

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Startovatelnost vznětového motoru při použití
hydrogenovaného rostlinného oleje

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce: Ing. Martin Pechout, Ph.D.

Diplomant: Bc. Pavel Pešek

PRAHA 2021

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Pavel Pešek

Technika a technologie v dopravě a spojích
Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

Startovatelnost vznětového motoru při použití hydrogenovaného rostlinného oleje

Název anglicky

Startability of cold compress ignition engine when hydrotreated vegetable oil used

Cíle práce

Předmětem této práce je experimentální vyšetření průběhu hoření vybraných paliv při studeném startu vznětového motoru a bezprostředně po něm. Spalována bude jak motorová nafta (jakožto referenční palivo), tak hydrogenovaný rostlinný olej, který vykazuje výrazně vyšší cetanové číslo. Vyhodnocován bude průběh tlaku ve válci spalovacího motoru a z něj vypočtený průběh hoření se zaměřením na průtah vznícení a jeho změnu. Experimentální starty motoru budou prováděny při různých teplotách v návaznosti na aktuálních klimatických podmínkách.

Metodika

Provedte rešerši popisující vlastnosti paliv se zaměřením na vlastnosti ovlivňující startovatelnost studeného motoru z několika dostupných zdrojů pro motorovou naftu jakožto fosilní palivo. Tento postup zopakujte i pro hydrogenovaný rostlinný olej, případně metylester řepkového oleje, jakožto biopaliva druhé a první generace.

Na základě těchto údajů, a zejména rozdílů ve vlastnostech paliv, proveďte experimenty se studeným motorem a následným provozem vznětového motoru při použití motorové nafty a hydrogenovaného rostlinného oleje za různých teplot okolí a za současného sběru relevantních veličin a jejich průběhů s důrazem na detekci změn v průběhu spalovacího procesu.

Získané výsledky vyhodnoťte a popište rozdíly mezi jednotlivými použitými palivy v závislosti na teplotě okolí při startu motoru. K popisu změn využijte více vyhodnocených veličin tak, aby poskytovaly ucelenou představu o nastalých změnách a jejich významu.

Doporučený rozsah práce

40 – 50 stran

Klíčová slova

studený start, hydrogenovaný rostlinný olej, průběh hoření, snížené teploty

Doporučené zdroje informací

Diesel-Engine Management, 4th Edition Robert Bosch GmbH ISBN: 978-0-470-02689-2 June 2006

Pechout, M. and Macoun, D., "Experimental Investigation of Combustion Timing of HVO, RME and Diesel Fuel in a Euro6 Car Engine during Transient Driving Cycles," SAE Technical Paper 2019-24-0138, 2019, <https://doi.org/10.4271/2019-24-0138>.

Předběžný termín obhajoby

2020/2021 LS – TF

Vedoucí práce

doc. Ing. Martin Pechout, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vozidel a pozemní dopravy

Elektronicky schváleno dne 5. 5. 2021

Ing. Martin Kotek, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 6. 5. 2021

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 12. 05. 2021

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Startovatelnost vznětového motoru při použití hydrogenovaného rostlinného oleje vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů. Jsem si vědom, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby. Jsem si vědom, že moje diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí. Jsem si vědom, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

V Praze dne 14. května 2021

.....

Jméno, příjmení

Poděkování

Děkuji panu Ing. Martinu Pechoutovi, Ph.D. za odborné rady, příkladné vedení, vstřícný přístup, vynaložený čas a mimořádnou ochotu během zpracování diplomové práce.

Abstrakt

Tato práce pojednává o problematice startování vznětových spalovacích motorů za podmínek nízkých teplot při použití konvenčních i nekonvenčních paliv. Má za cíl porovnat vlastnosti motorové nafty zejména s hydrogenovaným rostlinným olejem při různých teplotách okolí z hlediska uvedení spalovacího motoru do provozu. Praktické měření proběhlo v areálu České zemědělské univerzity na automobilu Škoda Rapid, při kterém byly sledovány průběhy veličin a parametrů, které pomohly zmapovat procesy v úvodních sekundách studeného startu. Získaná data byla transportována tabulkového procesoru MS Office a následně zpracována. Experimenty prokázaly rozdíly mezi zkoumanými palivy v závislosti na teplotě při studeném startu.

Klíčová slova: startovatelnost; nafta; HVO; experiment; chlad

Abstract

This thesis discusses the issue of diesel engine startability under conditions of low temperatures using conventional and unconventional fuels. It aims to compare the properties of diesel fuel with hydrogenated vegetable oil in terms of putting the internal combustion engine into operation. The practical measurement took place on the premises of the Czech University of Life Sciences Prague on a Škoda Rapid car, during which the courses of quantities and parameters were monitored, which helped to map the processes in the initial seconds of the cold start. The obtained data were transported to the MS Office spreadsheet processor and subsequently processed. By measuring, we proved the difference among the tested fuels and influence of temperature on the startability.

Key words: startability; oil; HVO; experimental; chill

Obsah

Úvod.....	1
1 Teoretická východiska	2
1.1 Spalovací motor	2
1.1.1 Zážehový motor.....	3
1.1.2 Vznětový motor.....	3
1.2 Vybraná paliva spalovacích motorů a jejich vlastnosti.....	5
1.2.1 Motorová nafta	5
1.2.2 Bionafty	9
1.2.3 MEŘO.....	10
1.2.4 HVO.....	12
1.2.5 Porovnání vlastností zkoumaných paliv a jejich vliv na startovatelnost.....	14
1.3 Start studeného motoru	17
1.3.1 Startování motoru	19
1.3.2 Vstřík paliva	20
1.3.3 Nasávaný vzduch	20
1.3.4 Vliv teploty vzduchu na studený start.....	22
1.3.5 Konstrukční prvky vozidla zlepšující podmínky studeného startu	23
2 Cíle práce	25
3 Praktická část a měření	25
3.1 Principy měření.....	25
3.1.1 Měření indikovaného tlaku	26
3.1.2 Měření polohy klikové hřídele	26
3.1.3 Měření pulzů vstřikovačů	26
3.1.4 Měření emisí.....	27
3.2 Měřicí aparatura	27

3.3	Experimentální vozidlo	27
3.4	Výsledky měření	28
3.4.1	Průběh tlaku a přivedeného tepla ve spalovacím prostoru	28
3.4.2	Průtah vznícení	43
3.4.3	Průběh otáček motoru	45
3.4.4	Emise výfukových plynů	46
4	Závěr	50
5	Seznam zdrojů	51
6	Seznam zkratk.....	54
7	Seznam obrázků, tabulek a grafů	54

Úvod

Žijeme v době, kdy je moderní technika již neodmyslitelnou součástí našeho každodenního života a většina lidí si již bez nich svůj den ani neumí představit. Usnadňují nám naši snahu prakticky při jakékoliv činnosti v soukromém, i pracovním životě. Když vynecháme mobilní telefony a počítače, tak rychlý, dostupný a snadný přesun je pro nás samozřejmostí, ať již využíváme služeb hromadné dopravy, nebo se spoléháme na individuální přepravu. Vozidla dnes pro svůj pohon v naprosté většině používají spalovací motor využívající fosilních paliv. Poměr pohonných jednotek využívajících alternativní zdroj energie se sice každým rokem zvětšuje, avšak majoritní podíl mají stále konvenční pohonné jednotky. Je to dáno několika faktory. Vozidla, která využívají k pohonu jako jediný zdroj elektrickou energii, jsou pro většinu obyvatel stále příliš drahá. Jejich pořizovací cena zhruba dvojnásobně převyšuje cenu vozidel, která jsou poháněna konvenčním spalovacím motorem využívající fosilní paliva. Svou roli při výběru vozidla hraje i zatím nedostatečná hustota infrastruktury nabíjecích stanic. V ideálním případě musí mít majitel elektromobilu současně k dispozici garáž s vlastní nabíjecí stanicí, což je zvláště ve městech náročné nejen z finančního hlediska. Paradoxně právě pro městský provoz jsou tato vozidla nevhodnější. Mezi další překážky patří limity přenosové soustavy a nedostatek nízkoemisních zdrojů elektrické energie. Další alternativou jsou paliva vyrobená z obnovitelných zdrojů, respektive biologického původu. V tomto případě by se měla biopaliva svými vlastnostmi přibližovat fosilním palivům, v ideálním případě je překonat. Provoz motoru na biopaliva má však svá konkrétní úskalí, která snižují jejich konkurenceschopnost, jako je například snížení výkonu, zvýšení spotřeby, nebo agresivita těchto paliv vůči některým částem motoru a jeho příslušenství.

Výrobci motorů osobních a nákladních vozidel tedy dnes stojí před nelehkým úkolem. Jejich produkty dnes musí splňovat velké množství kritérií z hlediska emisí. Spalovací motory jsou z konstrukčního hlediska hnány na samý okraj technických možností, aby byly schopny tyto předpisy splnit. Zároveň však musí splnit očekávání zákazníků, tedy dosahovat vysokých výkonů, nízkých provozních nákladů a vysoké míry spolehlivosti při různých podmínkách provozu. Jinými slovy, motor musí bez problémů dlouhodobě fungovat jak při vysokých letních teplotách, tak i v prostředí, kde teploty padají hluboko pod bod mrazu. Těmto požadavkům však musejí být přizpůsobena i paliva, jakožto hlavní zdroj energie.

Biopaliva a fosilní paliva se svými vlastnostmi za nízkých teplot liší, což je dáno hlavně jejich různorodým chemickým složením a procesem výroby. Rozdílné vlastnosti jsou nejmarkantnější zvláště za nízkých teplot. Problém se startovatelností mají převážně vznětové motory díky principu jejich procesu spalování, respektive inicializaci hoření paliva ve válci motoru. Právě chováním vybraných druhů paliv pro vznětové motory a jejich vlivem na proces zahájení provozu za různých atmosférických podmínek se zabývá tato diplomová práce.

1 Teoretická východiska

Přesunem osob a materiálů se zabývalo lidstvo již od pravěku. Na cestě ke spalovacím motorům muselo lidstvo překonat mnohé problémy, avšak díky schopnosti improvizovat a inovovat se postupem času propracovalo od vynálezu kola až k prvním strojům využívajících přeměny energie k vlastnímu pohonu, tedy motorům.

1.1 Spalovací motor

Dle Hromádka (1) je spalovací motor definován jako „*tepelný stroj, který spalováním paliva získává tepelnou energii a využitím vhodného plynného média ji převádí na mechanickou práci*“. Při spalování paliva lze využít jeho potenciální energie v podobě tlaku, který při hoření vznikne, nebo energii kinetickou, na níž jsou založeny spalovací turbíny.

V této práci se budu zabývat výhradně pístovými spalovacími motory čtyřdobými. Jak již název napovídá, jeden pracovní cyklus sestává ze čtyř kroků. První z nich je sání. Pohyb pístu z horní do dolní úvratě vytvoří podtlak, který nasaje vzduch, případně výbušnou směs do pracovního prostoru pístu. Při tomto kroku je otevřený sací ventil. Druhým krokem, respektive dobou je stlačení. Sací i výfukový ventil jsou uzavřeny, přičemž píst se pohybuje z dolní úvratí směrem k horní. Jelikož nasátý obsah válce nemá kam unikat, dojde k jeho stlačení, čímž se zvýší teplota a tlak. Před horní úvratí dojde v případě zážehových motorů k zapálení směsi pomocí zapalovací svíčky, nebo k vstřiku paliva a jeho samovznícení vlivem teploty v případě vznětových motorů. Vlivem hoření se uvolní energie uložená v palivu, která se převede na tepelnou a tlakovou a následuje třetí doba, tedy expanze. Vlivem tlaku se píst pohybuje od horní úvratí k dolní, přičemž koná užitečnou práci. V poslední době je realizován výfuk. Výfukový ventil je otevřen a píst pohybem k horní úvratí vytlačí produkty spalování ven z válce. Po dosažení horní úvratí se cyklus opakuje. (1)

Obrázek 1 – motor VW Golf GTD 2014 (29)



©ARICOS.COM

1.1.1 Zážehový motor

Směs nasátého vzduchu a paliva je pomocí vnějšího zdroje energie zažehnuta. V praxi se nejčastěji setkáme s iniciačním zážehem pomocí elektrické jiskry. Tlak při kompresi dosahuje hodnot až 1,5 MPa a teploty až 600 °C. Aby při kompresi nedošlo vlivem těchto podmínek k vznícení směsi odpařeného paliva se vzduchem, je maximální kompresní poměr obvykle omezen na hodnotu $\varepsilon_{\max} = 11,5$. (1)

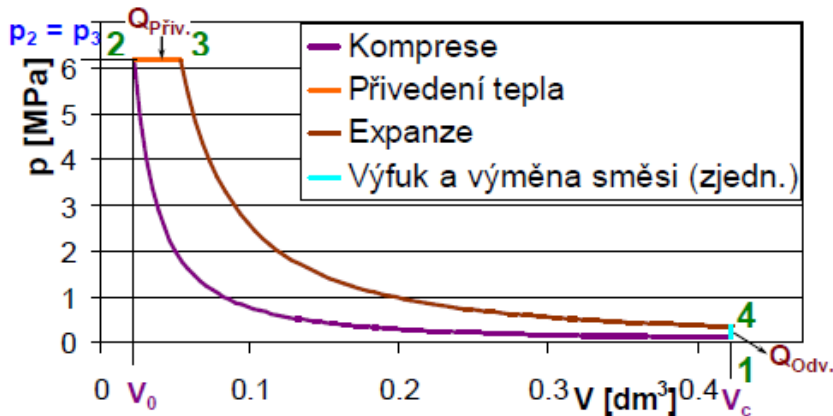
1.1.2 Vznětový motor

Výše zmíněný efekt vznícení je podstatou vznětových motorů (na obrázku č. 1), kde ve válci musí být dosaženo takových podmínek, aby se palivo při vstřiku do spalovacího prostoru vznítilo. Kompresí vzduchu ve válci se zvyšuje tlak a tím i teplota, dokud není dosaženo teploty potřebné pro vznícení, proto je nutno použít velká kompresní poměr. Obecně platí, že minimální kompresní poměr $\varepsilon_{\min} = 12$, přičemž tlak vzduchu na konci komprese dosahuje hodnoty až 5,5 MPa a jeho teplota až 900 °C. Nejčastěji se tímto typem pohonné jednotky můžeme setkat u nákladních vozidel, stavebních a pracovních strojů, nebo u osobních automobilů. Důvodem pro masové rozšíření je relativně vyšší účinnost a tím i měrná spotřeba paliva vzhledem k zážehovému motoru. Diesellové motory s přeplňováním

mohou dosáhnout účinnosti až 47 %, dvoutaktní lodní motory mohou dokonce přesáhnout účinnost 50 %. (1,2)

Při idealizovaném pracovním oběhu je teplo přiváděno izobaricky, proto je Dieselův oběh někdy označován jako rovnotlaký.

Obrázek 2 - Ideální pracovní oběh s izobarickým přívodem tepla (2)



Z hlediska konstrukce vznětových motorů a jejich startovatelnosti hraje roli hlavně spalovací prostor a palivová soustava.

1.1.2.1 Motory s přímým vstřikem paliva

Tyto motory mají nedělený spalovací prostor. Tvorba směsi vzduchu s palivem je založena na objemovém způsobu – palivo je přímým vstřikem velmi jemně rozprášeno po celém objemu spalovacího prostoru, přičemž palivo by nemělo dopadnout až na stěny válce. Tohoto je docíleno použitím trysek s více otvory, ke kterým je palivo dopravováno pod vysokým tlakem, což však souvisí s vysokými nároky na vstřikovací zařízení a kvalitu použitého paliva. Při samotném spalování stoupá tlak nad pístem velmi rychle. Aby se předešlo zvýšenému hluku a vibracím, vyžadují tyto motory krátký průtah vznícení paliva. Kompresní poměr pro tyto motory se pohybuje kolem hodnoty $\varepsilon = 17$.

Celkově se motory s přímým vstřikem paliva vyznačují ekonomičtějším provozem v porovnání s motory komůrkovými (díky nižší měrné spotřebě paliva) a lepší startovatelností za nízkých teplot. Je to dáno menším povrchem spalovacího prostoru, malým množstvím odvedeného tepla a lepším rozprostřením paliva v pracovním prostoru díky vysokým vstřikovacím tlakům. (1)

1.1.2.2 Motory s nepřímým stříkem paliva

Vyznačují se děleným spalovacím prostorem, které označují jako motory komůrkové. Tvorba směsi s palivem probíhá termickým způsobem. Ten je založen na principu vstřikování do spalovacího prostoru jedno otvorovou, případně dvou otvorovou tryskou tak, že se palivo v tenké vrstvě rozteče po stěně, kde se vlivem její teploty postupně odpaří a vytvoří hořlavou směs. Díky vysoké teplotě stěn a intenzivnímu víření vzduchu a par je zajištěno velice dobré promísení paliva se vzduchem, což v důsledku snižuje průtah vznícení.

Oproti motorům s přímým vstříkem se vyznačují vyšší měrnou spotřebou paliva, měkčím chodem vlivem pomalejšího nárůstu tlaku nad pístem. Jejich špatná startovatelnost je způsobena velkým povrchem spalovacího prostoru a značným odvodem tepla v důsledku intenzivního víření vzduchu v komůrce. Z tohoto důvodu musela být jejich startovatelnost řešena přítomností žhavicí svíčky, která ohřeje okolní vzduchu před startem a zajistí vznícení směsi.

Dnes již byly tyto motory z trhu vytlačeny a nevyrábí se již desítky let.

1.2 Vybraná paliva spalovacích motorů a jejich vlastnosti

Paliva musí smísením se vzduchem vytvořit zápalnou směs, jejíž aktivní látky při hoření uvolní teplo a při tomto procesu uvolní minimum škodlivých produktů. Mezi hlavní vlastnosti patří výhřevnost, zápalnost, rychlost spalování, odpařitelnost, teplota bodu vznícení a chemické složení.

1.2.1 Motorová nafta

V současnosti z pohledu světové ekonomiky jde o nejdůležitější palivo. Jedná se o směsi kapalných uhlovodíků s 12 až 22 atomy uhlíku v molekule vroucích při teplotách v rozmezí 150 – 360 °C, které mohou obsahovat příměsi (aditiva) pro zlepšení vlastností. Nejčastěji je použito jako palivo pro vznětové motory, lze ji však aplikovat do některých typů plynových turbín. Nafty se řídí normou ČSN EN 590. Výroba spočívá ve směšování petroleje s těžším destilačním produktem - plynovým olejem. Obsah lehkých podílů se odvíjí od požadovaného bodu vzplanutí. (3,7)

1.2.1.1 Cetanové číslo

Cetanové číslo charakterizuje, jak je nafta náchylná ke vzněcování. Někdy se můžeme setkat s pojmem reaktivita. Stanovuje se na experimentálním motoru, jeho zjištění je tedy časové i finančně nákladné. Je založeno na porovnání konkrétního vzorku paliva oproti referenčním vzorkům. Sleduje se průběh vznětu při změnách kompresního poměru. Hodnoty se mohou pohybovat od nuly až do sta. Nula symbolizuje vlastnosti čistého metylnaftalenu a sto vlastnosti cetanu. Moderní motory vyžadují hodnoty 50 až 60. Dle normy ČSN EN 590 musejí mít nafty na trhu ČR hodnotu minimálně 51, respektive 48 u naft pro arktické klima.

Nafty s vysokým cetanovým číslem se snadno samovolně zapalují díky rychlému nárůstu teploty vlivem tlaku, mají dokonalejší spalování a přispívají hladkému startu a následně k tzv. měkkému chodu motoru. Vysoké cetanové číslo zkracuje průtah vznícení. Ten se projevuje se časovou prodlevou mezi okamžikem vstřiku paliva do spalovacího prostoru a vznícením směsi. Při požití paliva s nevhodným cetanovým číslem nedochází k optimálnímu spalování směsi, která vede nerovnoměrnému chodu motoru, což vede k nežádoucímu zatěžování motoru a jeho opotřebovávání. Pokud je cetanové číslo příliš vysoké, prodleva zážehu je krátká, což způsobí, že palivo začne hořet blízko u vstřikovací trysky, což může vést až k jejímu zapečení (zadření jehly, uspání karbonovými úsadami). Navíc nedojde k dostatečnému promísení se vzduchem, část paliva se nedokonale spálí způsobí tvorbu pevných částic.

Naopak příliš nízké cetanové číslo také způsobuje tvrdý chod motoru, tedy zvýšenou hlučnost podobné klepání motoru u zážehových motorů. Vlivem dlouhé prodlevy vznícení je ve spalovacím prostoru rozprášeno velké množství paliva, které se náhle vznítí a způsobí příliš rychlý nárůst tlaku ve spalovacím prostoru. Při použití nafty s cetanovým číslem nižším než 35 je start motoru již velmi obtížný a běh je doprovázen zvýšeným obsahem sazí ve výfukových plynech. Má také neblahý vliv na emise, zvláště při studeném startu. Vlivem pomalého nárůstu teploty nedojde ke kompletnímu prohoření veškerého množství dávkovaného paliva, což má za následek zvýšený obsah oxidu uhelnatého a nespálených uhlovodíků ve výfukových plynech. (1,3,8)

1.2.1.2 Cetanový index

Častou slouží jako náhrada za cetanové číslo, nejedná se však o totožnou hodnotu. Reálné hodnoty jsou nižší v řádu jednotek. Cetanový index se vypočítává z výsledků laboratorních měření hodnot destilační křivky (konkrétně z 10, 50 a 90 %) a hustoty.

Dále se můžeme setkat s Dieselovým indexem, což je ukazatel reaktivních vlastností nafty. Získává se výpočtem z hustoty a anilinového bodu, což je „nejnižší teplota udaná v °C, při které je zkoumaný vzorek dokonale mísitelný se stejným objemem anilinu“ (4).

1.2.1.3 Hustota

Jedná se o důležitý parametr motorové nafty, jelikož cetanové přímo souvisí s obsahem n-alkanů (parafíny), což jsou uhlovodíky s nejmenší hustotou, avšak měla by se pohybovat v optimálním intervalu. Dávkování paliva je měřeno dle jeho objemu. Příliš vysoká hustota by tedy vedla k příliš bohaté směsi, malému množství vzduchu a tím i zvýšené kouřivosti motoru. Optimální hustota paliva pro běžné vznětové motory bývá uváděna v rozmezí 800 – 890 kg.m⁻³ při viskozitě 2 – 9 mm².s⁻¹. (3)

1.2.1.4 Chladové parametry motorové nafty

Na vlastnosti nafty v nízkých teplotách mají zásadní vliv parafíny, což jsou molekuly s bodem tání nad 0 °C. Parafíny se při ochlazení vylučují v podobě krystalů, které se zachytávají na palivovém filtru, což má nepříznivé následky, které mohou vyústit až v neschopnost motoru pokračovat v provozu (případně být do provozu uveden) z důvodu přerušování dodávky paliva do systému. Tento fakt je nepříjemný zejména při studených startech. Jakmile však motor dosáhne vyšších provozních teplot, krystalky parafínů se rozpustí a motor může pracovat bez problémů. Teplota vylučování parafínů je tedy důležitým parametrem pro posouzení chladových vlastností nafty. Podle chladových parametrů je na trhu více druhů naft. V České republice lze koupit tři druhy: letní, přechodová a zimní. Podrobněji se těmto druhům budu věnovat níže.

Z výše uvedeného vyplývá, že bod tuhnutí motorové nafty není vypovídající vlastností, podle které lze palivo hodnotit z hlediska chování při nízkých teplotách. Pro komplexní posuzování chladových parametrů je nutno znát následující teploty:

- Bod zákalu

- Ztráta filtrovatelnosti
- Bod tuhnutí

Tyto hodnoty se zjišťují při testu filtrovatelnosti CFPP (Cold Filter Plugging Point) na testovacím filtru při tlaku 2 kPa, který se provádí většinou pro motorové nafty. „CFPP je definován jako nejnižší teplota, při které proteče 20 ml vzorku sítkem s definovanou velikostí za dobu kratší, než 60 s.“ (3) Bod zákalu je teplota, které započne tvoření prvních pevných krystalů parafínů. Jelikož malé množství krystalů ani jejich velikost nejsou dostatečné pro zabránění proudění nafty skrze palivové sítko, není tato teplota směrodatná. Nejvíce vypovídající parametr je teplota ztráty filtrovatelnosti, což je nejnižší teplota, při které je palivo ještě schopno překonat palivový filtr a umožňuje běh motoru. Narušení průtoku skrz filtr ohrožující chod motoru nastává až v momentě, kdy teplota klesne pod tento bod za předpokladu, že je této teplotě palivo vystaveno delší dobu, například při dlouhém stání. Bod tuhnutí je teplota, při které již palivo není schopno samovolně téct, neboli ztrácí svou tekutost. (7,8)

Z hlediska vlastností se dají nafty rozdělit na dvě skupiny: nafty pro mírné klima nafty pro arktické klima. Druhá jmenovaná se používá pro zajištění provozu vznětových motorů v podmínkách velmi silných mrazů, se kterými se můžeme setkat v některých oblastech. Vyznačuje se teplotou ztráty filtrovatelnosti až při -32 °C. (7,8)

Dle normy ČSN EN 590 musí prodejci paliv zajistit dle časového období odpovídající třídu paliva. Hlavní parametr pro rozdělení do tříd je Filtrovatelnost CFPP, což lze charakterizovat jako teplotu, při které se ucpe studený palivový filtr. V následující tabulce je uveden přehled vybraných parametrů dle výše zmíněné normy.

Tabulka 1 - Třída motorové nafty a jejich vybrané ukazatele dle ČSN EN 590

Ukazatel	Jednotka	Motorová nafta			
		třída B	třída D	třída F	třída 2
Hustota při 15°C	kg/m ³	820 – 845	820 – 845	820 – 845	800 – 840
Cetanové číslo		min. 51	min. 51	min. 51	min. 480
Viskozita při 40°C	mm ² /s	2,00 – 4,50	2,00 – 4,50	2,00 – 4,50	1,50 – 4,00
Bod vzplanutí	°C	nad 55	nad 55	nad 55	
Filtrovatelnost CFPP	°C	max. 0	max. -10	max. -20	max. -32

Období dle klimatických podmínek		mírné klima	mírné klima	mírné klima	arktické klima
		15.04.- 30.09.	01.10.- 15.11.	16.11.- 28.02.	
			01.03.- 14.04.		
Obsah metylesterů mastných kyselin (FAME)	% (V/V)	max. 7,0	max. 7,0	max. 7,0	

1.2.2 Bionafty

Bionafta patří mezi alternativní zdroje energie vyráběných z obnovitelných zdrojů, jejichž hlavním cílem je snížit míru používání fosilních paliv, jejichž zdroje pro výrobu se neustále ztenčují. „Bionaftou se v ČR rozumí směsná nafta, která obsahuje minimálně 31 procent MEŘO, zbytek tvoří běžná motorová nafta.“ (3) MEŘO, neboli Methylester mastných kyselin řepkového oleje bude podrobněji rozepsán v další kapitole. Rostlinný podíl bionafty je založen na bázi rostlinných olejů, jež se vhodným způsobem přemění na metylester mastných kyselin, který tyto oleje obsahují. Vyrábí se nejčastěji z oleje řepkového, slunečnicového, případně sójového, avšak lze jej získat i z dalších asi 300 druhů rostlin a jejich plodů. Využívání rostlin má i další pozitivy. Například zbylý materiál z lisování řepky lze dále použít. Jde o tzv. pokrutiny, které často využívají jako surovina pro výrobu v krmných směsích pro zvířata. Zemědělské produkty určené pro průmysl lze také využít k rekultivaci poškozené půdy vlivem skládek. Použití biopaliv navíc snižuje výslednou produkci CO₂. Rostliny tento plyn při procesu fotosyntézy spotřebovávají, při následném spalování výsledných produktů se tedy do atmosféry uvolňuje CO₂, který rostliny spotřebovali při svém růstu. „Metylester řepkového oleje i směsné palivo (32% MEŘO) má velmi dobrou biologickou rozložitelnost (98% , respektive 91% za 21 dní)“.(6)

Z hlediska motorů má bionafta také několik pozitivních účinků. Oproti naftě vykazuje směsné palivo poloviční kouřivost, spaliny obsahují nižší podíl karcinogenních aromatických uhlovodíků a dalších škodlivých složek a tím i jejich obsah v biosféře. Při použití může navíc rozpustit usazeniny, které vznikly v palivové soustavě při provozu na běžnou motorovou naftu. Tyto usazeniny se většinou zachytí na palivovém filtru. Výfukové plyny mají nižší teplotu, což má pozitivní vliv na motor z hlediska tepelného namáhání. MEŘO má také

výborné mazací vlastnosti. Při obsahu 10 % MEŘO v motorové naftě snižuje opotřebení motoru až o 30 %.

Pokud budeme uvažovat o použití bionafty ve větší míře, než je tomu dnes, musíme brát v potaz i energetickou bilanci při její výrobě, respektive poměr vložené energie na její výrobu ve srovnání k získané energii. Údaje o energetické bilanci výroby MEŘO se velmi liší. „Uvádí se, že zvedený poměr je poměr je pro MEŘO jen 1:1,4 (jeden litr vloženého paliva přinese zisk 1,4 litru MEŘO).“ (3) Odpadní produkty však lze dále využít. Například sláma má energetický obsah 43 GJ/ha. Pokud do energetické bilance započítáme i využití těchto produktů, můžeme dostat poměr až 1:4. Pro porovnání nafta dosahuje z hlediska energetické bilance výroby hodnoty 1:0,9, což je výrazně horší výsledek. (3,5,6,20)

1.2.3 MEŘO

Metylester mastných kyselin řepkového oleje se řadí mezi biopaliva. Jedná se o palivo, které se svými fyzikálními a chemickými vlastnostmi přibližuje běžné motorové naftě, se kterou je navíc neomezeně mísitelné. V České republice se používá výhradně jako příměs do motorové nafty, tedy jako bionafta. Čisté MEŘO však může být použito i jako plnohodnotné palivo pro vznětové motory. Natankovat jej můžeme například v Německu Rakousku. Pro přímé použití však musí být upraven palivový systém. Koncentrace MEŘO v běžných motorových naftách se liší dle legislativy. Dnes je jednou z povinných příměsí do standardních motorových naft, do koncentrace 5 objemových procent není nutné zvláštní značení paliva. (3,9)

Vyrábí se přeměnou rostlinného oleje na metylester mastných kyselin, Nejdříve se olej vylisuje, následně projde katalytickým procesem zvaným esterifikace. Při něm se z oleje a metanolu stává metylester a glycerín. Při následném čištění se z oleje odstraní voda, metanol, glycerín a některé další látky.

Paliva s vyšším obsahem MEŘO musejí být na stojanech čerpacích stanic označena odpovídajícím způsobem dle normy ČSN EN 15940, například B10, B20 a B30. (9,25)

Tabulka 2 - složení MEŘO (3)

Parametr	Obsah
metylester mastných kyselin řepkového oleje	98 %
směsi mono-, di- a triglyceridů	Do 1 %
metanol	Do 0,3 %
volné mastné kyseliny	Do 0,3 %
volný glycerol	Do 0,02 %
nezmýdelnitelné látky	Zbylé množství

Použití MEŘO ve spalovacím motoru přináší výhody i nevýhody ve srovnání s motorovou naftou. Mezi výhody patří:

- Oleje pro výrobu neobsahují žádnou síru, v emisích tedy nejsou přítomny její oxidy a dokonale se zabráňuje tvorbě tzv. kyselých dešťům.
- Ve výfukových plynech je obsaženo výrazně menší množství nespálených uhlovodíků a polycyklických aromatických uhlovodíků
- Pevné částice ve výfukových plynech mají sice vyšší cytotoxicitu, ale menší karcinogenitu.
- Pokud systém obsahuje oxidační katalyzátor, sníží se emise aldehydů a ketonů.
- Biologická odbouratelnost.
- Snížení kouřivosti o zhruba 50 %

Mezi nevýhody patří:

- Snížení výkonu o cca 5 % (pokud není provedena množstevní kompenzace)
- Vysoká viskozita
- Oxidace při skladování
- Tvorba úsad ve vstřikovacích tryskách
- Agresivita vůči plastům, pryžím a lakům
- Vyšší produkce NO_x

- Nižší výhřevnost MEŘO, která se projeví vyšší objemovou spotřebou paliva o cca 10 % při provozu na čisté MEŘO

(1,3,5)

1.2.3.1 Chladové parametry MEŘO

Čisté MEŘO je tzv. letní palivo, problémy se startovatelností mohou nastat již při teplotě +5 °C. Pod bodem mrazu se objevují problémy s dopravou paliva přes palivový filtr, což ovlivňuje i studený start. Problém lze odstranit použitím vhodných aditiv. Vzhledem k vyšší viskozitě oproti naftě, které se zvyšuje s klesající teplotou, může při teplotě -15 °C hrozit riziko poškození vstřikovacích čerpadel vlivem pasivních odporů. (3)

1.2.4 HVO

HVO (Hydrotreated Vegetable Oil), neboli hydrogenované rostlinné oleje patří mezi biopaliva vyráběná z biomasy. Jako HVO se označují produkty založené na hydrogenaci rostlinných olejů za vzniku syntetizovaných uhlovodíků, ale také produkty vyrobené z použitých kuchyňských olejů a odpadních tuků. Druhé jmenované palivo se však častěji označuje jako HEFAs (Hydrotreated Esters and Fatty Acids). Cílem obou technologií je výroba biopaliva pro použití ve vznětových motorech o vysoké kvalitě. Vstupní surovinou pro výrobu HVO z rostlinných olejů jsou převážně:

- Řepkový olej
- Slunečnicový olej
- Palmový olej
- Tuk pocházející z řas

V současné době je největší objem HVO v Evropě vyráběn ve Finsku společností Neste Oil, jehož roční produkce je srovnatelná zhruba s poloviční spotřebou motorové nafty v České republice. Tato společnost do budoucna počítá s řasami jako majoritní surovinou pro výrobu HVO. (25)

Budoucí potenciál má rovněž při výrobě paliv pro další pohonné jednotky. Hydrogenací lze vyrobit i petrolejové frakce, které mohou figurovat jako alternativní palivo pro letecké turbínové motory. „Nezanedbatelná je i skutečnost, že při hydrogenaci vzniká z 1 tuny

zpracovávaných rostlinných olejů a/nebo živočišných tuků rovněž přibližně 50 kg biopropanu.“ Tento plyn lze dále využít k výrobě tzv. Bio LPG (Liquefied Petroleum Gas), což je zkapalnělý plyn používaný k pohonu motorových vozidel. Toto je v podstatě ideální situace, kdy při procesu výroby paliva z obnovitelných zdrojů zároveň vzniká surovina pro výrobu dalšího paliva biologického původu. (11)

HVO svými vlastnostmi přibližuje motorové naftě, dokonce ji v mnoha parametrech překonává. Skládá se z uhlovodíků s přímým řetězcem, který neobsahuje žádné aromatické látky, kyslík a síru. Ve srovnání s fosilní naftou má například znatelně vyšší cetanové číslo, které bez problémů dosáhne hodnoty 70, což pozitivně ovlivňuje start motoru, respektive průtah vznícení. Hmotnostní výhřevnost je zhruba o 5 % vyšší. Použití HVO, jak přiměsí do motorové nafty, tak čistého, zlepšuje emise oxidu uhelnatého, uhlovodíků a pevných částic. HVO má však nižší hustotu, což může negativně ovlivnit výkon motoru a redukuje poměrné množství, které je možné přimíchat do motorové nafty z důvodu dodržení palivových norem. Hustota HVO se pohybuje mezi 770 a 790 kg / m³, nafta se podle normy EN 590 pohybuje mezi 820 a 845 kg / m³. (3, 15, 27)

Výhody:

- Kompatibilní s palivovými systémy vznětových motorů
- Oxidační stabilita, nedegraduje při dlouhém skladování
- Vysoké cetanové číslo (běžně přesahující hodnotu 70)
- Žádný obsah síry
- Velmi nízký obsah aromatických uhlovodíků
- Teoreticky neomezená mísitelnost s motorovou naftou
- Odstraňuje nedostatky MEŘO, jako jsou např. agresivita vůči těsnění
- Příznivý dopad na emise CO₂ a dalších škodlivých emisí
- Lze jej vyrábět z nepotravinářských, případně odpadních surovin

Nevýhody HVO:

- Nízká hustota umožňující mísení s motorovou naftou do 30 obj. % z důvodu dodržení normy ČSN EN 590
- Vyšší cena oproti motorové naftě i MEŘO

V současné době je HVO využíváno převážně jako směsné palivo se standardní motorovou naftou. V České republice toto palivo nabízí síť čerpacích stanic OMV pod obchodním názvem MaxxMotion, kde se HVO prezentuje jako prémiová složka směsi.

Zajímavostí je i fakt, že obsah HVO v palivech B20 a B30 není nijak specificky limitován a nemusí být rozlišován značením rozdílným značením. (17,25)

1.2.4.1 Chladové parametry HVO

HVO má přes svoje nepopíratelná pozitiva jednu podstatnou nevýhodu. Díky vysokému obsahu n-heptadekanu a n-oktadekanu, které mají velmi vysoké cetanové číslo (105 a 110). ale také bod tání při 19 a 28 °C. Parafíny se vlivem těchto vlastností vylučují již při relativně vysokých teplotách, filtrovatelnost CFPP se pohybuje na 20 °C, což použitelnost čistého HVO komplikuje i v letním období. HVO lze teoreticky používat jako směsnou naftu v letních obdobích, přidáním do motorové nafty se zvýší cetanové číslo, avšak chování v nižších teplotách se zhorší. Jedním ze způsobů, jak zlepšit chladové parametry, je dvoustupňová výroba spočívající v již zmíněné hydrogenaci, na kterou navazuje izomerace, která značně sníží obsah n-heptadekanu a n-oktadekanu. Výsledné nízkoteplotní vlastnosti dvoustupňově vyráběného HVO jsou pak srovnatelné s parametry standardní motorové nafty určené pro zimní období. Navíc si zachovává výše zmíněné výhody, včetně velmi vysokého cetanového čísla. Takto vyrobené biopalivo je následně konkurenceschopné z hlediska použitelnosti pro finálního uživatele dieselového motoru. (11,13)

1.2.5 Porovnání vlastností zkoumaných paliv a jejich vliv na startovatelnost

Následující tabulka charakterizuje parametry vybraných druhů paliv pro vznětové motory. Vybrány byly parametry a fyzikální vlastnosti, které svou povahou mohou ovlivnit chování při studeném startu motoru.

Tabulka 3 - Porovnání vybraných parametrů paliv (16)

Parametr	HVO	MEŘO	Diesel	ČSN EN 590
Hustota při 15 °C [kg . m ³]	778,6	882,6	833,5	820 - 845
Kinematická viskozita při 40 °C [mm ² . s ⁻¹]	2,97	4,55	2,66	2,0 – 4,5
Destilace				
Odpařené množství při 250 °C [objem. %]	4,8	< 0,1	39,7	Max. 65

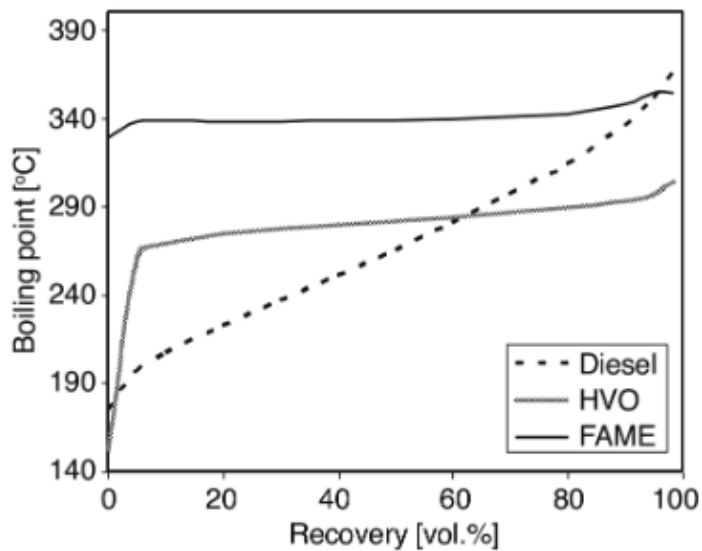
Odpařené množství při 350 °C [objem. %]	97,8	91,9	94,7	Min. 85
95 % objemu odpařeno při [°C]	296	354	351	Max 360
Bod vzplanutí [°C]	75	170	60	Min. 55
Teplota samovznícení				
Cetanový index	95	59	52	Min. 46
Bod zákalu [°C]	-19	-5	-7	-
CFPP [°C]	-23	-26	-24	Max. -20
Bod tuhnutí [°C]	-53	-30	-30	-
Obsah aromatických uhlovodíků [hm. %]	0,2	< 0,1	25	-
Obsah síry [mg/kg]	< 2	4	8	Max. 10
Obsah dusíku [mg/kg]	2	8	34	-

1.2.5.1 Destilační křivka

Jedním z jakostních parametrů paliv je destilační křivka získaná pomocí destilační zkoušky, která zjišťuje množství odpařeného vzorku paliva při atmosférickém tlaku při postupném zvyšování teploty. Tato zkouška ověřuje frakční složení daného paliva a ilustruje odpařování paliva při vstřiku do válce motoru. Z tvaru křivky a jednotlivých milníků destilace lze odvodit chování paliva při nízkých teplotách okolí z hlediska spalovacího procesu při startu. Lehké frakce paliva s nízkými teplotami varu jsou zásadní pro snadný studený start, frakce s vysokými teplotami varu se nemusí při procesu hoření zcela spálit a mohou vést k tvorbě usazenin v motoru a zvýšenému produktu některých emisí. Požadavky na jednotlivé body destilační křivky stanovuje i norma ČSN EN 590. (1,25)

Jak je patrné z obr. 3, biopaliva mají oproti naftě relativně úzké rozmezí bodu varu. V případě HVO se většina paliva odpařuje po překročení zhruba 260 °C. Většina paliva se odpaří při teplotách kolem 300 °C, což má pozitivní vliv na dokonalost spalování a tím i emise CO. Oproti motorové naftě začíná odpařování později, avšak rychleji končí. Z tohoto lze usuzovat, že HVO bude mít menší problémy při vznícení v prvních pracovních cyklech ihned po startu, avšak spalování by mělo být stabilnější.

Obrázek 3 - porovnání destilačních křivek zkoumaných paliv – převzato z (16)



MEŘO má destilační křivku v podstatě vodorovnou a odpařování probíhá ve velmi malém rozmezí teplot. Destilace začíná až v blízkosti teploty, při které končí destilace motorové nafty. MEŘO by dle destilační křivky mělo mít nejhorší vlastnosti při studených startech v porovnání s ostatními zkoumanými palivy. Hoření by však měl napomáhat obsah kyslíku v tomto palivu.

Naopak nafta má téměř lineární průběh a destilace probíhá přímo úměrně v závislosti na teplotě v rozsahu od 180 do 360 °C. Lehké frakce se odpařují již při nízkých teplotách, avšak konec destilace se nachází v relativně vysokých teplotách. Z hlediska startovatelnosti by měla mít nafta dobré vlastnosti, ale dá se usuzovat, že produkce CO bude vyšší vlivem nedokonalého spalování.

V případě zážehových motorů startovatelnost ovlivňují destilační vlastnosti benzínu v mnohem vyšší míře. Při startu se válci se musí vypařit co největší objem vstřikovaného paliva, aby vytvořil zápalnou směs se vzduchem. Během startu motoru je do válce dopravováno 10 krát, až 20 krát více paliva, než jaké je dávkováno při již zahřátém motoru. Z tohoto vyplývá, že pro úspěšný start je podmínkou odpaření minimálně 10 % dodaného paliva. Tento bod destilační křivky má zásadní vliv na startovatelnost motorů v podmínkách nízkých teplot. Teplota desetiprocentního bodu se většinou pohybuje v rozmezí 45 až 60 °C.

1.2.5.2 *Kinematická viskozita*

Příliš vysoká viskozita způsobuje nedokonalé spalování. Je to způsobeno tím, že při vstřiku paliva do pracovního prostoru motoru se vytvoří příliš velké kapičky, které se ve vzduchu působením aerodynamických sil nerozpadnou. Čím větší kapičky se při vstřiku vytvoří, tím horší je jejich následná schopnost odpařit se a dokonale spálit. Ze zkoumaných paliv má nejvyšší viskozitu MEŘO, které má oproti motorové naftě viskozitu téměř dvojnásobnou. Jedná se o jednu z jeho největších nevýhod. Proti této vlastnosti však působí obsah kyslíku v tomto palivu, který podporuje jeho hoření a tendenci k dokonalému spálení. HVO je s naftou z tohoto hlediska srovnatelné. Viskozitu lze snížit ohřevem paliva, přidáním vhodných aditiv.

1.2.5.3 *Cetanový index*

Z hlediska startovatelnosti paliva je cetanový index, respektive cetanové číslo, jedním z klíčových parametrů. Vyšší cetanové číslo pozitivně ovlivňuje šanci paliva na úspěšné vznícení, zkracuje průtah vznícení a zlepšuje spalování. Suverénně nejvyšší cetanový index ze zkoumaných paliv má HVO, což by se mělo pozitivně projevit na jeho chování při nízkých teplotách.

1.3 Start studeného motoru

Spalovací motor se samostatně nemůže uvést do provozu, což je jednou z jeho nevýhod. Pro uvedení do provozu musí být použit cizí zdroj energie, který musí splnit prekondice potřebné pro samostatný chod spalovacího motoru. Tento zdroj se nazývá spouštěč. Jedná se o stejnosměrný synchronní elektromotor, na jehož rotorové vinutí se přes komutátor přivádí proud z akumulátoru vozidla. Vinutí statoru poté vytváří magnetické pole. Spouštěče u osobních automobilů dosahují výkonu 0,5 – 1,5 kW a 4,4 – 8 kW v případě těžkých nákladních automobilů.

Mezi požadavky patří:

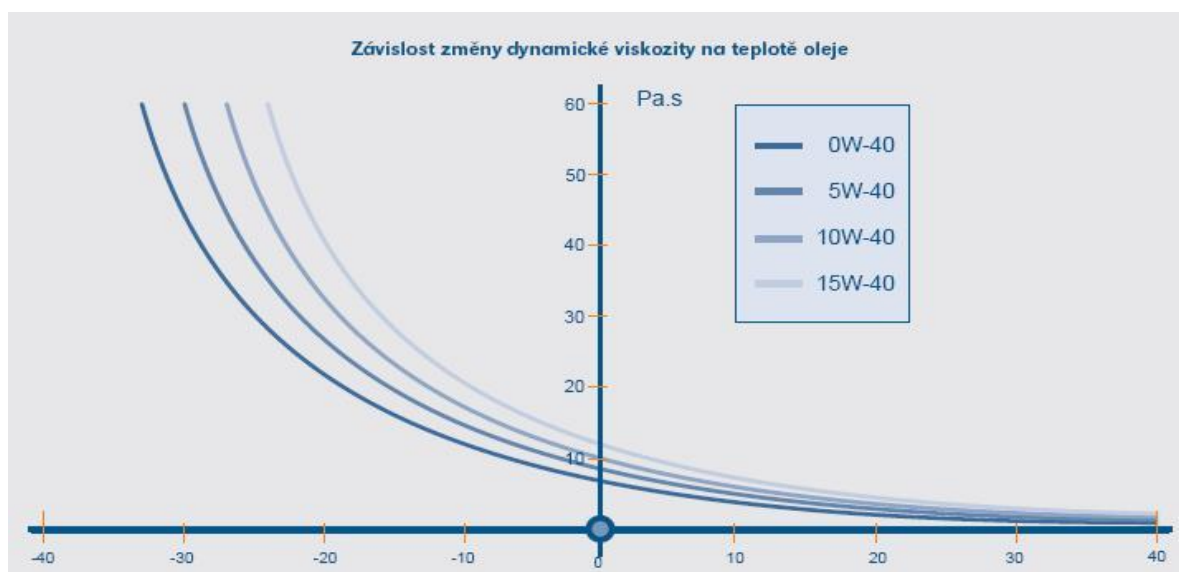
- Překonat pasivní odpory motoru
- Zvýšit otáčky motoru z klidu na hodnoty 40 – 150 min⁻¹ pro motory s přímým vstřikem, respektive 80 – 200 otáček min⁻¹ pro vznětové motory s nepřímým vstřikem.

Požadované otáčky motoru, kterých musí spouštěč dosáhnout, souvisí s další nevýhodou spalovacích motorů, což je nevýhodný průběh točivého momentu. Ve velmi nízkých otáčkách je motor schopen generovat pouze omezený točivý moment. Při startu motoru musí být točivý moment vysoký na tolik, aby překonal pasivní odpory motoru. Vlivem tepelné roztažnosti jsou vůle v motoru nepatrně zmenšeny, což se týká i kanálků, kterými proudí mazací olej. (1)

Nízká teplota okolí zásadně ovlivňuje vlastnosti maziv užívaných v motoru, který jsou naprosto zásadní pro bezproblémový a bezporuchový chod motoru. Pokud není olej schopen řádně mazat, případně být dopraven na místo určení, hrozí katastrofální poškození motoru. V lepším případě se sníží jeho životnost vlivem rychlého opotřebení součástí, které jsou ve vzájemném kontaktu. S klesající teplotou se zvyšuje viskozita olejů (někdy tzv. vazkost), neboli schopnost tekutiny klást odpor proti vzájemnému posuvu částic. V důsledku tohoto jevu jsou pasivní odpory při startu motoru nezahřátému na provozní teplotu vyšší, čímž klesá jeho celková účinnost a tím se zvyšuje spotřeba paliva.

Závislost změny viskozity na teplotě je vyjádřena viskozitním indexem. Čím je jeho hodnota vyšší, tím méně se viskozita s teplotou mění. Někdy se vlastnosti oleje vyjadřují pomocí dynamické viskozity (nebo také součinitele úměrnosti μ [Pa.s]), což je součin kinematické viskozity a hustoty.

Obrázek 4 - závislost dynamické viskozity na teplotě - převzato z (22)



V praxi se pro značení olejů, které vyjadřuje jejich vlastnosti, používá klasifikace SAE (Society of Automotive Engineers), jež rozděluje oleje do šesti zimních a pěti letních tříd. Pro značení zimních tříd se používá písmeno W (Winter) bezrozměrné číslo, které je analogií viskozitě, avšak reálně nevyjadřuje žádnou fyzikální veličinu. Čím vyšší toto číslo je, tím je za dané teploty olej viskóznější. Letní třída olejů se pak značí pouze tímto bezrozměrným číslem. Číslo za pomlčkou v názvu charakterizuje viskozitu oleje při provozních teplotách. Vybrané vlastnosti jednotlivých olejů jsou uvedeny v tabulce 5. (21,22)

Tabulka 5 - Viskozitní třídy zimních olejů pro motorová vozidla dle SAE J300 (22)

Označení	max. viskozita [Pa.s]	hraniční čerpací teplota [°C]
0W	62 při -35°C	-40
5W	66 při -30°C	-35
10W	70 při -25°C	-30
15W	70 při -20°C	-25
20W	95 při -15°C	-20
25W	130 při -10°C	-15

1.3.1 Startování motoru

Startovatelnost vznětových motorů, respektive úspěšnost jeho startu, závisí primárně na kompresním poměru, maximální teplotě komprese, startovacích otáčkách a vlastnostech použitého paliva. Při spuštění motor za pomoci startéru (napájeného z akumulátoru) dosáhne požadovaných otáček, které se pohybují v rozmezí 100 – 300 za minutu. Startér musí překonat značné pasivní odpory motoru. Při požadovaných otáčkách začne palivový systém do válce vstříkovat palivo. Úkolem je ve válci vytvořit podmínky vhodné ke vznícení směsi paliva se vzduchem a uvést motor do stavu, kdy je možné samovolně udržovat volnoběžné otáčky. (19)

Na rozdíl od zážehových motorů, u kterých je dojde elektrickou jiskrou k zážehu palivové směsi, nemůže být palivo ve válci přítomno již v průběhu komprese. Mohlo by dojít k vznícení již před horní úvratí. Cílem je samovolné vznícení v momentě, kdy je píst blízko horní úvratí. V tento okamžik se do spalovacího prostoru vstříkne dávka paliva, která se vlivem vysoké teploty vzduchu vznítí. (2,19)

1.3.2 Vstřik paliva

Vstřik paliva do válce je realizován při velmi vysokých hodnotách tlaku, v případě moderních vstřikovacích systémů může tlak běžně dosáhnout 200 MPa. Je tedy zřejmé, že palivo je injektováno při velmi vysokých rychlostech. Vlivem vysokého tlaku ve válci a rychlosti vstřiku se proud paliva rozpadne na malé kapičky, z jejichž povrchu se při vysoké teplotě začne palivo odpařovat. Vytvořené výpary se poté skokově vznítí a vytvoří ohniska hoření. Dnešní palivové systémy navíc mohou dávku paliva rozdělit na několik dílčích vstřiků. Tento proces je ovládán řídicí jednotkou motoru. Vícenásobné vstřikování rovněž přispívá k procesu spalování. Lze také využít tzv. předvstřiku (někdy označován jako pilotní vstřik, nebo PI – Pilot Injection), což je omezená dávka paliva dopravená do válce před hlavními vstřiky. Při pilotním vstřiku je elektromagnetický ventil vstřikovače otevřen jen částečně a na velmi krátkou dobu. Spalování paliva z pilotního vstřiku zvýší teplotu ve válci již před zahájením hlavního vstřiku, což způsobí, že hlavní dávka paliva začne hořet s menším průtahem vznícení a má tím pozitivní dopad na startovatelnost a hlučnost motoru. (1,15)

1.3.3 Nasávaný vzduch

Vzduch je elementární složkou pro uskutečnění hoření ve válci spalovacího motoru, při jeho absenci není možné tuto chemickou reakci uskutečnit. Z hlediska hoření je nejdůležitější složkou kyslík, který tvoří cca 21 % hmotnosti vzduchu. Parametry vzduchu, jako tlak, teplota a vlhkost, pak mají přímý dopad na chování motoru.

Tabulka 6 - složení vzduchu (17)

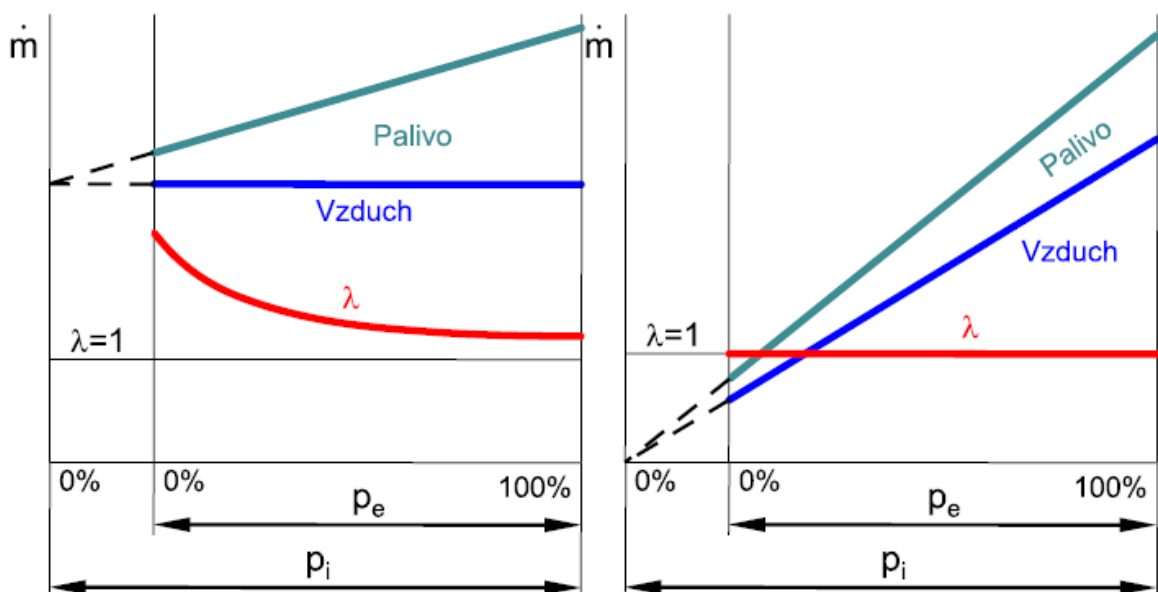
Plyn	Chemická značka	% objemu
Dusík	N ₂	78,084
Kyslík	O ₂	20,948
Argon	Ar	0,934
Oxid uhličitý	CO ₂	0,031
Další prvky		0,003

Dopravu čerstvého vzduchu do spalovacího prostoru zajišťuje sací potrubí. Měření obsahu se převážně hmotnostní tok vzduchu. V pracovním prostoru se vzduch smísí s palivem za vzniku vysoce hořlavé směsi.

V případě zážehových motorů se množství nasátého vzduchu a paliva používá k regulaci chodu, respektive jeho otáček a točivého momentu z důvodu měnících se požadavků. Cílem je regulace tepla použitého při přeměně na mechanickou práci. Řídící jednotka se dle požadovaného výkonu reguluje množství paliva dodávaného do systému, množství nasátého vzduchu je regulováno pomocí škrtící klapky. V ideální případě je zachován stechiometrický poměr $\lambda = 1$. Tato metoda regulace se nazývá kvantitativní, je zobrazena na obrázku č. 4 vpravo.

V případě atmosférických vznětových motorů zůstává objem vzduchu (někdy označován jako váha vzduchu) konstantní v případě atmosférických motorů, přičemž regulace probíhá pomocí změny množství dodaného paliva. Tento způsob regulace se nazývá kvalitativní (obrázek č. 4 vlevo). Hodnota součinitele přebytku vzduchu λ se při regulaci samozřejmě mění. Na rozdíl od zážehových motorů není možno spalovat směsi, které se svým složením blíží stechiometrickému poměru z důvodu horší odpařitelnosti oproti benzínu. Vznětové motory pracují se součinitelem přebytku vzduchu λ v hrubém rozmezí od 1,3 (při vysokém zatížení) do 10 (při volnoběžném režimu).

Obrázek 4 - Kvalitativní a kvantitativní regulace (2)



Množství vzduchu nasátého do motoru závisí i na použité technologii. Pokud je vzduch do válce nasáván pouze podtlakem vzniklým pohybem pístu směrem k dolní úvrati, je jeho množství limitováno tlakem na konci na konci sacího zdvihu, který je srovnatelný s atmosférickým tlakem. Proto se tento motor s tímto postupem plnění válce nazývá atmosférický, případně s přirozeným sáním. Přepřňované motory pak využívají k navýšení plnicího tlaku ve válci kompresor, případně turbodmychadlo. Čím je vyšší tlak, tím větší objem vzduchu se ve válci nachází. Proto lze spálit větší množství paliva, což uvolní větší množství tepelné energie v něm uložené během jednoho pracovního cyklu. Tímto dojde k navýšení výkonu a účinnosti motoru. V případě turbodmychadla je účinnost zvýšena i proto, že ke kompresi při sání je využit tlak spalin z výfukového systému.

Plnicí tlak turbodmychadla je závislý na režimu zatížení. Při vysokém zatížení, jež je charakterizováno i vyššími otáčkami motoru, musí turbodmychadlo dodávat vyšší množství plnicího vzduchu. Při stlačení vzduchu v turbodmychadle dochází rovněž k jeho zahřátí, což vede k mírnému snížení jeho hustoty a tím i snížení hmotnostního naplnění. Při startu motoru a volnoběhu turbodmychadlo do chodu nijak nezasahuje. (1,2)

1.3.4 Vliv teploty vzduchu na studený start

Teplota vzduchu na začátku komprese ovlivní teplotu na konci komprese dle rovnice

$$T_2 = T_1 \cdot \varepsilon^{\kappa-1} \quad (1)$$

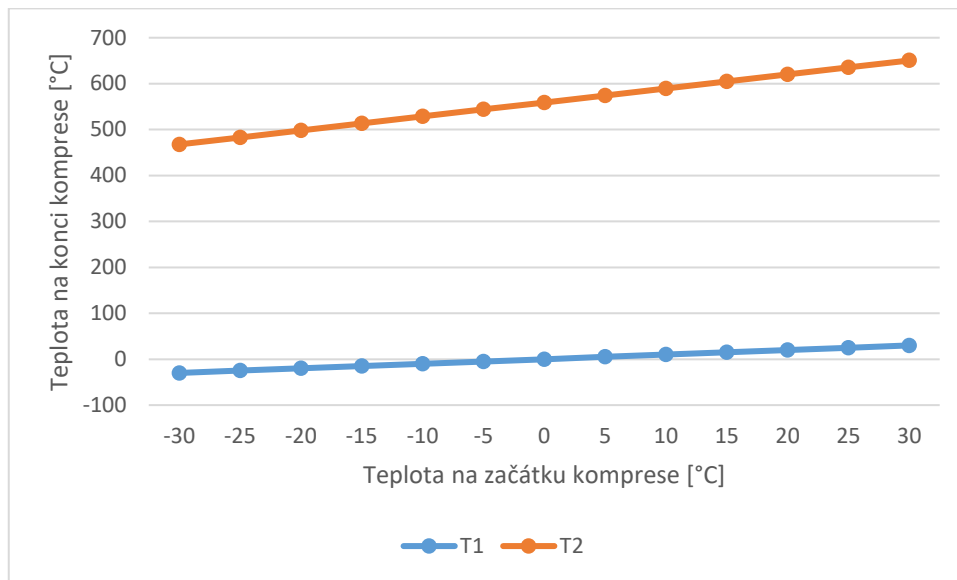
kde:

- T_1 teplota vzduchu na začátku komprese
- T_2 teplota na konci komprese
- ε kompresní poměr
- κ Poissonova konstanta = 1,4

Pokud na konci komprese není dosažena teplota potřebná pro vznícení směsi, palivo dopravené do spalovacího prostoru se nevznítí. Dosadíme-li do rovnice (1) za teplotu $T_1 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ (273,15 K) a kompresní poměr $\varepsilon = 16,2$ (Škoda Octavia 2,0 TDI 3. generace) dostaneme teoretickou hodnotu $T_2 = 559,01 \text{ }^\circ\text{C}$ (832,16 K).

Teoretická závislost teploty na začátku komprese T_1 a konci komprese T_2 jsou znázorněny na obrázku 5. Je jasně patrné, že teplota T_2 roste rychleji, než teplota T_1 při zachování konstantního kompresního poměru. Rozdíl teplot v sání o 20 °C způsobí rozdíl teplot po kompresi o zhruba 61 °C. Závislost je zobrazena v grafu č. 1.

Graf 1 - Závislost teplot na začátku a konce komprese



Výše zmíněné teploty jsou však jen teoretické, při reálné kompresi se vlivem studeného motoru zvětší vůle pístních kroužků, díky čemuž část nasátého vzduchu ze spalovacího prostoru unikne, čímž se v podstatě sníží kompresní poměr. Kompresi navíc neprobíhá adiabaticky, ale polytropicky s exponentem n , který se zjišťuje empiricky. Taktéž je zanedbán únik tepla přestupem do stěn válce. Skutečné teploty ve válci budou daleko nižší.

Při startu motoru navíc musíme brát v úvahu, že teplota vzduchu na konci sacího zdvihu není nijak ovlivněna teplem zbytků spalin, které by mohly ve válci zůstat z předešlého pracovního oběhu. Studené stěny válce rovněž nemohou předat žádné teplo.

1.3.5 Konstrukční prvky vozidla zlepšující podmínky studeného startu

1.3.5.1 Ohřev palivového filtru

Má za úkol zlepšit chování motoru při nepříznivých podmínkách, zejména při nízkých teplotách okolí. Elektrické topení ohřívá palivový filtr, což má pozitivní vliv na jeho průchodnost. Tímto konstrukčním opatřením lze zvýšit teplotu, při které lze nastartovat, až o 6 °C, respektive teoreticky o tuto hodnotu snižuje bod zákalu paliva CFPP.

1.3.5.2 Ohřev bloku motoru pomocí nezávislého topení

Nezávislá topení osobních automobilů lze rozdělit na horkovzdušná, horkovodní a pomocí elektrických topných těles. První dva zmíněné systémy jsou používány jako zdroj tepla spalování paliva ve speciální komoře, která je opatřena žhavicí svíčkou. Do spalovacího prostoru je dopraveno palivo z nádrže a vzduch pomocí malého kompresoru. Hořením paliva poté vzniká teplo, spaliny jsou odvedeny do výfukového systému. Horkovzdušný systém rozvádí teplo z žeber spalovací komory vzduchem pomocí ventilátoru, horkovodní systém rozvádí teplo pomocí chladicí kapaliny. Celý proces je ovládán řídicí jednotkou komfortních systémů. Pro zahřátí bloku motoru a interiéru spotřebuje nezávislé topení zhruba 0,2 litru paliva, avšak tento objem je ušetřen absencí chodu motoru mimo jeho provozní teplotu. Čerpadlo, respektive ventilátor je poháněn akumulátorem vozidla, je tedy vhodné držet motor v provozu zhruba stejný čas, který byl potřeba pro ohřev, z důvodu dobití akumulátoru za jízdy.

„Moderní nezávislá topení předehřívají nejen interiér vozu, ale také chladicí soustavu motoru. Tím odpadá zátěž spojená se startováním studeného motoru a snižuje se tak jeho opotřebení. Studený start totiž představuje pro motor přibližně takovou zátěž, která se vyrovná zhruba 70 kilometrům jízdy po dálnici.“ (23) Ohřev interiéru, včetně čelního skla, navíc pozitivně přispívá k aktivní bezpečnosti. Tento systém lze u většiny výrobců vozidel ovládat i dálkově pomocí ovladače ze vzdálenosti až jednoho kilometru. Uživatel zadá čas odjezdu a požadovanou teplotu veze a řídicí jednotka klimatizace tento požadavek zařídí. Čas potřebný pro dokončení ohřevu motoru a interiéru se pohybuje mezi 10 a 20 minutami. (23,24)

1.3.5.3 Žhavicí svíčka

Dosažení podmínek vhodných k vznícení směsi u dieselových motorů při teplotách okolí do cca 5 °C není složité. Při nižších teplotách však musí být dosažení maximální teploty komprese vhodná pro vznícení směsi. Jedním ze způsobů, jak zlepšit startovací podmínky, je využití žhavicích svíček. Jedná se o odporový prvek napájený z akumulátoru, který zvýší teplotu ve spalovacím prostoru před startem. Tento proces proběhne v rámci několika sekund. Po dosažení volnoběžného chodu, případně krátce po něm, přestává být žhavicí svíčka aktivní. Žhavicí svíčka není nutná při každém startu. Teplota okolí, při které žhavicí svíčka vypomáhá se startem motoru, se odvíjí individuálně dle modelu motoru. (1)

V experimentální části této práce je otvor pro žhavicí svíčku využit pro instalaci snímače tlaku ve válci motoru.

2 Cíle práce

Cílem této práce bude provést série měření na testovacím vozidle s cílem zajistit dostatečné množství relevantních provozních dat z reálného provozu vznětového motoru při volnoběhu za účelem porovnání vlastností motorové nafty a hydrogenovaného rostlinného oleje z hlediska startovatelnosti za nízkých teplot. Měření bude probíhat v areálu České zemědělské univerzity na voze značky Škoda, model Rapid. Získaná data budou poté analyzována a převedena do formy, ve které bude nejlépe popisovat zjištěné výsledky.

3 Praktická část a měření

Měření dat probíhalo staticky na testovacím vozidle situovaném v plechové garáži. Vůz byl osazen několika měřícími a diagnostickými nástroji. Jednou z nepříjemností, se kterou jsme se při získávání dat setkali, byl fakt, že ačkoliv byla teplota vzduchu vně garáže stanovena na $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, uvnitř se teplota vzduchu pohybovala kolem $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, případně lehce nad touto hranicí. Díky tomuto se bohužel nepodařilo získat data v podmínkách hluboko pod bodem mrazu. Nicméně získaná data jsou dostatečně vypovídající a vliv odlišných vlastností jednotlivých paliv je dobře znatelný.

3.1 Principy měření

Současné spalovací motory a proces jejich fungování se dnes stává stále více závislý na elektronice. Palubní počítače a řídicí jednotky dnes ovládají většinu provozních parametrů. Bez vhodných diagnostických nástrojů prakticky nelze sledovat procesy, které se při provozu odehrávají a případně odhalit možné poruchy. Metodu vozidlové diagnostiky lze rozdělit na paralelní a sériovou. Sériová diagnostika spočívá ve čtení kódů, případně záznamů, z řídicí jednotky, ke které se připojíme pomocí diagnostické zásuvky, tzv sériové rozhraní. Paralelní diagnostika se zaměřuje na přímé měření fyzikálních veličin, například měření průběhu napětí sensorů a akčních členů pomocí osciloskopu. V některých případech je nutné použít sériovou diagnostiku pro určení oblasti závady a paralelní diagnostiku pro ověření správné funkčnosti čidel a sensorů, které mohou chybový kód vyvolat v případě jejich poruchy.

V této části práce budou pro sběr dat použity obě zmíněné metody.

3.1.1 Měření indikovaného tlaku

Při každém startu a následném chodu motoru bude měřen indikovaný tlak ve válci motoru. Z druhého válce motory byla odebrána žhavicí svíčka, na jejíž místo byl nainstalován snímač indikovaného tlaku, jež bude tuto veličinu zaznamenávat. Pomocí tlaku ve válci budeme schopni analyzovat průběh hoření ve válci, které svou přeměnou energie generuje tlak. Z průběhu bude taktéž možno odvodit, zda k vznícení paliva vůbec došlo, či nikoliv.

Absencí žhavicí svíčky navíc vyniknou vlastnosti zkoumaných paliv, jelikož při měření tato komponenta nebude nijak zasahovat do průběhu hoření v tomto válci. Schopnost vznítit se tedy bude záviset pouze na jejich fyzikálních a chemických vlastnostech.

3.1.2 Měření polohy klikové hřídele

Poloha klikového hřídele je zásadní pro analýzu hoření ve válci motoru. Z její polohy lze stanovit polohu pístu, tedy v jaké části cyklu se píst momentálně nachází. Vstřík paliva je přesně načasován řídicí jednotkou, která se orientuje právě podle polohy klikové hřídele. Můžeme následně vyhodnocovat, v jaké části provozního cyklu došlo k vznícení paliva a jak dlouho probíhalo jeho hoření. Z polohy klikové hřídele lze rovněž stanovit průběh otáček motoru.

Při měření otáček motoru byl indikačním systémem zaznamenáván průběh signálu napětí Hallova snímače. Měření polohy klikové hřídele je založeno na detekování zubových mezer feromagnetického ozubeného kotouče připevněném na klikovém hřídeli (60° a 6° před horní úvratí). Hallův snímač zaznamenává posloupnost jednotlivých zubů a poskytuje obdélníkový signál. Z tohoto snímače řídicí jednotka čerpá informaci o poloze klikové hřídele a otáčkách motoru. (1)

3.1.3 Měření pulzů vstřikovačů

Aktivace vstřikovačů bude měřena pomocí aktivačního proudu, jenž bude měřen za pomoci proudových kleští. kombinaci s informací o času vstřiku lze stanovit průtah vznícení paliva ve válci, což je z hlediska startování motoru užitečný parametr.

3.1.4 Měření emisí

V průběhu experimentu budou měřeny také emise výfukových plynů. Rozdíly mezi zkoumanými palivy by měly být značné. Z obsahu emisí oxidu uhelnatého CO lze navíc odvodit, zda bylo palivo ve válci dokonale spáleno a zda došlo ke změně dokonalosti spálení v průběhu času.

Samotné měření bylo provedeno pomocí infračerveného spektrometru s Fourierovou transformací FTIR (Fourier Transform-Infrared), který je založen na spektrální analýze plynů. Využívá absorpci světla materiálem a dle jeho reakce na infračervené záření určí jeho chemické složení, jelikož každý plyn absorbuje specifické frekvence infračerveného záření.

3.2 Měřicí aparatura

- VCDS (VAG-COM) – počítačový program umožňující pomocí osobního počítače měřit a zaznamenávat diagnostická data řídicích jednotek vozidel koncernu Volkswagen Group. K vozidlu se připojuje pomocí diagnostické zásuvky (sériového rozhraní) vozu použitím diagnostické hlavy
- Snímač indikovaného tlaku (výrobce Optrand) na druhém válci
- Proudové kleště na elektrickém vedení vstřikovače druhého válce
- AD převodníky pro snímání předchozích dvou signálů a výstupů Hallova snímače polohy klikové hřídele
- National Instruments Labview
- Snímač atmosférického tlaku, teploty a vlhkosti
- FTIR spektrometr pro stanovení koncentrace složek výfukových plynů

3.3 Experimentální vozidlo

Měření probíhalo na vozidle značky Škoda, model Rapid 1,6 TDI. Technické parametry vozidla jsou uvedeny v tabulce 7. Motor vozidla nebyl před experimenty nijak upraven z pohledu palivového systému, ani nebyly provedeny žádné zásahy do řídicí jednotky. Je tedy simulován stav, kdy zákazník natankuje čisté alternativní biopalivo do vozidla, které je navrženo a zkonstruováno pro spalování motorové nafty. Technické parametry jsou uvedeny v tabulce č. 7.

Tabulka 7 - Technické parametry vozidla

Modelová řada	2016
Pohotovostní hmotnost [kg]	1295
Kód motoru	CXMA
Jmenovitý výkon [kW]	85 při 3500 - 4000 ot./min
Maximální točivý moment [Nm]	250 při 1500 - 3000 ot./min
Počet válců	4
Vrtání [mm]	79,5
Zdvih [mm]	80,5
Zdvihový objem [cm ³]	1596
Výkon [kW]	85
Pořadí zapalování	1-3-4-2
Přepíňování	Variabilní geometrie turbíny
Kompresní poměr	16,2
Vstřikování paliva	Common rail, piezoelektrický
Výfukový systém	DOC, LNT, DPF
Recirkulace výfukových plynů	Ano, vodou chlazené

3.4 Výsledky měření

Při měření bylo vozidlo cílem zaznamenat několik motorových cyklů ihned po zapnutí motoru. Počet zkoumaných cyklů vykonaný motorem bylo zvoleno mezi 8 – 13. Z naměřených dat lze poté odvodit průběh hoření, případně zda k hoření v daném cyklu vůbec došlo. Některá měření zaznamenávají delší časový úsek, který má sledovat stabilitu chodu motoru krátce po studeném startu. Pro potvrzení proběhlo při daných teplotách více měření. Pro interpretaci jsou v této práci použity nejvíce signifikantní výsledky, které charakterizují dané palivo.

3.4.1 Průběh tlaku a přivedeného tepla ve spalovacím prostoru

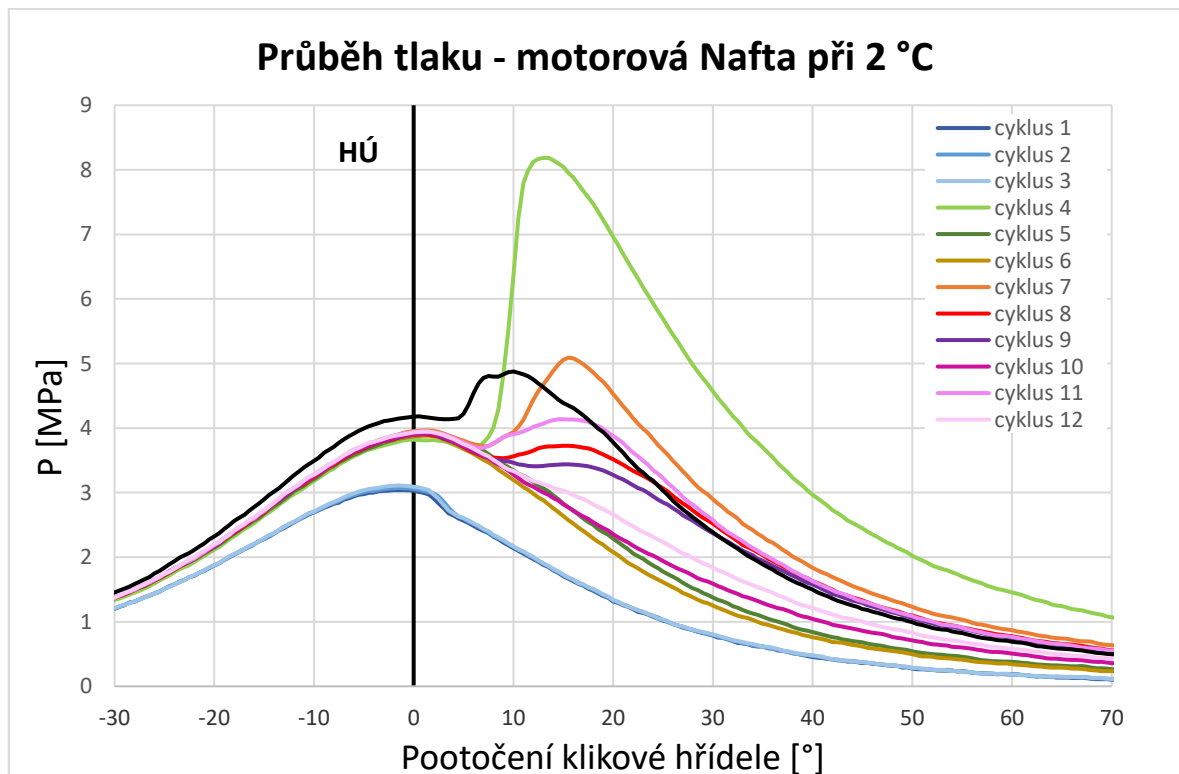
Jelikož podmínky ve válci při studeném startu nejsou ideální a v našem případě navíc není možno použít žhavící svíčku, jsou průběhy prvních cyklů zásadní pro stanovení startovatelnosti daného paliva. Jednotlivé cykly jsou pro přehlednost barevně odlišeny,

stejné barevné schéma je použito ve všech grafech dané kapitoly. Pro měření tlaku ve válci byla z motoru demontována žhavicí svíčka, která byla nahrazena snímačem tlaku. Dle tlaku ve válci můžeme stanovit, zda v daném cyklu došlo ke vznícení palivy a případně i jeho průběh. Na svislé ose můžeme vidět tlak ve válci v závislosti na stupni pootočení klikového hřídele a na vodorovné ose samotné pootočení klikového hřídele (KH), kde 0 symbolizuje horní úvrať.

3.4.1.1 Motorová nafta

Graf číslo 2 znázorňuje průběh prvních 12 cyklů startu motoru při použití motorové nafty. První tři cykly dosáhly v oblasti horní úvratě (dále HÚ) maximálního tlaku 3 MPa, přičemž ke vznícení paliva nedošlo. První naměřené hoření proběhlo až v cyklu číslo 4. Jak je patrné, první hoření proběhlo velmi intenzivně v porovnání s ostatními cykly. Toto silné iniciační vznícení je charakteristické pro motorovou naftu. Intenzivní hoření bude navíc patrně doprovázeno zvýšeným hlukem. HVO tento efekt vykazuje taktéž, nicméně prvotní vznícení většinou není v porovnání s motorovou naftou tak silné. V některých naměřených datových sadách se toto silné hoření nevyskytuje vůbec, je však velmi pravděpodobné, že k němu došlo v jiném válci motoru, který nebyl podroben měření.

Graf 2 - průběh tlaku ve válci při použití motorové nafty a teplotě 2 °C (č. 1)



V cyklech 5 a 6 k hoření opět nedošlo, další úspěšný cyklus je až v 7. v pořadí. Ten je o poznání méně intenzivnější se špičkovým tlakem lehce přesahující 5 MPa. V cyklech 8 a 9 již proběhlo pozvolné hoření, cyklus 10 byl neúspěšný, 11. hořel opět bez problémů a v cyklu 12 k hoření nedošlo. Je zřejmé, že úspěšnost vznícení v jednotlivých cyklech je relativně malá – 5 z 12 (cca 42%). Pro názornost byl do grafu přidán i porovnávací cyklus 400, při kterém je již hoření naprosto stabilní (cca 30 s po startu). U tohoto cyklu jsou již patrné jednotlivé vstřiky paliva.

Lze si též všimnout, že pozdější neúspěšné cykly mají vyšší hodnotu tlaku, než první 3 cykly. Ty dosahují tlaku kolem 3 MPa, avšak pozdější až 4 MPa. Nejpravděpodobnější vysvětlení tohoto jevu spočívá ve vůli pístních kroužků při studeném motoru. Za situace, kde k hoření ve válci v prvních cyklech nedošlo, má motor velmi malé otáčky a ve spalovacím prostoru je relativně nízký tlak. Díky tomu dochází zejména v oblasti horní úvrati k netěsnostem a únikům ze spalovacího prostoru. Při cestě pístu směrem k horní úvrati se pístní kroužky opírají o svou spodní hranu. V horní úvrati se píst zastaví a kroužky se opřou o svou horní hranu. V tento moment se nejvíce projeví axiální vůle pístních kroužků a plyn může ze spalovacího prostoru unikat. Při absenci hoření navíc tlak není dostatečný na to, aby vymezil tuto vůli a zajistil přítlak. Po primárním vznícení vzroste tlak plynů ve spalovacím prostoru a s ním i otáčky motoru. Díky tomuto je čas na únik plynů mnohem kratší a objem uniklého plynu je menší, což se projeví zvýšením naměřeného tlaku v neúspěšných cyklech po prvním vznícení paliva.

Naměřený průběh tlaků ve válci byl použit pro stanovení uvolněného tepla dQ dle vzorce

$$Q_i = \frac{1}{\kappa-1} \cdot [\kappa \cdot p_i \cdot (V_{i+1} - V_{i-1}) + V_i \cdot (p_{i+1} - p_{i-1})]$$

kde:

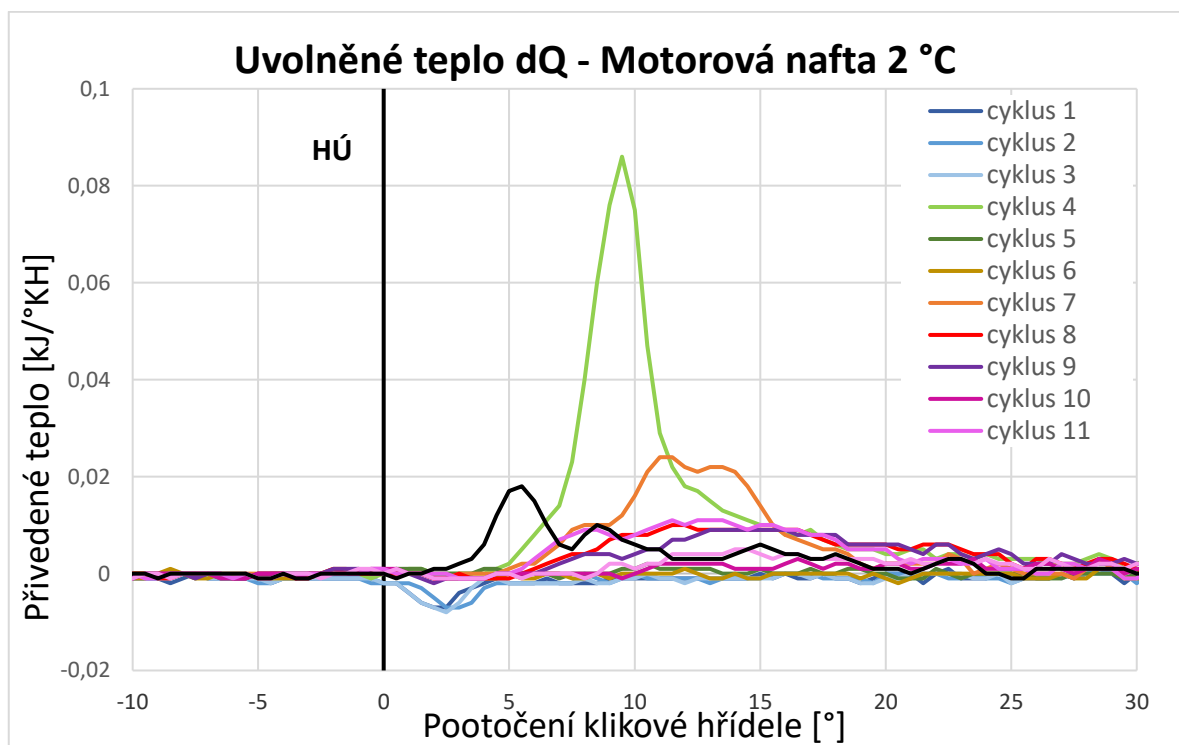
- Q_i množství přivedeného tepla na jednotku klikového hřídele
- p_i hodnota tlaku ve válci pro i-tou polohu klikového hřídele
- V_i objem spalovacího prostoru pro i-tou polohu klikového hřídele
- κ Poissonova konstanta = 1,4

za předpokladu konstantního polytropního koeficientu a zanedbání přenosu tepla do stěn spalovacího prostoru. (27)

Výsledná data podrobněji charakterizují průběh hoření v jednotlivých cyklech a podávají též viditelnější informaci jeho stability a intenzitě. Je navíc viditelné, jak dlouho hoření probíhá a jak se postupně mění jeho intenzita v čase. Z tohoto lze vyvodit komplexnější pohled na proces spalování paliva při studeném startu.

Jak je patrné z grafu 3, u prvních 3 cyklů ke vznícení paliva nedošlo. U cyklů 5 a 6 hoření opět neproběhlo, další zaznamenané hoření je vidět v cyklu 7. Toto hoření je v porovnání s cyklem 4 znatelně méně intenzivní. V cyklech 8, 9, 11, a 12 (cyklus 10 byl opět neúspěšný) je již vidět jistou pravidelnost a charakterizují způsob hoření motorové nafty ve válci krátce po startu. Hoření probíhá relativně dlouho, což lze pravděpodobně přisuzovat hoření nespáleného paliva na stěnách válce z předchozích neúspěšných cyklů a relativně nízkým cetanovým číslem. Úspěšné cykly navíc vykazují značnou nestabilitu. Pro porovnání byl do grafu přidán rovněž porovnávací cyklus 400, který je již z hlediska hoření stabilní. Porovnávací cyklus byl přidán do většiny výsledných grafů průběhu přivedeného tepla a průběhu tlaku ve spalovacím prostoru.

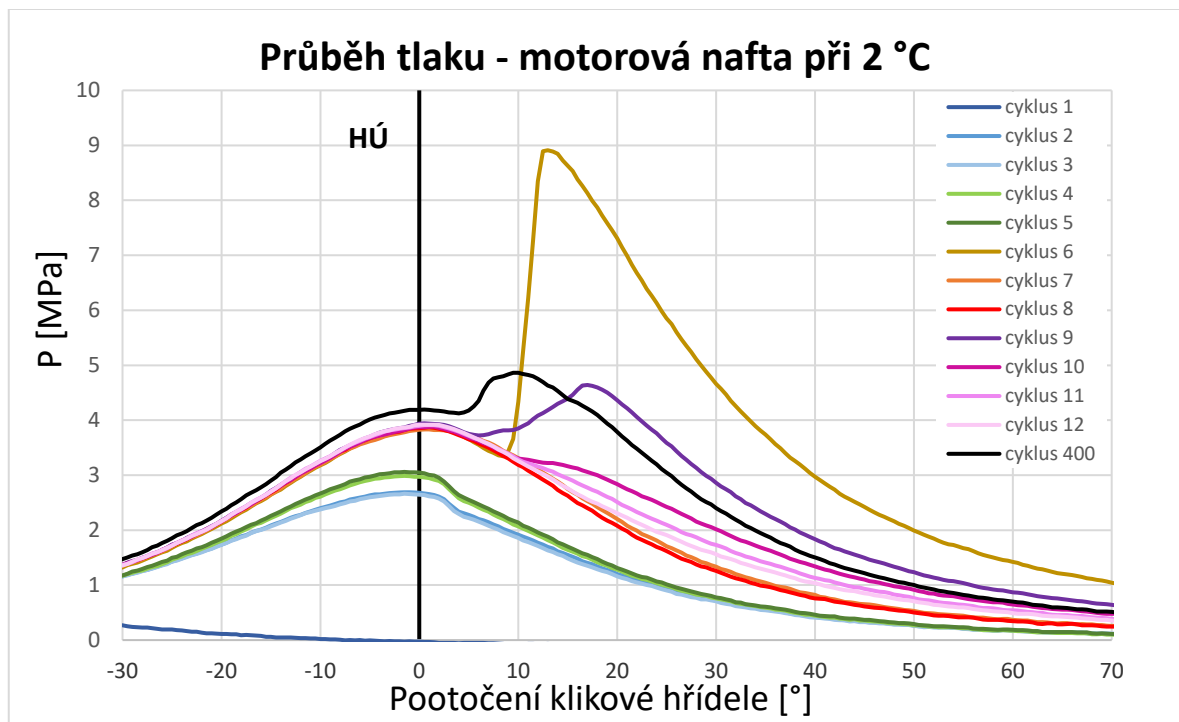
Graf 3 - průběh uvolněného tepla ve válci při použití motorové nafty a teplotě 2 °C (č. 1)



I zde je znatelný únik plynů ze spalovacího prostoru, který je v datech reprezentován zápornými hodnotami uvolněného tepla v prvních třech cyklech.

Druhé uvedené měření tlaků (viz graf číslo 4) má velice podobný charakter, jako měření první, tedy velmi silné iniciační hoření za vzniku vysokého tlaku (téměř 9 MPa), vysoký poměr cyklů s neúspěšným vznícením.

Graf 4 - průběh tlaku ve válci při použití motorové nafty a teplotě 2 °C (č. 2)



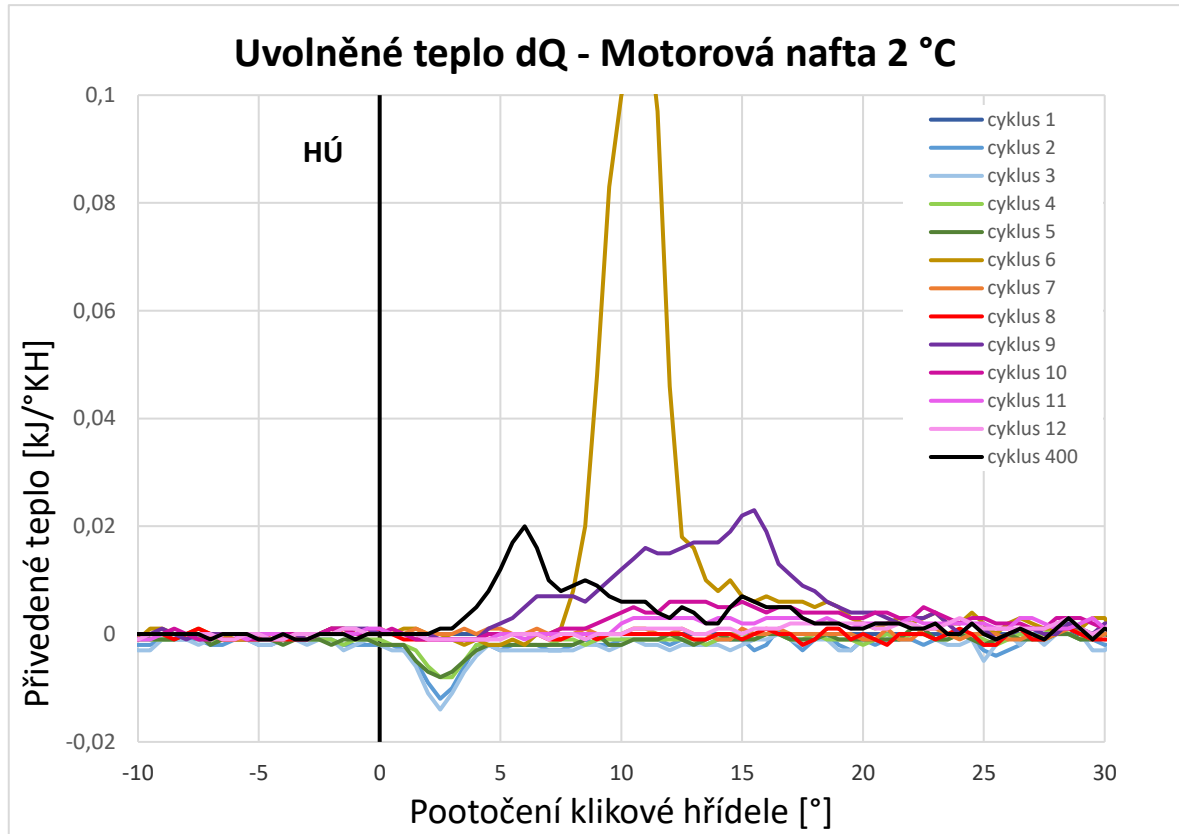
V této sadě dat se bohužel vyskytla chyba při měření a první cyklus nebyl pravděpodobně naměřen celý, nebo se vyskytla jiná sporadická chyba. Z jiných dat bylo zjištěno, že tento cyklus byl neúspěšný stejně, jako následujících 5 cyklů.

V tomto měření byl úspěšný až cyklus číslo 6, při kterém byl naměřený tlak dokonce o 1 MPa vyšší, než v předchozím měření. Další úspěšné cykly jsou až od čísla 9 – 12. Úspěšnost vznícení v tomto měření dosáhla opět pouze 42%. Je navíc patrné, že cykly, ve kterých hoření úspěšně proběhlo, se z pohledu tlaku výrazně neliší od cyklů neúspěšných. Hoření tedy bylo velmi málo intenzivní a docházelo k němu jen se značnými potížemi.

V průběhu přivedeného tepla v grafu č. 5 vidět úvodní cyklus 6, který navíc hořel ještě intenzivněji, než inicializační cyklus v předchozím měření přivedeného tepla – dosáhl hodnoty $dQ = 0,118$ kJ (pro přehlednost a názornost dalších cyklů byl rozsah osy Y

ponechán). Kromě cyklů 6 a 9 hoří ostatní úspěšné cykly jen s velmi malou intenzitou a vytvářejí téměř rovnoběžku s osou X.

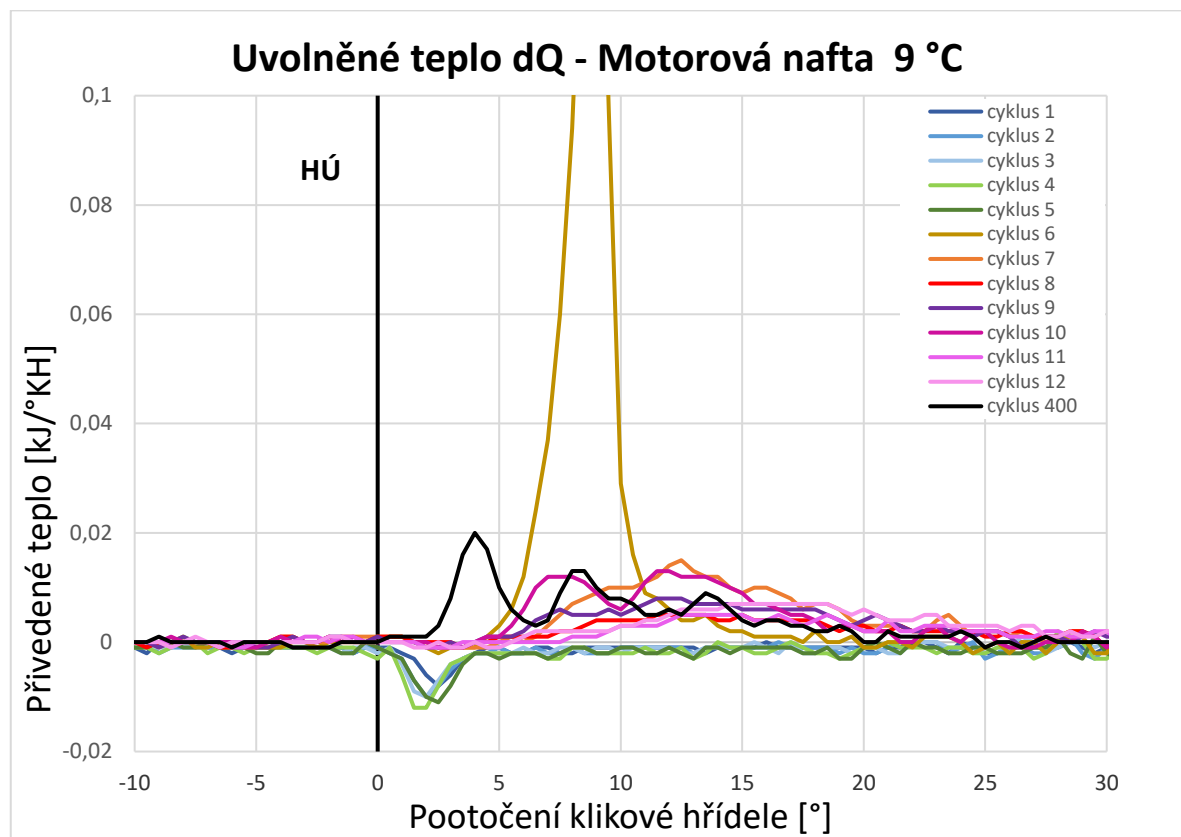
Graf 5 - průběh uvolněného tepla ve válci při použití motorové nafty a teplotě 2 °C (č. 2)



Z důvodu možnosti porovnání výsledků proběhlo měření i při teplotách kolem 8 °C. Při vyšších teplotách bylo očekáváno zlepšení, které však dle naměřených dat není nijak markantní. V oblasti stability hoření byl zaznamenán určitý posun směrem k lepšímu. Jednotlivé cykly jsou si více podobné a celková úspěšnost vzněcování je rovněž lepší. Prvních 5 pokusů o vznícení bylo neúspěšných, teprve v 6. cyklu bylo zaznamenáno intenzivní hoření, kdy tlak dosáhl hodnoty cca 8,5 MPa. S výjimkou cyklů 7 a 10, které se již podobají porovnávacímu cyklu, vykazují zbývající cykly zhruba stejný průběh tlaku, který má sice malou intenzitu, avšak z hlediska úspěšnosti vzněcování jsou úspěšné. Z naměřených 12 cyklů bylo 5 cyklů neúspěšných, tedy 42 %, stejně jako v případě měření při 2 °C. Při druhém měření za této teploty bylo ovšem zaznamenáno 7 úspěšných cyklů, což je zhruba 58 %.

Z hlediska uvolněného tepla v grafu č. 6 můžeme již při teplotě 9 °C pozorovat výrazně stabilnější průběh hoření, jenž v pozdější fázi veskrze kopíruje porovnávací cyklus. Jednotlivé cykly jsou si navzájem podobné. Úvodní intenzivní vznícení v tomto případě dosáhlo hodnoty $dQ = 0,174$ kJ.

Graf 6 - průběh uvolněného tepla ve válci při použití motorové nafty a teplotě 9 °C



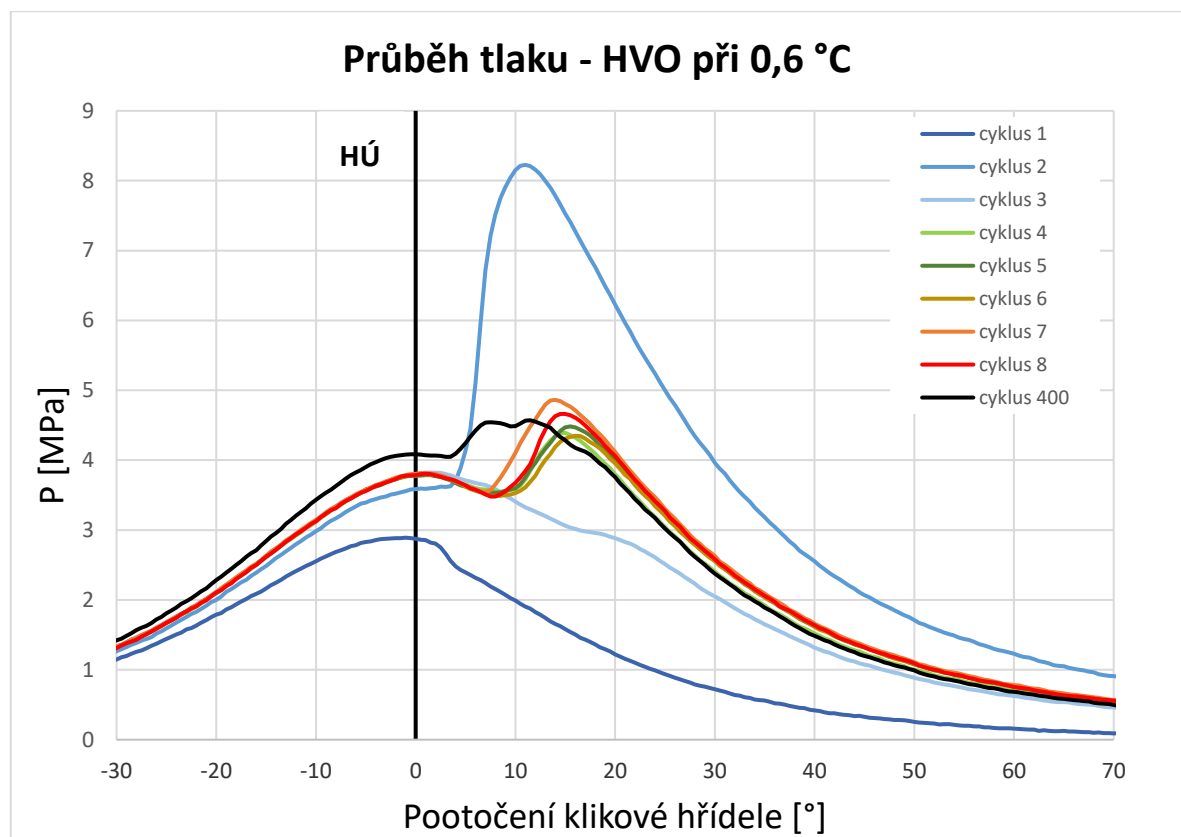
3.4.1.2 HVO

V případě HVO se naměřené hodnoty oproti motorové naftě značně liší. Při pohledu na grafy z výsledků měření HVO je jednoznačné, že se toto palivo v nízkých teplotách chová velice stabilně.

Neúspěšné hoření při měření zobrazeném v grafu č. 7 bylo zaznamenáno pouze v případě prvního cyklu, v ostatních již bylo vznícení paliva úspěšné. Následující cyklus č. 2 vykazuje silné počáteční hoření, stejně jako u motorové nafty. Tato intenzivní hoření však ve většině případů u HVO nepřesáhnou hodnotu $P = 8$ MPa, u motorové nafty naopak většina naměřených hodnot primárních vznícení překonala tuto hodnotu. V cyklu 3 byl průběh tlaku poněkud zvláštní – v počáteční fázi kolem $\alpha = 6,5^\circ$ vykazuje velmi malý nárůst tlaku charakteristický pro počátek hoření, nicméně tlak vzápětí klesne a chování je stejné, jako

by ve válci k vznícení paliva nedošlo. Tlak nicméně opět vzroste v poloze $\alpha = 17^\circ$. Palivo se tedy vznítilo relativně daleko za horní úvratí. Dle naměřeného tlaku však lze usuzovat, že intenzita hoření byla v tomto případě minimální. Všechny další cykly již zřetelně vykazují pravidelnost a stabilitu. Z tohoto důvodu byl počet uvedených cyklů v případě HVO redukován na 8, jelikož následující cykly jsou si velmi podobné. Počet cyklů byl redukován i v grafech průběhu tlaku, kde uvádění většího počtu naměřených cyklů pouze zhoršuje přehled v daných grafech.

Graf 7 - průběh tlaku ve válci při použití HVO a teplotě $0,6^\circ\text{C}$

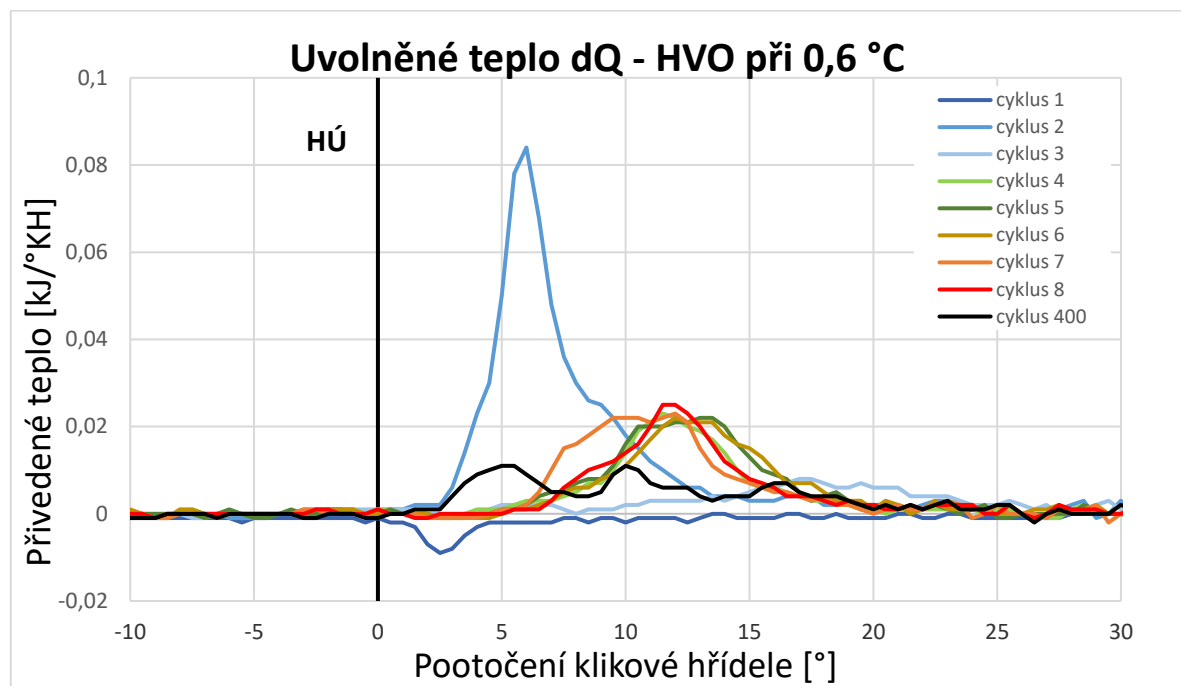


Z uvedených osmi cyklů jich bylo 7 úspěšných (cca 88 %), nehledě na skutečnost, že měření proběhlo při teplotě o $1,4^\circ\text{C}$ nižší, než v případě motorové nafty.

V grafu č. 8 uvolněného tepla dQ je rozdíl mezi HVO a motorovou naftou ještě markantnější. Z řady vybočují pouze neúspěšný cyklus č. 1, cyklus č. 2, ve kterém došlo k intenzivnímu primárnímu vznícení a cyklus č. 3, kde začalo hoření relativně pozdě a probíhalo velmi dlouho s malou intenzitou. Kromě těchto tří cyklů jsou však průběhy takřka stejné, což značí velmi vysokou stabilitu hoření velice rychle po nastartování motoru i za nízkých

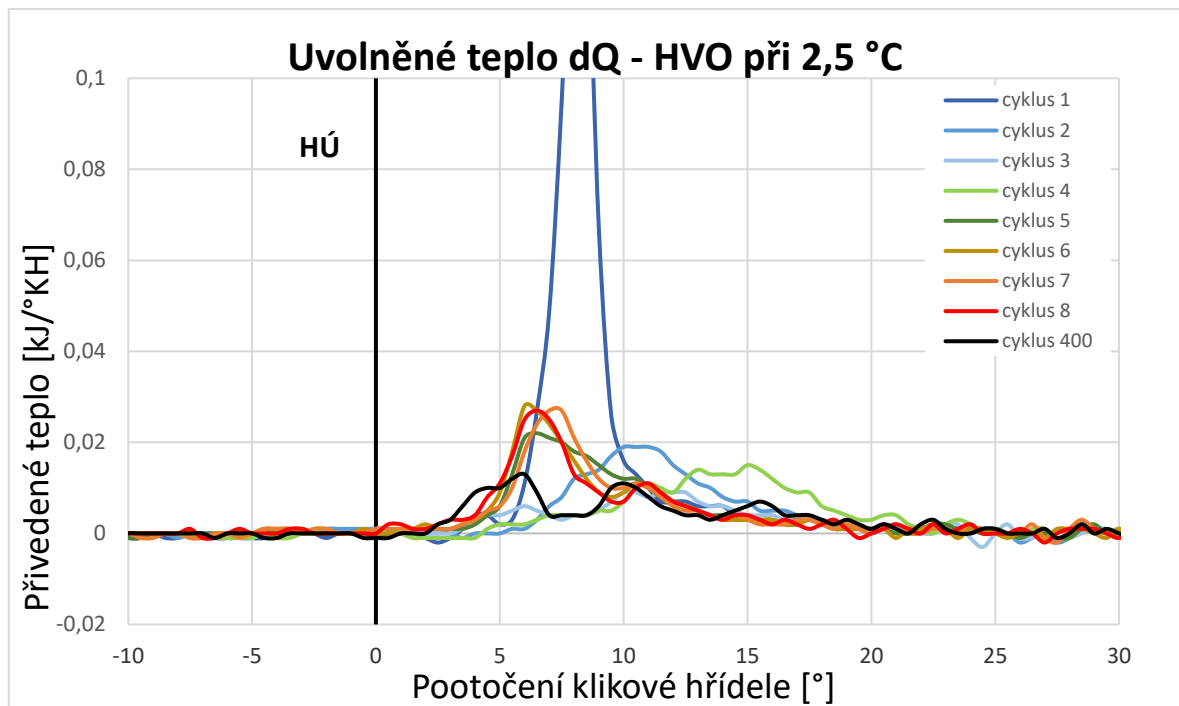
teplot. Z dat rovněž vyplývá, že krátce po startu hoří HVO intenzivněji, než je tomu v uvedeném porovnávacím cyklu 400, což je pravděpodobně způsobeno zvýšenými dávkami paliva. U motorové nafty naopak probíhá hoření po startu zhruba stejně, nebo méně intenzivně ve srovnání s porovnávacím cyklem, což naznačuje, že v úvodních cyklech a pravděpodobně zde dochází i k nedokonalému hoření. Toto podezření bude možné potvrdit analýzou koncentrace oxidu uhelnatého ve výfukových plynech.

Graf 8 - průběh uvolněného tepla ve válci při použití HVO a teplotě 0,6 °C



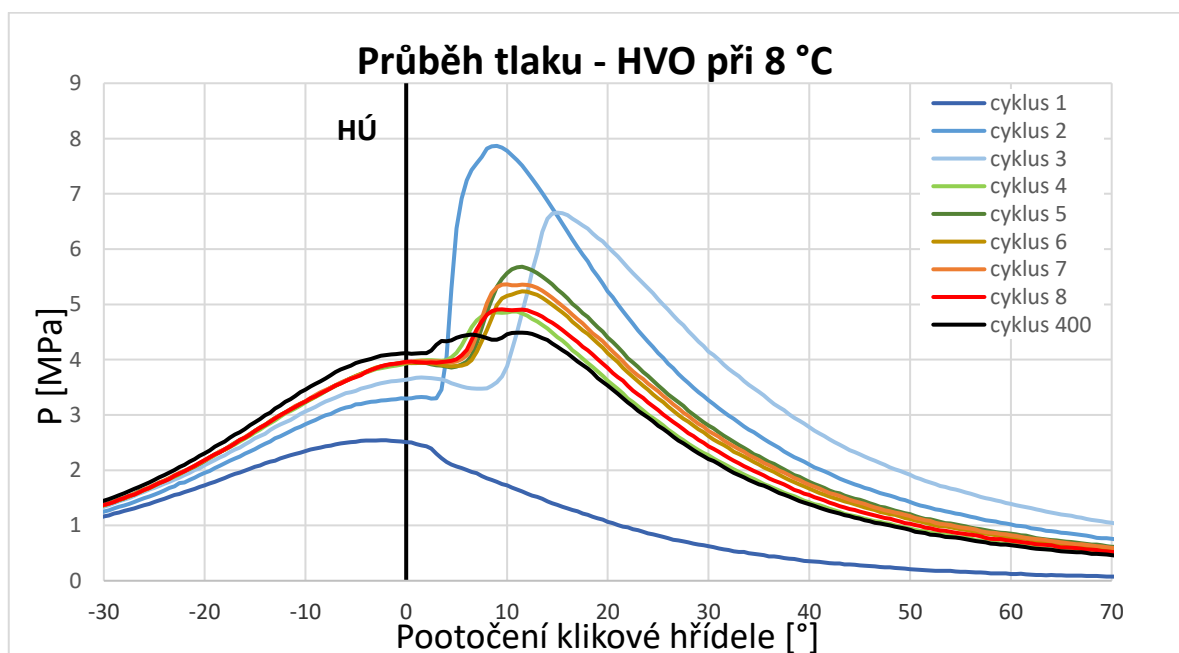
Podobné výsledky byly reprodukovány měřením HVO při teplotě 2,5 °C, které je zobrazeno v grafu č. 9. Při této teplotě nebylo zaznamenáno žádné neúspěšné vznícení, nicméně vzhledem k dalším naměřeným datům je nepravděpodobné, že by k vznícení došlo již v prvním cyklu. V tomto bodě na sebe při měření navazovaly dvě datové řady a první cyklus pravděpodobně nebyl zaznamenán. Druhou možností je, že primární vznícení proběhlo v jiném válci než. Další data však potvrzují měření předcházející. První vznícení v tomto případě dosáhlo hodnoty $dQ = 0,155$ kJ, což je nejvyšší zaznamenaná hodnota v rámci HVO napříč všemi měřeními. První 4 cykly se od sebe značně liší, avšak stejně jako v předchozím případě je od pátého cyklu vidět pravidelnost a stabilita. Již v prvních cyklech jsou zřetelné jednotlivé vstřiky (např. cyklus 8), které se v případě motorové nafty nedají vůbec rozeznat.

Graf 9 – průběh uvolněného tepla ve válci při použití HVO a teplotě 2,5



Zajímavostí je, že v případě měření při 2,5 °C jsou špičkové hodnoty uvolněného tepla při hoření posunuty blíže k HÚ ($\alpha = 6 - 7^\circ$) oproti naměřeným datům pro 0,6 °C ($\alpha = 11 - 14^\circ$). Při bližším posouzení bylo zjištěno, že pilotní vstřiky paliva byl při teplotě 0,6 °C uskutečněny později. Graf průběhu tlaku pro 2,5 °C byl vynechán z důvodu značné podobnosti s grafem č. 7.

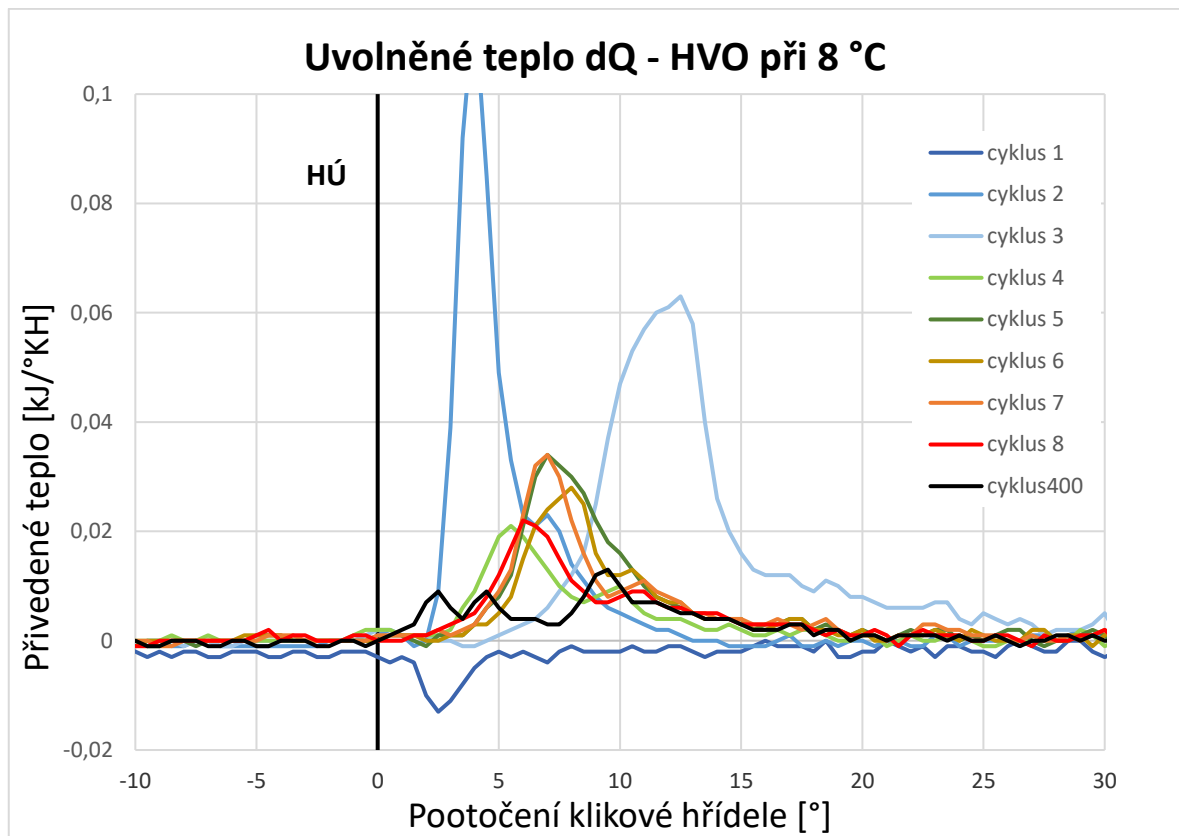
Graf 10 – průběh tlaku ve válci při použití HVO a teplotě 8 °C



Měření indikovaného tlaku ve válci při 8 °C (zobrazeno v grafu č. 10) dopadlo dle očekávání. Po prvních třech cyklech se každý následující více podobá porovnávacímu cyklu.

Měření přivedeného tepla dQ pro HVO vykazovalo velice podobné vlastnosti, jako měření při teplotě 2,5 °C. V prvním cyklu k vznícení paliva ve válci nedošlo, prvotní intenzivní vznícení dosáhlo hodnoty dQ = 0,117 kJ. Z řady vyčnívá pouze cyklus číslo 3. Při něm nastalo vznícení velice pozdě a bylo dosti intenzivní. Tento fenomén, viditelný v grafu č. 11, se v rámci dat HVO podařilo naměřit celkem dvakrát, v případě motorové nafty nic podobného naměřeno nebylo. Další cykly jsou již uspořádané a vzájemně podobné.

Graf 11 - průběh uvolněného tepla ve válci při použití HVO a teplotě 8 °C



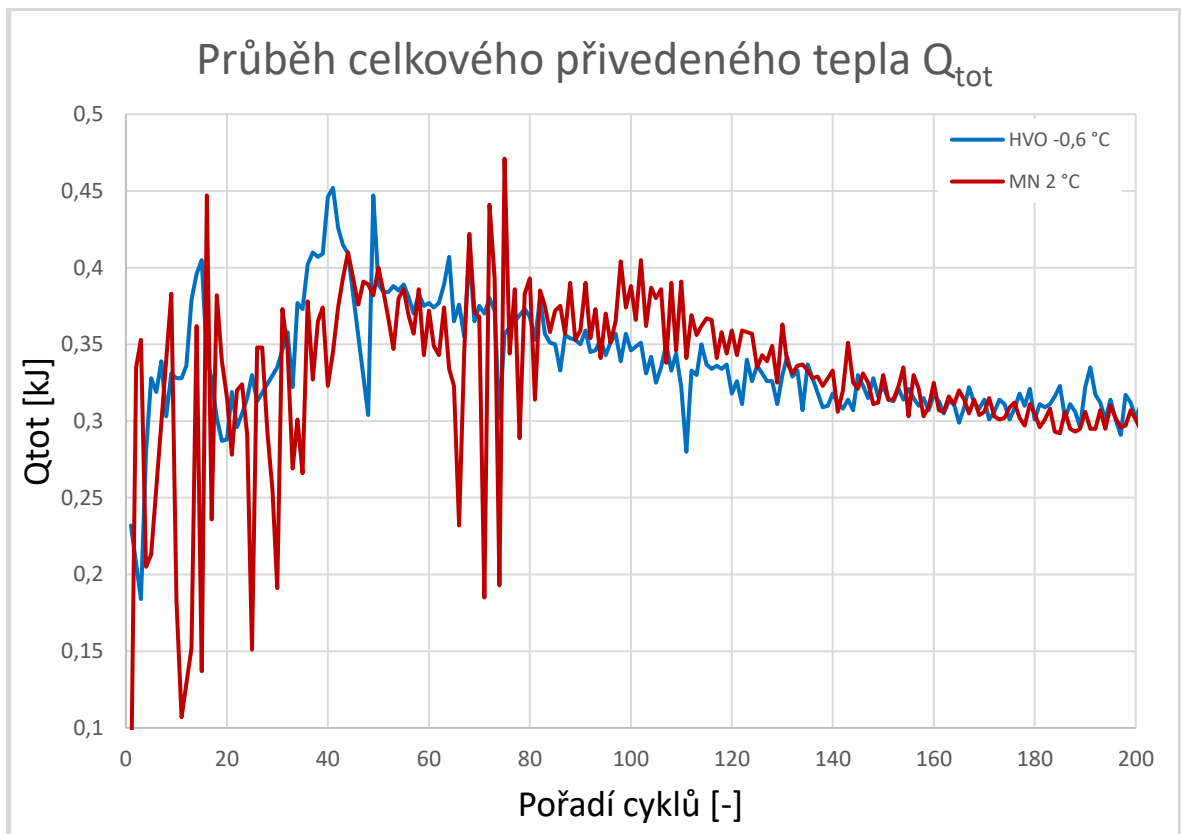
Z naměřených průběhů přivedeného tepla a tlaků lze obecně usuzovat, že HVO má mnohem větší úspěšnost při vznícování, hoří intenzivněji a kratší dobu oproti motorové naftě. V brzkých cyklech, kde motorová nafta ještě nehoří, již HVO dávno hoří, i když s občasným zpožděním. Toto je pravděpodobně způsobeno vyšším cetanovým číslem.

3.4.1.3 Celkové uvolněné teplo

Další analýza průběhu hoření při studeném startu byla provedena pomocí zjištění celkového přivedeného tepla v daném cyklu – Q_{tot} . Výpočet byl proveden prostým součtem hodnot dQ z kapitoly 3.4.1. Cílem bylo zjištění průběhu přivedeného tepla z hlediska většího počtu cyklů. Tato způsob vyhodnocení je výrazně citlivější, než analýza průběhu otáček, které je věnována kapitola 2.4.3.

Analýze byla podrobena data obou paliv ze stejných teplot, které byla použity v předchozích rozborech průběhů tlaku a přivedeného tepla. Data však často obsahovala zkreslené cykly, které byly způsobené chybami jednotlivých měření a dále místy, kde na sebe navazovaly datové řady. Tyto zavádějící hodnoty byly vyfiltrovány. Výsledná data umožňují ucelený pohled na průběh hoření obou paliv. Zjištěné průběhy byly rozděleny do více grafů, jelikož v rámci jednoho grafu je situace velmi nepřehledná.

Graf 12 - průběh celkového přivedeného tepla při nízké teplotě (č.1)

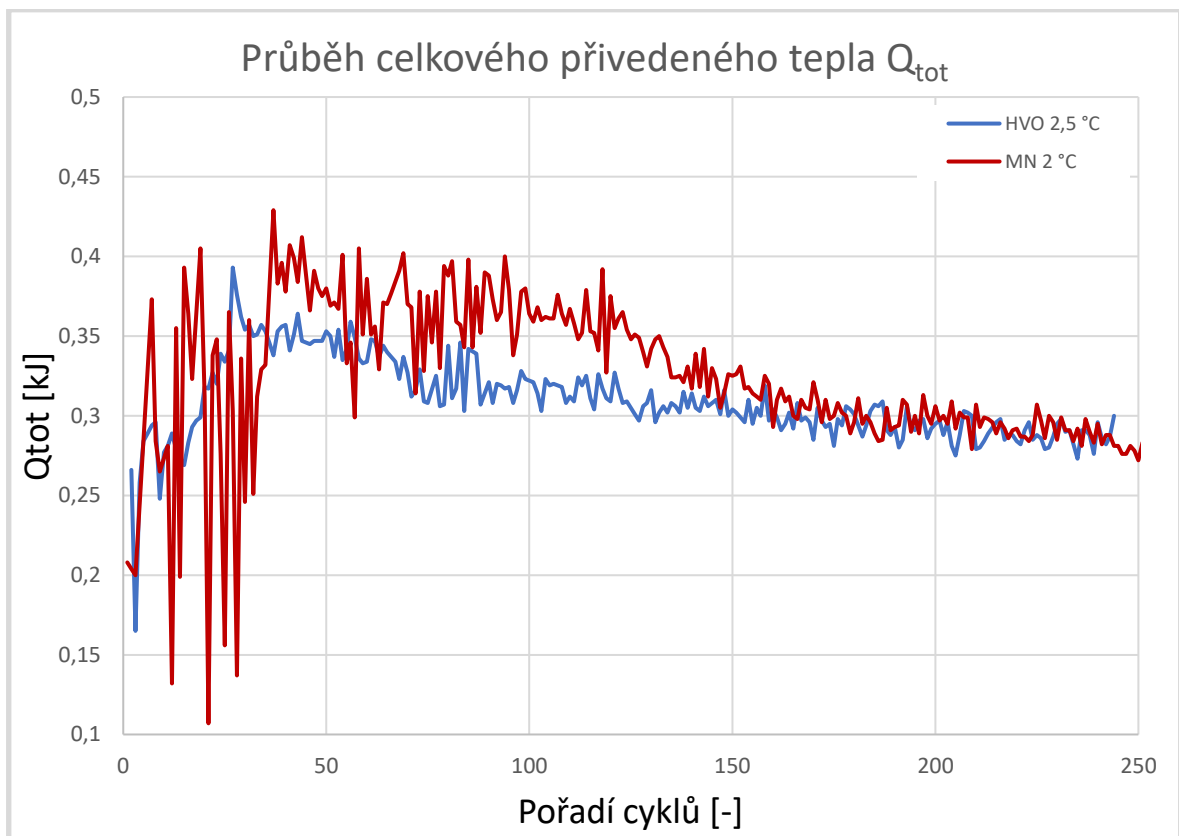


Na grafu č. 12 jsou zobrazeny průběhy Q_{tot} pro prvních 200 cyklů dvojice HVO a motorové nafty při nízkých teplotách -0,6 a 2 °C. U HVO je patrný nepravidelný průběh s relativně malými výkyvy v oblasti cyklů 0 – 80. Poté se po hodnoty ustálí na malém rozptylu

s výjimkou několika jednotlivých cyklů, které vybočují do oblasti nízkých hodnot. Od cyklu 115, kdy jsou pravděpodobně stěny spalovacího prostoru již relativně zahřáté, se rozptýl přivedeného tepla ustálí a pokračuje v nezměněném průběhu dále.

Motorová nafta si v této analýze vedla o poznání hůře. Prvních 40 cyklů má palivo velké problémy se vzněcováním. Je vidět, že nízké hodnoty s malou intenzitou hoření jsou střídány hodnotami vysokými. Hoření probíhá víceméně nahodile. Mezi cykly 40 – 60 si lze povšimnout náznaků ustálení, které je však vzápětí vystřídáno podobným průběhem, který mělo palivo v počátečních cyklech. Od 80. cyklu se však průběh přivedeného tepla ustálí na relativně malém rozptýlu hodnot a od cyklu 120 jej lze považovat za ustálený. Opět je nutno podotknout, že data pro HVO jsou na první pohled výrazně lepší, než data pro motorovou naftu, i když bylo HVO měřeno při nižší teplotě.

Graf 13 - průběh celkového přivedeného tepla při nízké teplotě (č.2)

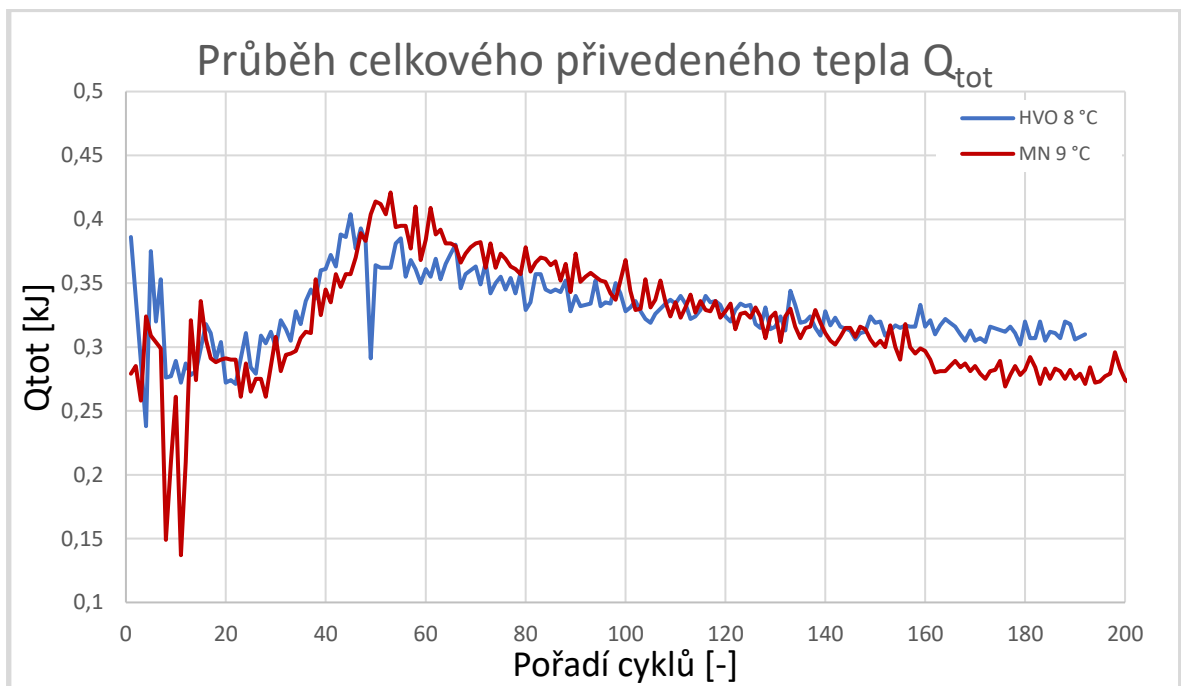


Výše popsaný výsledek byl reprodukován v rámci dalšího měření. U druhé dvojice teplot, zobrazené v grafu č. 13, jsou odlišnosti ve vlastnostech obou paliv ještě markantnější. Rozdíl teplot 0,5 °C při měření je již zanedbatelný. Při tomto měření vykazuje HVO ještě lepší chování při studeném startu a rozdíl ve stabilitě průběhu obou paliv je značný. V případě

HVO nastalo relativní ustálení rozptylu přivedeného tepla již v oblasti 50. cyklu, průběh motorové nafty se stabilizoval až v oblasti cyklu č. 100. Nafta tedy ke stabilizaci potřebovala zhruba dvojnásobný počet cyklů ve srovnání s HVO.

Analýze byla pro možnost porovnání podrobena i měření provedená při vyšších teplotách 8 – 9 °C. Zjištěné průběhy jsou zobrazeny v grafu č. 14. Při tomto měření dosáhla obě paliva zhruba stejného výsledku. Nestabilní hoření, respektive průběh celkového přivedeného tepla je pozorovatelný pouze v oblasti prvních 20 cyklů. Velmi krátce po nastartování motoru se hoření ve spalovacím prostoru ustálilo a o oba průběhy Q_{tot} jsou v podstatě totožné. Z ustáleného průběhu vybočují pouze ojedinělé cykly.

Graf 14 - průběh celkového přivedeného tepla při vyšších teplotách



Ze zpracovaných dat vyplývá, že průběh Q_{tot} získaný pro motorovou naftu při teplotě 9 °C je velice podobný průběhu Q_{tot} hydrogenovaného rostlinného oleje při teplotě 2,5 °C, což opět vypovídá o lepších vlastnostech tohoto paliva z hlediska startovatelnosti.

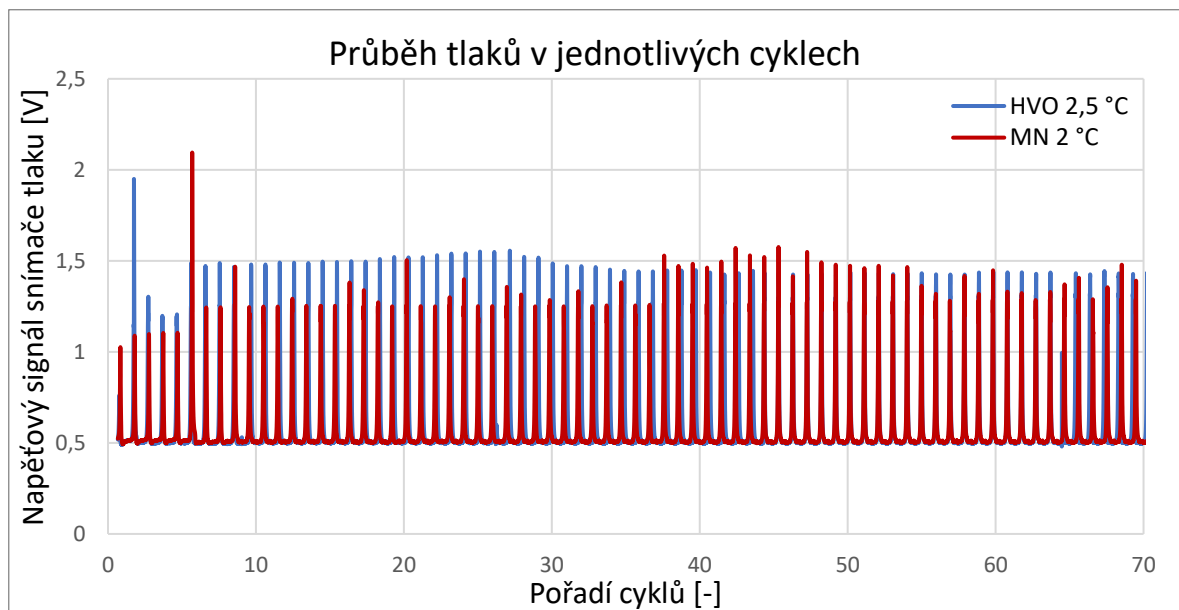
3.4.1.4 Vysokotlaká indikace

Při další analýze vlastností zkoumaných paliv bylo využito stávajícího systému vysokotlaké indikace, který využívá signálu ze snímače polohy klikové hřídele a dopočítává jeho polohu s rozlišením půl stupně. Umožňuje náhled na průběh tlaků ve spalovacím prostoru v delším

časovém úseku a dokresluje získaná data celkového přivedeného tepla Q_{tot} z předchozí kapitoly.

Na vodorovné ose v grafu č. 15 jsou zobrazeny jednotlivé spalovací cykly motoru. Na svislé ose je uveden napěťový signál snímače tlaku. Z naměřených dat je patrné, že po nestabilním průběhu tlaku v prvních cyklech po nastartování motoru dosáhne HVO hodnoty 1,5 V a v této úrovni se dále drží je s nepatrnými odchylkami, což indikuje stabilní hoření paliva ve válci. Motorová nafta naproti tomu v prvních 40 cyklech vykazuje značné problémy s hořením, což se projevuje malým tlakem ve válci. V druhé polovině grafu se naměřený signál napětí v jednotlivých cyklech zvýší na hodnotu kolem 1,5 V, avšak se značnými výkyvy. Toto naznačuje, že i po relativně velkém počtu cyklů má motorová nafta stále problém se stabilním hořením ve válci motoru.

Graf 15 - průběh tlaků zjištěný pomocí vysokotlaké indikace

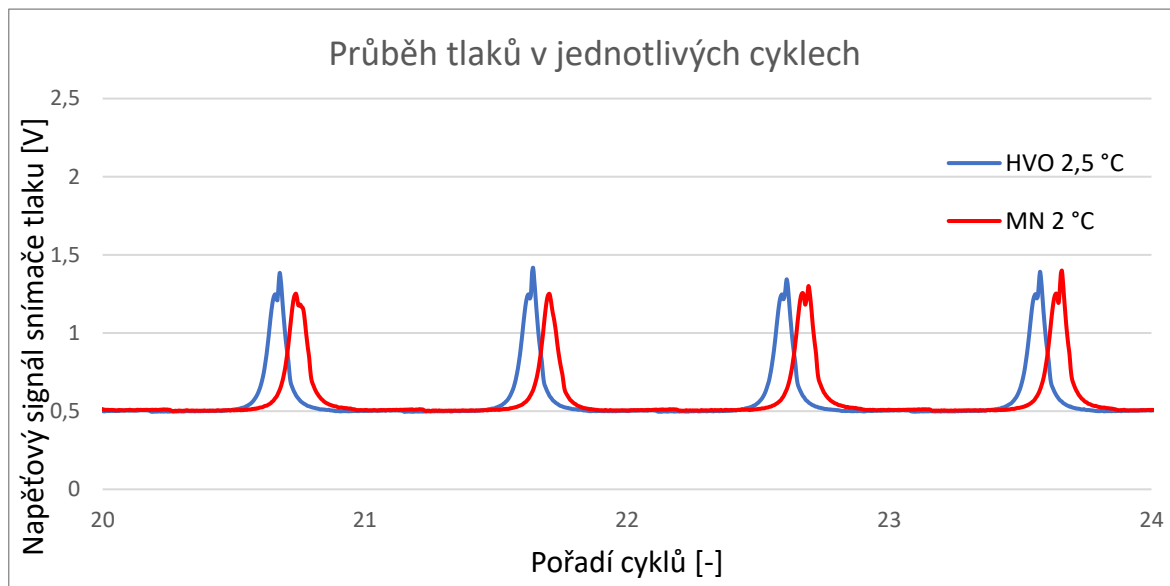


Bližší pohled na získaná data je zobrazen v grafu č. 16. Průběh datové řady motorové nafty je z hlediska vodorovné osy úmyslně posunut z důvodu přehlednosti. V grafu je vidět rozdíl v průběhu tlaku obou paliv. U většiny cyklů si je možné všimnout dvou vrcholů křivky.

První vrchol je způsoben kompresí ve spalovacím prostoru, je ve všech cyklech stejný. Druhý vrchol je tlaková špička způsobená hořením paliva za horní úvratí při expanzi, pokud k hoření došlo. V případě HVO je hodnota tlaku způsobená hořením v každém cyklu vyšší,

než tlak způsobený kompresí. V případě motorové nafty tomu tak velmi často není. Tlak při hoření je zde velice nahodilý a v rámci cyklů se mění.

Graf 16 – detail datových řad z vysokotlaké indikace

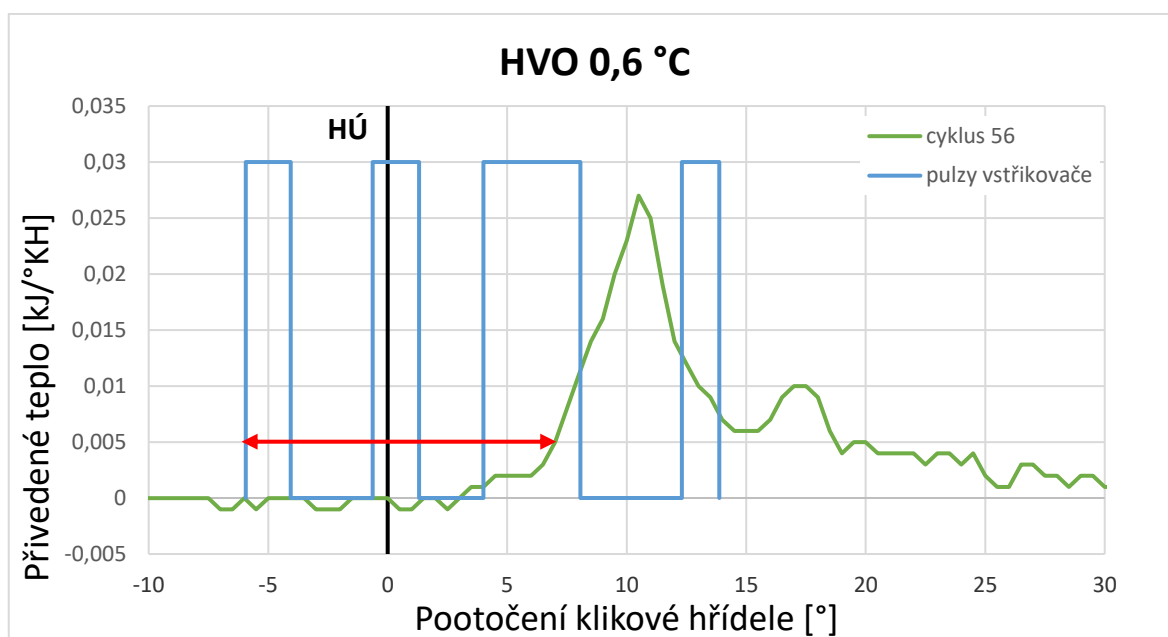


3.4.2 Průtah vznícení

Jedním z důležitých parametrů paliva definujícím jeho startovatelnost za nízkých teplot je průtah vznícení, který se projevuje časovou prodlevou mezi okamžikem vstřiku paliva do spalovacího prostoru a vznícením směsi paliva se vzduchem. K stanovení tohoto parametru byly použity sledované proudové impulzy vysokotlakého vstřikovacího ventilu. Zkoumané vozidlo je vybaveno vstřikovacím systémem s tlakovým zásobníkem – common rail, které umožňuje variabilní časování a délku každého vstřiku. Signály vstřikovače byly pro potřeby práce převedeny do binární podoby (otevřený/uzavřený). Pro stanovení průtahu vznícení byla relevantní pouze informace o poloze KH v okamžiku startu pilotního vstřiku. Druhou využitou informací bylo množství přivedeného tepla dQ z kapitoly 2.4.1.

Tento naměřený parametr byl použit při detekci vznícení paliva ve spalovacím prostoru. Jako počátek hoření byla stanovena hodnota $dQ = 0,005 \text{ kJ}/^\circ\text{KH}$. Pro nalezení hodnot nad stanovenou hranici bylo využito podmíněné formátování MS Excel. Stupeň pootočení klikového hřídele, při kterém došlo ke vznícení paliva, musel být poté v datech nalezen vizuálně.

Graf 17 - Průběh pulzů vstřikovače



Pro stanovení průtahu vznícení pro obě paliva a všechny teplo byly vybrány cykly 50 – 60. V těchto cyklech již většinou nedochází k neúspěšným pokusům o vznícení a zároveň se jedná o cykly velmi brzy po startu motoru, kdy ještě není spalovací prostor zahřátý. Průběh vybraného pulzu v jednom z cyklů je zobrazen v grafu č. 17. Velikost pulzu vstřikovače je pouze ilustrační a nesouvisí s žádnou osou grafu. V tabulce č. 8 je uveden způsob zjištění průtahu vznícení jednotlivých cyklů pro HVO při teplotě -0,6 °C. Byl stanoven jako rozdíl pozic KH při počátku pilotního vstříku a počátkem hoření v daném cyklu. Výsledná hodnota je dána průměrem všech uvažovaných cyklů.

Tabulka 8 – ukázka zjištěných dat pro stanovení průtahu vznícení HVO při 0,6 °C

číslo cyklu	počátek pilotního vstříku [°KH]	počátek hoření [°KH]	průtah vznícení [°KH]
cyklus 50	-6,187	10	16,187
cyklus 51	-6	9	15
cyklus 52	-6,071	9	15,071
cyklus 53	-6	7,5	13,5
cyklus 54	-5,937	9,5	15,437
cyklus 55	-6	9	15
cyklus 56	-5,937	7,5	13,437
cyklus 57	-5,875	9,5	15,375
cyklus 58	-5,857	7	12,857
cyklus 59	-5,875	8	13,875
cyklus 60	-6	7,5	13,5
průměrná hodnota			14,476

Stejný způsob výpočtu byl aplikován na další reprezentativní měření obou zkoumaných paliv při různých teplotách startů.

Tabulka 9 - zjištěné průtahy vznícení pro 50 - 60

Palivo	Teplota [°C]	Průtah vznícení
HVO	0,6	14,48
	2,5	10,10
	8	10,37
Motorová nafta	2	17,39
	2	17,36
	9	14,08

Dle očekávání HVO vykazuje při analýze kratší průtah vznícení v porovnání s motorovou naftou. Zjištěný rozdíl při srovnatelné teplotě je značný. U motorové nafty byl zjištěn průtah vznícení o zhruba 70 % delší, než v případě HVO. Při teplotě 9 °C vykazuje nafta stejné hodnoty, které byly zjištěny pro HVO při teplotě 0,6 °C. Dále si lze povšimnout, že hodnota průtahu vznícení HVO se mezi teplotami 2,5 a 8 °C prakticky nezměnila. Ke změně došlo až při teplotách lehce nad 0 °C. Ve výsledcích se opět výrazně projevilo vysoké cetanové číslo hydrogenovaného rostlinného oleje.

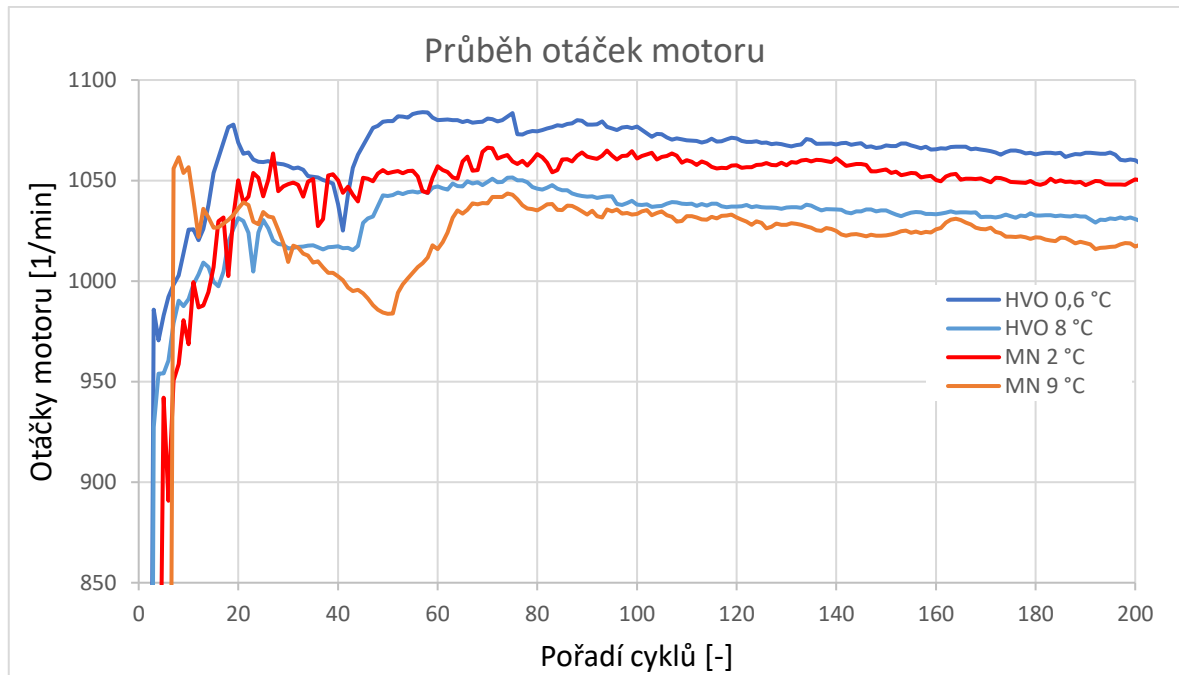
Bohužel se nepodařilo získat data při teplotách pod bodem mrazu, která by z pohledu průtahu vznícení byla velmi zajímavá a pomohla dokreslit celkový pohled na vlastnosti těchto paliv při studených startech motoru.

3.4.3 Průběh otáček motoru

V rámci zkoumání startovatelnosti motoru bylo provedeno i sledování průběhu otáček motoru v úvodních cyklech studeného startu. Velké odchylky od ustáleného chodu pomohou získat přehled o chování jednotlivých paliv při měření.

Z naměřeného průběhu otáček motoru v grafu č. 18 lze v případě motorové nafty při 2 °C pozorovat neuspořádaný chod motoru zhruba v prvních 100 cyklech. Následující cykly již vykazují relativně klidný průběh, kdy se otáčky motoru stabilně drží kolem hodnoty 1050 za minutu. Měření při 9 °C vykazuje zlepšení, kdy se rozptyl naměřených otáček stabilizuje již po 20 naměřených cyklech. Velice podobný průběh byl zjištěn i v případě HVO, který byl však naměřen při teplotě 0,6 °C. Měření HVO při teplotě 8 °C vykazuje pouze drobné zlepšení v podobě menšího rozptylu naměřených otáček motoru.

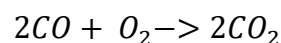
Graf 18 - průběh otáček motoru v závislosti na pořadí cyklů



I toto měření naznačuje, že se hydrogenovaný rostlinný olej z hlediska startovatelnosti při teplotě 0,6 °C chová velmi podobně, jako motorová nafta za teploty 9 °C. Analýza otáček motoru nicméně nedosahuje tak velké vypovídací hodnoty, jako analýza celkového získaného tepla Q_{tot} z kapitoly 2.4.1.3.

3.4.4 Emise výfukových plynů

V Evropské unii aktuálně platí přísná emisní norma Euro 6, emise výfukových plynů je v automobilovém průmyslu aktuálně velké téma. V rámci měření parametrů při studených startech bylo provedeno i měření koncentrací emisí ve výfukových plynech. Mnohé z nich jsou zdraví nebezpečné. Některé z nich jsou odbourávány opatřením za motorem v podobě oxidačního katalyzátoru. Například oxid uhelnatý je přeměněn na CO_2 v následující chemické reakci:



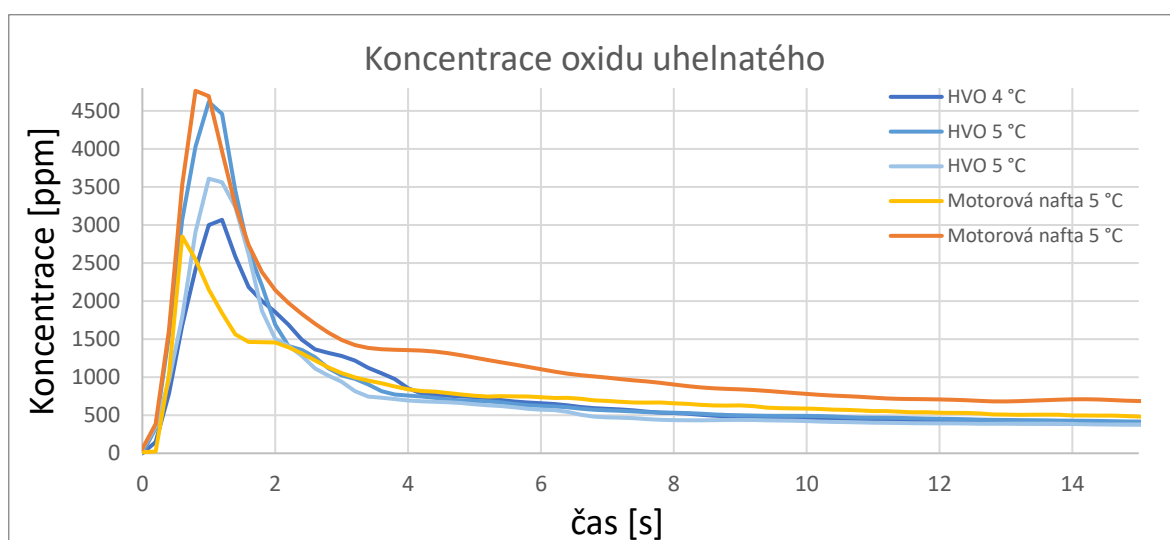
Optimální pracovní teplota této komponenty je však 250 – 800 °C. Při studeném startu tedy katalyzátor nepracuje a nedochází k oxidaci CO a nespálených uhlovodíků ve spalínách. Koncentrace některých složek emisí navíc vypovídají o procesu spalování uvnitř válce, z pohledu hodnocení startovatelnosti motorů jde tedy o zajímavá data. (1,2)

3.4.4.1 Oxid uhelnatý CO

„Jedná se jedovatý plyn, který se váže na červené krvinky roznášející kyslík krví po těle a blokuje přenos kyslíku do takové míry, že může vést i ke smrti. Ve výfukových plynech se může vyskytovat v rizikových vysokých koncentracích (jednotky procent objemového podílu) až po bezproblémové koncentrace v řádu setin procenta.“ (2) Podílí se dále částečně na vzniku tzv. letního smogu.

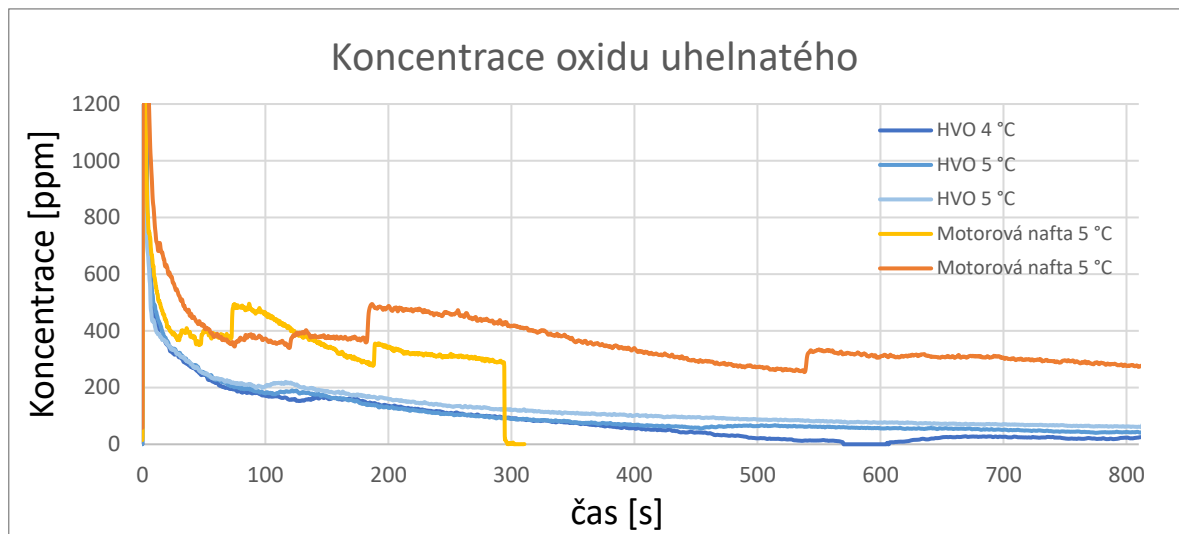
Vzniká jako produkt nedokonalého spalování v důsledku nedostatečné oxidace. Emise CO mají vznětové motory obecně velmi nízké díky dostatku kyslíku, avšak v případě studeného spalovacího prostoru a nízkým spalovacím teplotám se může na krátkou dobu koncentrace pohybovat zhruba do desetiny procenta. V našem případě je koncentrace umocněna provozem motoru bez zatížení ve volnoběžném režimu. (1,2)

Graf 19 – naměřené koncentrace CO (č.1)



Měření emisí zobrazené na grafu č. 19 proběhlo při teplotě 5 °C za účelem porovnání koncentrace emisí CO ihned po startu za relativně nízké teploty. U obou paliv je vidět okamžitý nárůst hodnot CO po startu. U obou paliv byly naměřeny maximální hodnoty v rozsahu cca 2800 – 4800 ppm, což je ekvivalent 0,28 – 0,48% objemového podílu. Tyto hodnoty jsou zhruba o polovinu nižší, než je uváděna pro člověka riziková koncentrace (1% procento objemového podílu). Ihned poté následuje velmi rychlý pád k hodnotám kolem 500 ppm. Pod hranici desetinu procenta (1000 ppm) se obě paliva dostala v rámci jednotek sekund.

Graf 20 - naměřené koncentrace CO (č.2)



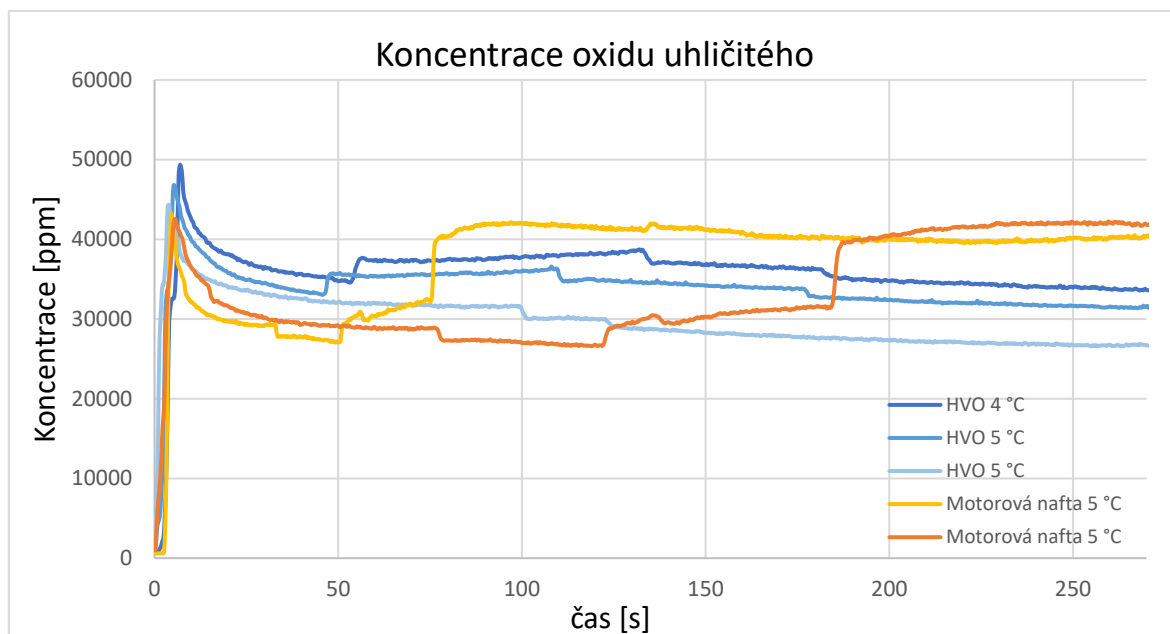
Po úvodním rychlém poklesu začínají datové řady u obou paliv pomalu klesat s tím, že HVO se po 13 minutách ustálilo na hodnotě kolem 60 ppm a nafta 270 ppm. Vzniklé skokové změny v datech jsou pravděpodobně způsobeny aktivacemi recirkulace výfukových plynů. Zajímavý je fakt, že tyto změny nebyly v případě HVO pozorovány. Průběh emisí v delším časovém úseku je zobrazen v grafu č. 20.

Bohužel nejsou dostupné dostatečně dlouhé datové záznamy pro motorovou naftu, ustálené hodnoty pro toto palivo nebyla naměřena. Nejdelší časový záznam byl pořízen pro HVO, u kterého se koncentrace CO po 20 minutách ustálila na 6 – 7 ppm. Z dostupných dat vyplývá, že emise CO produkované při spalování HVO jsou dlouhodobě výrazně nižší, než při spalování motorové nafty. Například v čase 800 s je množství CO produkované motorovou naftou o zhruba 75% vyšší, než množství generované spalováním HVO.

3.4.4.2 Oxid uhličitý CO₂

Vzniká ve válci jako produkt dokonalé oxidace, neboli kvalitního spalování paliva. Patří mezi takzvané skleníkové plyny a v současné době je uváděn jako jedna z příčin aktuálního globálního oteplování planety, které způsobuje tání ledovců (což vede ke zvýšení hladin světových oceánů), posunu klimatických pásem. „V důsledku průmyslové činnosti došlo ke zvýšení pozadí koncentrace CO₂ z 280 ppm na 250 ppm. V rámci antropogenních emisí obnáší podíl provozu spalovacích motorů cca 10 %.“ (1). CO₂ dále negativně působí na lidský organismus při vyšší koncentraci, kdy začne vytěšňovat kyslík potřebný k dýchání. (1)

Graf 21 – naměřené koncentrace CO₂



Jak již však bylo zmíněno v první části práce, CO₂ produkovaný spalováním HVO byl při růstu rostlin spotřebován v rámci fotosyntézy. Výsledná bilance CO₂ je tedy nulová.

V naměřených hodnotách koncentrace CO₂ v grafu č. 21 jsou vidět značné výkyvy v průběhu měření obou paliv v případě nízkých i vysokých teplot. Velké skoky v koncentracích jsou patrně opět způsobeny aktivací recirkulace výfukových plynů. Zároveň je vysoká pravděpodobnost, že výkyvy způsobuje také alternátor. Z tohoto důvodu jsou tato měření bohužel neprůkazná a nemají téměř žádnou vypovídající hodnotu o vlastnostech jednotlivých paliv při startu motoru.

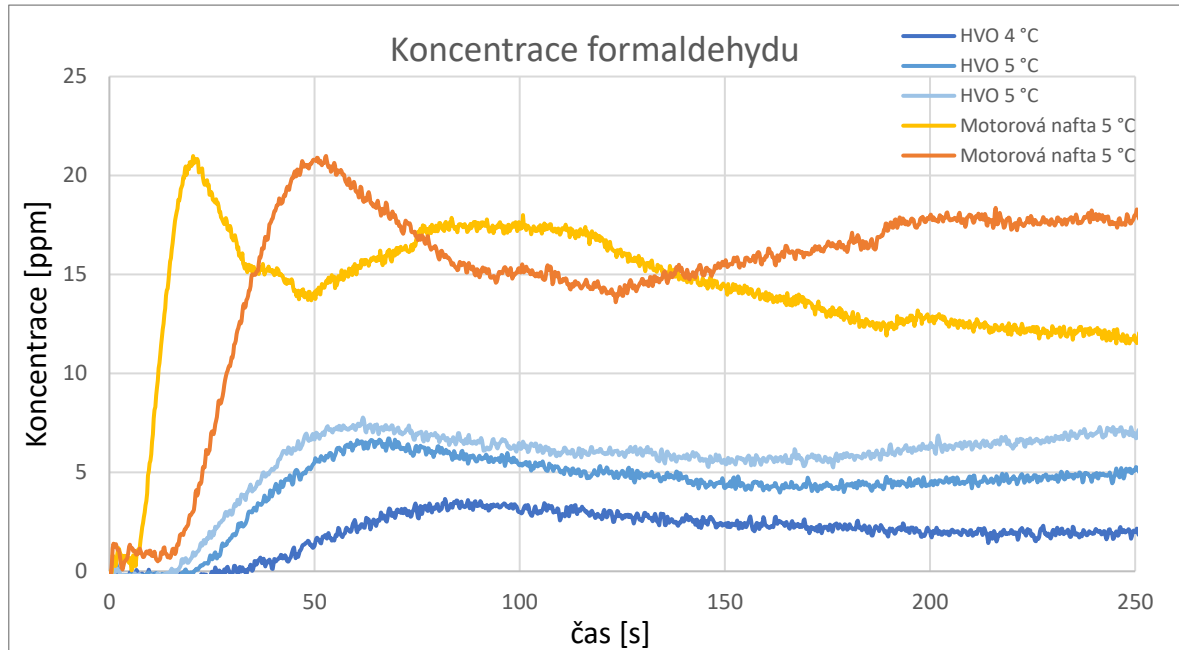
3.4.4.3 Formaldehyd

Formaldehyd je bezbarvý plyn s pronikavým zápachem, který patří mezi karcinogeny a mutageny. V malých dávkách vyvolává bolest hlavy a zánět nosní sliznice. Expozice vysoké koncentrace tohoto plynu však může způsobit podráždění sliznic a respirační problémy (zánět průdušek, otok a zánět plic). Může rovněž vyvolat astma a záněty kůže. (14)

Naměřené koncentrace formaldehydu (zobrazené v grafu č. 22) ve výfukových plynech jsou minimální (což svědčí o velmi vysoké citlivosti infračerveného spektrometru). Pro HVO byly naměřeny nižší koncentrace než v případě motorové nafty. Průměrná koncentrace formaldehydu při spalování HVO během 5 minut se pohybovala mezi 2 – 6 ppm, při

spalování motorové nafty byly naměřeny průměrné hodnoty mezi 13 – 15 ppm. HVO tedy celkově při spalování produkuje nižší koncentraci tohoto karcinogenního plynu.

Graf 22 – naměřené koncentrace formaldehydu



Byl také zjištěn pozoruhodný fakt, že nástup koncentrací formaldehydu je pozvolný. Tento může být způsoben postupným snižováním množství dostupného kyslíku v závislosti na míře recirkulace výfukových plynů. Tuto hypotézu však nebylo možné potvrdit.

4 Závěr

Tato práce se věnovala problematice startovatelnosti vznětového motoru v komplikovaných podmínkách nízkých atmosférických teplot, při kterých byly porovnány vlastnosti HVO a motorové nafty. První polovina se práce popisuje teoretická východiska, která pomohla získat přehled o tomto tématu. V praktické části bylo provedeno několik sérií experimentů. Umístění experimentálního vozu v plechové garáži navíc způsobilo, že ačkoliv byly vně objektu naměřeny nízké teploty (až $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$), uvnitř objektu se teplota stabilně držela lehce nad $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Oproti očekávání bohužel nebylo dosaženo teplot hluboko bodem mrazu.

Experimenty bylo prokázáno, že hydrogenovaný rostlinný olej při studeném startu vykazuje příznivější vlastnosti v porovnání s motorovou naftou a předčí ji ve všech ohledech. Většina měření byla provedena v rozmezí teplot jednoho až pěti stupňů Celsia. V prvních cyklech

chodu motoru má HVO oproti motorová naftě zhruba dvojnásobnou úspěšnost vznícení paliva ve spalovacím prostoru a vykazuje stabilnější hoření. Toto bylo zjištěno z průběhu indikovaného tlaku i jeho následného přepočtu na množství přivedeného tepla na stupeň pootočení klikového hřídele dQ . Nejvíce signifikantní data o vlastnostech obou paliv byla zjištěna při analýze celkového přivedeného tepla v rámci jednotlivých cyklů Q_{tot} . Z výsledků vyplývá, že v prvních zhruba 100 cyklech chodu motorová nafta vykazuje značnou nestabilitu hoření. Podobné chování bylo v případě HVO pozorováno pouze v prvních zhruba 50 cyklech s tím, že nestabilita nebyla tak markantní. Toto bylo potvrzeno i analýzou dat pomocí vysokotlaké indikace. Z hlediska průtahu vznícení vykazovala motorová nafta při 9 °C stejnou hodnotu, jako HVO při teplotě 0,6 °C. Všechny výsledky měření byly několikrát reprodukovány a potvrzeny více měřeními.

Startovatelnost motorů za nízkých teplot je v odborné literatuře poměrně opomíjené a relativně málo frekventované téma. Většina publikací mu věnuje pouze minimum prostoru. Jedním z důvodů může být i náročnost na provádění reálných měření a experimentů. Díky požadavku na nízké teploty okolí je zpracovatel závislý na počasí, nebo je nucen využívat klimatické komory, jejichž pronájem je finančně náročný.

5 Seznam zdrojů

1. HROMÁDKO, Jan. *Spalovací motory: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. Praha: Grada, 2011. ISBN 978-80-247-3475-0.
2. Pechout, Martin. *Spalovací motory – základní přehled*. Praha: 2019 ISBN 978-80-213-2984-3
3. VLK, František. *Paliva a maziva motorových vozidel*. Brno: František Vlk, 2006. ISBN 8023964615.
4. HÖNIG, Vladimír. *Cvičení z paliv a maziv*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2013. ISBN 978-80-213-2384-1.
5. BLAŽEK, Josef a Vratislav RÁBL. *Základy zpracování a využití ropy*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN isbn80-7080-619-2.
6. PULKRÁBEK, Josef, Ivana CAPOUCHOVÁ a Karel HAMOUZ. *Speciální fytotechnika*. Praha: Česká zemědělská univerzita, Katedra rostlinné výroby, 2003. ISBN isbn80-213-1020-0.

7. Změny parametrů motorové nafty podle časových období. *Česká asociace petrolejářského průmyslu a obchodu* [online]. 2017 [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.cappo.cz/aktuality-a-media/aktuality/zmeny-parametru-motorove-nafty-podle-casovych-obdobi>
8. Nafta motorová. *Www.ceproas.cz* [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: https://www.ceproas.cz/public/files/userfiles/EuroOil/Cepro_nafta_motorova.pdf
9. Výkladový slovník. *Www.petroleum.cz: Ústav technologie ropy a alternativních paliv* [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/slovník.aspx>
10. HROMÁDKO, Jan, Jiří HROMÁDKO, Petr MILER a Vladimír HÖNIG. Ekonomická analýza uplatnění biopaliv v podmínkách České republiky. *Ekonomická revue* [online]. 2009, **12**(2), 61-68 [cit. 2021-5-12]. ISSN 1212-3951. Dostupné z: [doi:10.7327/cerei.2009.06.02](https://doi.org/10.7327/cerei.2009.06.02)
11. Motorová paliva vyráběná hydrogenací rostlinných olejů a živočišných tuků. *Chemické listy* [online]. 1.9.2016, **2017**(Vol 111 No 3), 206-212 [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2017_03_206-212.pdf
12. Biopaliva a technické produkty: Vše o našich produktech. *PREOL, a.s.* [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.preol.cz/produkty/biopaliva-a-technicke-produkty>
13. Technologické trendy v silniční dopravě: Popis problémů současného stavu, oblast alternativní pohonné hmoty. *Technologická platforma silniční doprava* [online]. Česká asociace petrolejářského průmyslu, březen 2018 [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.tpsd-ertrac.cz/file/oblast-alternativni-pohonne-hmoty/>
14. Formaldehyd. *Integrovaný registr znečišťování* [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.irz.cz/repository/latky/formaldehyd.pdf>
15. Ivan Bortel, Jiří Vávra, Michal Takáts, *Effect of HVO fuel mixtures on emissions and performance of a passenger car size diesel engine*, Renewable Energy, Volume 140, 2019, Pages 680-691, ISSN 0960-1481
16. SIMACEK, Pavel et al. Impact of hydrotreated vegetable oil and biodiesel on properties in blends with mineral diesel fuel. *Thermal Science*. 2019, vol. 23, no. Suppl. 5, s. 1769-1777. ISSN 0354-9836

17. Vysoká kvalita paliv MaxxMotion ověřena. *OMV Česká republika, s.r.o.* [online]. 23. března 2016 [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.omv.cz/cs-cz/news/vysoka-kvalita-paliv-maxxmotion-overena>
18. JAHODA, Patrik. *Stanice pro měření výkonu topení palivových filtrů: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2017.*
19. PASTOR, J. V. et al. Experimental facility and methodology for systematic studies of cold startability in direct injection Diesel engines. *Measurement Science & Technology*. 2009, vol. 20, no. 9, s. 095109. ISSN 0957-0233.
20. JEVIČ, Petr: Energetická bilance a životní cykly biogenních pohonných hmot – 2. *Biom.cz* [online]. 2010-11-15 [cit. 2021-05-12]. Dostupné z WWW: <<https://biom.cz/cz-kapalna-biopaliva-obnovitelne-zdroje-energie/odborne-clanky/energeticka-bilance-a-zivotni-cykly-biogennich-pohonnych-hmot-2>>. ISSN: 1801-2655.
21. Motorové oleje. *Pneuservis v Rokitnici* [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <http://www.pneu-asistent.cz/Uzitecne-informace.html>
22. Viskozita automobilových motorových olejů. *Oleje.cz: Svět maziv* [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.oleje.cz/clanek/Viskozita-automobilovych-motorovych-oleju>
23. Nezávislá topení ve vozech ŠKODA: Teplo pro vyšší úroveň bezpečnosti a pohodlí v zimě. *ŠKODA Storyboard* [online]. ŠKODA AUTO, 15. ledna 2009 [cit. 2021-5-12].
24. Nezávislá topení: Jak funguje? A co obnáší jeho instalace? *Auto.cz* [online]. 25. února 2018 [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/nezavisla-topeni-jak-funguje-a-co-obnasi-jeho-instalace-113609>
25. Neste Renewable Diesel Handbook. *Neste* [online]. Neste Corporation, říjen 2020 [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: https://www.neste.com/sites/default/files/attachments/neste_renewable_diesel_handbook.pdf
26. BioLPG: ekologičtější alternativa pro auta na plyn? *Hybrid.cz* [online]. 14 Duben 2020 [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/biolpg-ekologictejsi-alternativa-pro-auta-na-plyn>

27. PECHOUT, Martin a David MACOUN. *Experimental investigation of combustion timing of HVO, RME and diesel fuel in a Euro6 car engine during transient driving cycles* [online]. , 2019. ISBN 0148-7191.
28. FTIR spektroskopická analýza. *Eurolab: Laboratory services* [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.laboratuar.com/cs/testler/kimyasal-testler/ftir-spektroskopi-analizleri/>
29. 2014 Volkswagen Golf 7 GTD - Engine. *CARICOS: Bringing You The Best of Automotive Industry* [online]. [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: https://www.caricos.com/cars/v/vw/2014_volkswagen_golf_gtd/images/29.html

6 Seznam zkratek

MEŘO	Methylester mastných kyselin řepkového oleje
FAME	Fatty acid methyl ester
HVO	Hydrogenovaný rostlinný olej
MN	Motorová nafta
CČ	Cetanové číslo
HÚ	Horní úvrať
MS	Microsoft
ppm	Part per milion
CFPP	Cold Filter Plugging Point
LPG	Liquefied Petroleum Gas
FTIR	Fourier Transform-Infrared
AD	Analog/digital
DOC	Diesel Oxidation Catalyst
LNT	Lean NOx Trap
DPF	Diesel Particulate Filter

7 Seznam obrázků, tabulek a grafů

Obrázek 1 – motor VW Golf GTD 2014 (29)	3
Obrázek 2 - Ideální pracovní oběh s izobarickým přívodem tepla (2)	4
Obrázek 3 - porovnání destilačních křivek zkoumaných paliv – převzato z (16).....	16
Obrázek 4 - Kvalitativní a kvantitativní regulace (2)	21

Tabulka 1 - Třída motorové nafty a jejich vybrané ukazatele dle ČSN EN 590.....	8
Tabulka 2 - složení MEŘO (3)	11
Tabulka 3 - Porovnání vybraných parametrů paliv (16)	14
Obrázek 4 - závislost dynamické viskozity na teplotě - převzato z (22)	18
Tabulka 5 - Viskozitní třídy zimních olejů pro motorová vozidla dle SAE J300 (22)	19
Tabulka 6 - složení vzduchu (17).....	20
Tabulka 7 - Technické parametry vozidla	28
Tabulka 8 – ukázka zjištěných dat pro stanovení průtahu vznícení HVO při 0,6 °C	44
Tabulka 9 - zjištěné průtahy vznícení pro 50 - 60	45
Graf 1 - Závislost teplot na začátku a konce komprese	23
Graf 2 - průběh tlaku ve válci při použití motorové nafty a teplotě 2 °C (č. 1)	29
Graf 3 - průběh uvolněného tepla ve válci při použití motorové nafty a teplotě 2 °C (č. 1)	31
Graf 4 - průběh tlaku ve válci při použití motorové nafty a teplotě 2 °C (č. 2)	32
Graf 5 - průběh uvolněného tepla ve válci při použití motorové nafty a teplotě 2 °C (č. 2)	33
Graf 6 - průběh uvolněného tepla ve válci při použití motorové nafty a teplotě 9 °C.....	34
Graf 7 - průběh tlaku ve válci při použití HVO a teplotě 0,6 °C	35
Graf 8 - průběh uvolněného tepla ve válci při použití HVO a teplotě 0,6 °C.....	36
Graf 9 – průběh uvolněného tepla ve válci při použití HVO a teplotě 2,5.....	37
Graf 10 – průběh tlaku ve válci při použití HVO a teplotě 8 °C.....	37
Graf 11 - průběh uvolněného tepla ve válci při použití HVO a teplotě 8 °C.....	38
Graf 12 - průběh celkového přivedeného tepla při nízké teplotě (č.1)	39
Graf 13 - průběh celkového přivedeného tepla při nízké teplotě (č.2)	40
Graf 14 - průběh celkového přivedeného tepla při vyšších teplotách	41
Graf 15 - průběh tlaků zjištěný pomocí vysokotlaké indikace	42
Graf 16 – detail datových řad z vysokotlaké indikace	43
Graf 17 - Průběh pulzů vstřikovače.....	44
Graf 18 - průběh otáček motoru v závislosti na pořadí cyklů.....	46

Graf 19 – naměřené koncentrace CO (č.1)	47
Graf 20 - naměřené koncentrace CO (č.2)	48
Graf 21 – naměřené koncentrace CO ₂	49
Graf 22 – naměřené koncentrace formaldehydu	50