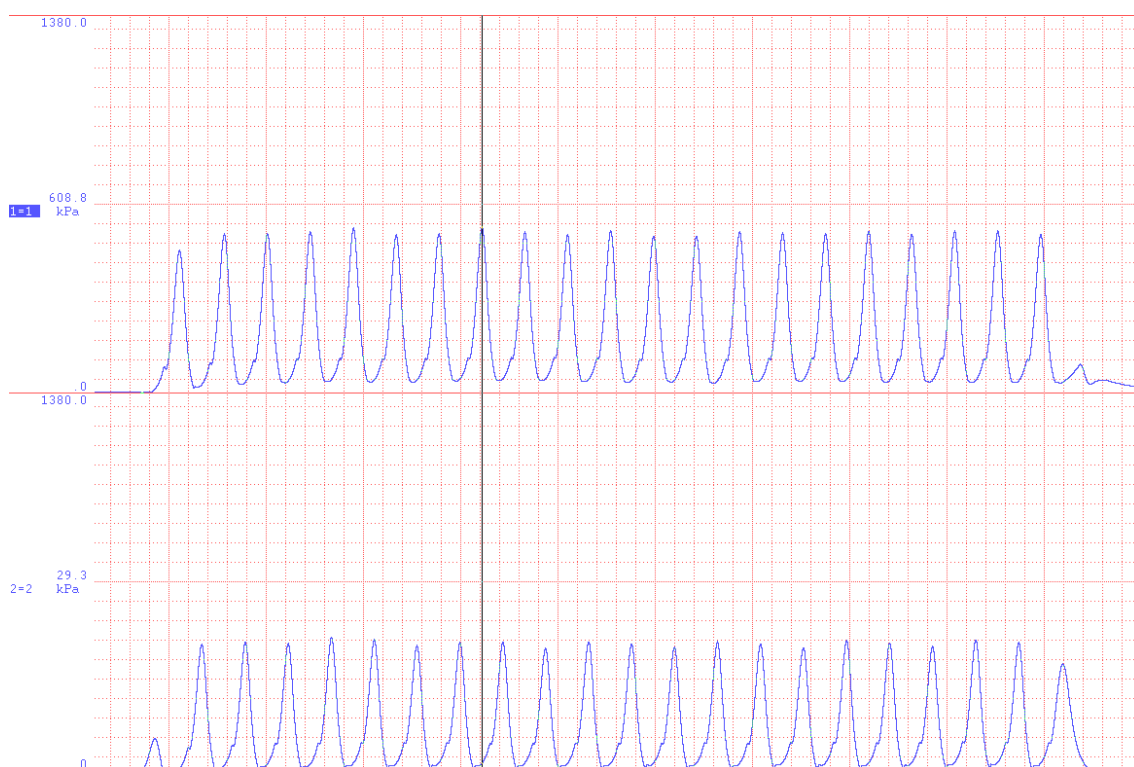


Obr. 18 Graf měření kompresních tlaků pístu (1) a (2) motoru č. 5

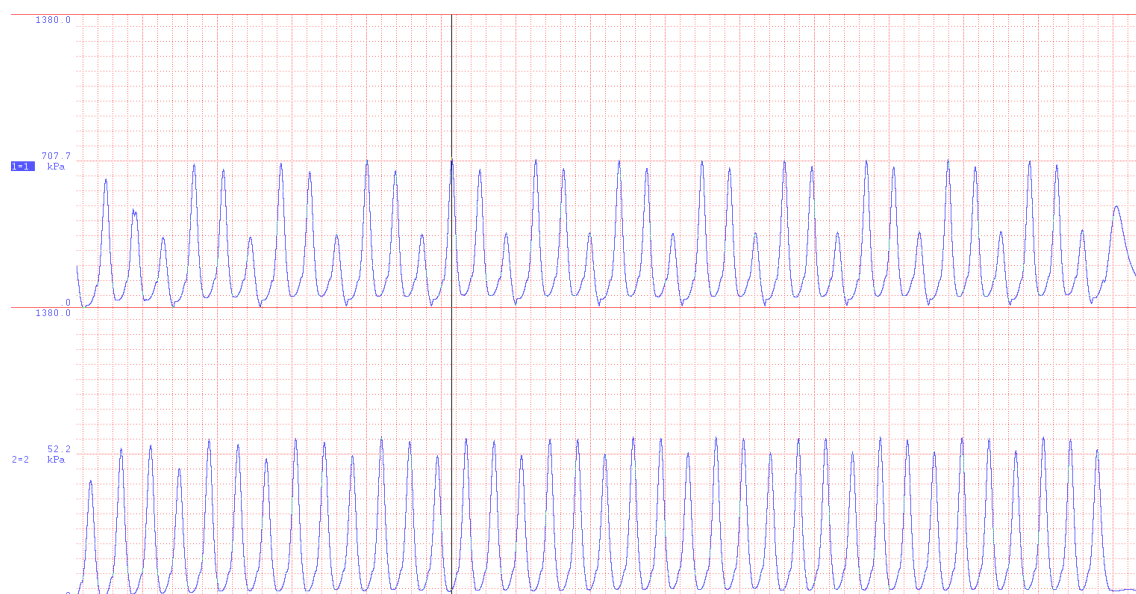




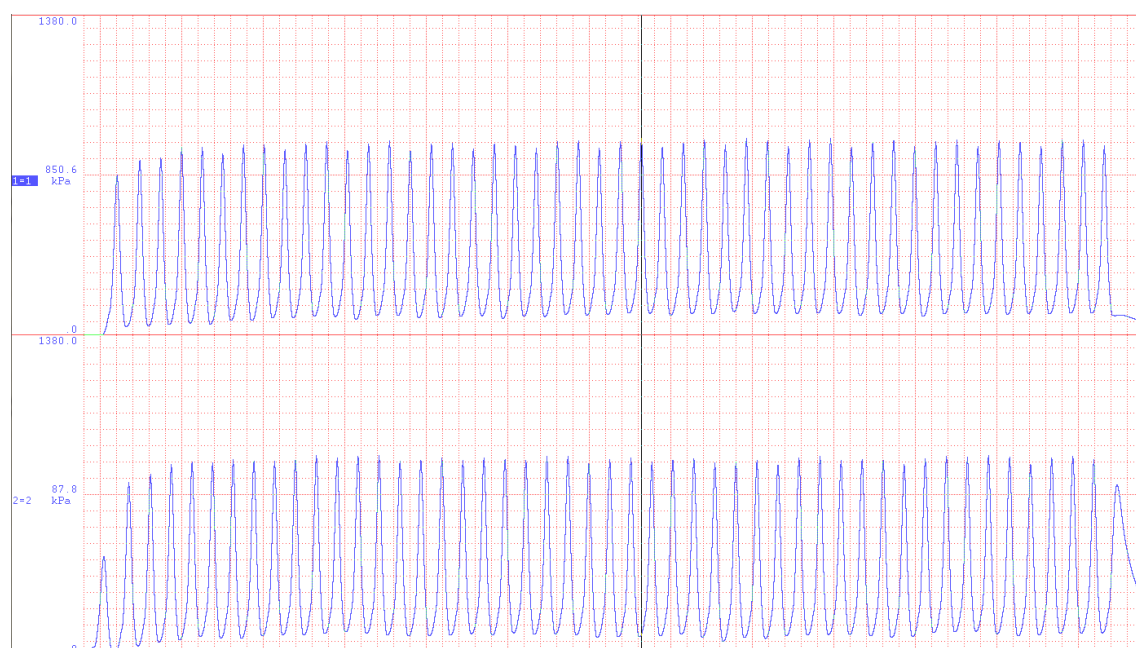
Obr. 19 Graf měření kompresních tlaků pístu (1) a (2) motoru č. 6



Obr. 20 Graf měření kompresních tlaků pístu (1) a (2) motoru č. 7



Obr. 21 Graf měření kompresních tlaků pístu (1) a (2) motoru č. 8



Obr. 22 Graf měření kompresních tlaků pístu (1) a (2) motoru č. 9



Obr. 23 Graf měření kompresních tlaků pístu (1) a (2) motoru č. 10