

Oponentní posudek doktorské disertační práce

Autor: Ing. Radek **Holubec**

Název: Vývoj zařízení ke stanovení odvozeného cetanového čísla paliv

### **Rekapitulace**

Cílem práce je vytvoření nástroje pro experimentální kvantitativní určování vznětlivosti paliva pro vznětové motory. Aktuálnost potřeby takového nástroje autor zdůvodňuje rozšiřujícím se sortimentem paliv pro vznětové motory zaváděním různých alternativních paliv. V rešeršní části autor uvádí historický přehled vývoje přístrojového vybavení a metodologie stanovení diskrétního numerického vyjádření vznětlivosti paliva, která je ve skutečnosti podmíněná složitým řetězcem fyzikálních a chemických pochodů vedoucích k rapidnímu rozvoji exotermické reakce.

V práci je popsán principiální návrh experimentálního zařízení a jeho vtělení do konstrukce a realizace funkčního vzorku. Akcentovaně jsou popsány některé konstrukční výzvy, přístup k jejich řešení a dosažený výsledek.

V experimentální části se uvádějí výsledky měření a zejména se navrhuje, realizuje a testuje způsob a SW nástroje pro zpracování experimentálních dat. Funkčnost měřicí výbavy a metodologie se ověřuje s nasazením statistických vyhodnocovacích procedur,

### **Partikulární poznámky a dotazy**

V popisu termů vztahu (2) na str. 18 je dvakrát stejný symbol HWNRP uveden s různým faktickým významem – zřejmě se jedná o překlep.

K popisu motorové metody na str. 18 postrádám popis instrumentace a postupu pro zjišťování průtahu vznícení (s uvedenou požadovanou hodnotou  $13,0^\circ \pm 0,2^\circ$ ).

Z průběhů na obr. 10 a komentáře k němu na str. 27 a 28 lze vyvodit, že předplamenné reakce, probíhající v období chemické přípravy vznícení jsou exotermické a ukončení fáze chemické přípravy vznícení a start samotného vznícení je definován usančně jistým množstvím tepla, přivedeným pracovní látky z tepelného zabarvení probíhajících reakcí. Je to tak?

Výraz „měřící snímač“ na straně 31 je osvěživou modifikací již značně obehnaného pleonasmu „experimentální měření“ často se vyskytujícímu v textu disertačních prací.

Není uveden původ vztahu (6), tabulky 1 a grafu 4 na str. 35 a 36.

Význam termů v neočíslovaném výpočetním vztahu na str. 39 nad rovnicí (7) není uveden ani v seznamu označení ani v popisu / komentáři k tomuto matematickému výrazu. Nikde není uvedena teplota teplosměnných ploch na povrchu topných těles ani jejich předpokládaná (nebo skutečná?) hodnota.

Význam termu „ $T$ “ v rovnici (10) na str. 40 je podle všech příznaků doba ohřevu. V seznamu označení je ovšem deklarován význam symbolu „ $T$ “ jako „Termodynamická teplota [K]“ V odstavci 5.3.4 by bylo účelné vysvětlit, jak lze topným tělesem s maximální provozní teplotou  $500^\circ\text{C}$  vyhřívat komoru na teplotu až  $850^\circ\text{C}$ . Má to znamenat, že při nominálním provozu navrhovaného zařízení je povolena hodnota teploty příslušné komponenty skoro dvojnásobně překročena?

Není jasné, co je míněno pojmem „geometrický objem jednoho pístku“, resp. „geometrický objem čerpadla“ na str. 42, jehož snížením lze dosáhnout úsporu paliva.

Bylo by vhodné uvést, kde ve schématu vysokotlaké části palivového systému v obrázku 20 je umístěno zařízení DRV, popisováno poměrně detailně dále na str. 43. Není jasné jakou má relevanci detailní popis systému CR k problematice zjišťování ČČ v zařízení, které je předmětem DDP. Není též uvedeno, jaký je podíl disertanta na dosažení prezentovaných příznivých vlastností.

Není jasné, jaký je význam odstavce „5.4.2 Návrh inovace palivového systému“? Byla navrhovaná modifikace nějak dále rozpracována? Proč není tento odstavec součástí (vcelku běžně zařazované) kapitoly např. s názvem „Náměty pro další rozvoj problematiky“?

Z odstavce „5.5 Chladicí systém“ není jasné, jak je regulována teplota chladiva, ani jak je ošetřen tlak chladiva. Ze schématu na obr. 25 se jeví, že čerpadlo je zařazeno v okruhu tak, že nasává chladivo o nejvyšší teplotě. Je to tak? Jaký je důvod tohoto uspořádání, které je v rozporu s běžnou praxí?

V odstavci „5.8.1 Program mikrokontroléru“ se uvádí: „změří se průběh tlaku a zdvihu jehly vstřikovače“ a v odstavci „5.8.2 Program pro počítač“ se zmiňuje „délka měření průběhu tlaku a zdvihu jehly“ a na jiném místě „nastavují ... konstanty ... čidla zdvihu jehly“. V odstavci „5.7 Systém řízení a sběru dat“ se ovšem uvádí „V průběhu vývoje se však ukázalo vhodnější využít kanál pro snímání zdvihu jehly ke snímání průběhu tlaku druhým piezoelektrickým snímačem tlaku“. Žádný snímač polohy jehly není zmiňován ve výčtu sensorů v odstavci „5.7.2 Použití snímače“. Co tedy platí?

Údaj „přibližně 5 miliónů Kč“ na straně 86 je uveden takovým způsobem, že není zřejmé, zda se jedná o původní cenu zařízení nebo o výsledek jejího snížení na 5 % díky úsilí autora disertace.

Není jasné, co je míněno úsporou „několik Euro centů na 1000 litrů paliva“ zřejmě ve významu popisu výzkumné orientace kompetitorů školícího pracoviště na straně 87.

### **Globální poznámky a dotazy**

Bylo by vhodné uvést jaký předpis, či standard byl aplikován pro zobrazení komponent ve schématech. Nezasvěcený čtenář obtížně identifikuje, co je vlastně v příslušném obrázku zobrazeno.

Nikde v práci jsem nenašel popis zpracovávání nábojového signálu z piezoelektrického snímače (snímačů?) tlaku. Není ani uveden způsob určení offsetu tlakového průběhu.

V celé práci je zřejmě nekorektně nakládáno s pojmem „vstřikovací tlak“ Uvedení jedné diskrétní hodnoty tohoto údaje je snad akceptovatelné jako numerické vyjádření tlaku v railu u systému CR. Ve všech ostatních případech je z hlediska charakteru a kvality rozprachu relevantní průběh tlaku na vstupu do výstřikových otvůrků a uvedení jediné diskrétní hodnoty tlaku bez popisu procedury určení reprezentativní hodnoty má nulovou vypovídací schopnost. V práci na str. 20 se vliv nastavení otevíracího tlaku vstřikovače v popisu přeceňuje. Na str. 22 se opět nepřipustně průběh vstřikovacího tlaku nahrazuje jedním diskrétním údajem s neznámým významem. Totéž se opakuje ve výčtu Technických dat zařízení IQT na str. 24 a ve výčtu technických dat zařízení PAC – CID 510 na str. 25. Tato nepřipustná desinterpretace se používá i jako vstup do hodnocení v práci dosažených výsledků v závěru.

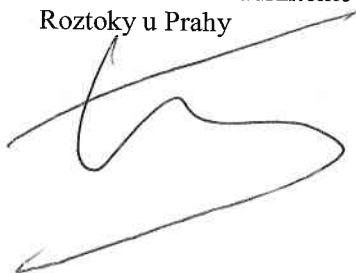
### **Obecné a principiální poznámky, dotazy a komentáře**

Způsob a použitá technologie pro ohřívání náplně měřicí komory s významnými tepelnými odpory mezi zdrojem tepla a temperovaným médiem se jeví poněkud neohrabané. Bylo by patrně vhodné uvést, jaké přímější postupy pro zvyšování vnitřní energie vzduchové náplně při simultánním snižování tepelných ztrát vhodnou izolací se uvažovaly a proč byly zamítnuty. Citace z webových stránek výrobce jednoho z kompetitorů navrhovaného zařízení na str. 84 se jeví jako zpochybnění vypovídací schopnosti cetanového čísla vůbec. To by patrně zasloužilo jistou analýzu. Přitom by patrně mělo být přihlédnuto k tomu, že dnešní vznětové motory ve své konvenční podobě používají vstřikovací systém CR a s případnými negativními důsledky špatné vznětlivosti paliva, nebo jejího rozptylu se vypořádávají dělením vstřiku na tzv. pilotní a hlavní dávku. U paliv pro konvenční vznětové motory se tedy jeví vznětlivost paliva jako marginální parametr. Naproti tomu roste patrně význam vznětlivosti paliva jako nástroje k řízení fázování hoření u všech pokročilých spalovacích systémů s tzv. kompresním zapalováním (HCCI, SACI, PCCI, PPCL...). Bylo by účelné, kdyby diskuse k využitelnosti výstupů z provozu navrženého nástroje při předpokládaném v současnosti typickém zaměření výzkumných aktivit byla součástí prezentace při obhajobě práce.

### **Závěr**

Předložená práce bohužel vykazuje atypicky velký výskyt stylistických a věcných kolizí a nalezení souvislé dějové linie s jednoznačným poselstvím na konci klade značné nároky na součinnost čtenáře. Přesto považuji za nesporné, že autor odvedl značný objem kvalifikovaného projektového, konstrukčního, vývojového a výzkumného úsilí, což prokazuje jeho předpoklady k získání hodnosti PhD. Práci doporučuji k obhajobě.

Prof. Ing. Michal Takáts, CSc  
Centrum vozidel udržitelné mobility  
Roztoky u Prahy



## Posudek na doktorskou disertační práci

Ing. Radka Holubce

### „Vývoj zařízení ke stanovení odvozeného cetanového čísla“

---

Doktorandská disertační práce Ing. Radka Holubce se týká stanovení klíčového parametru dieselových paliv - cetanového čísla. Původní metodě stanovení cetanového čísla na zkušebním motoru je v rešeršní části práce správně věnován jen menší prostor potřebný k nastínění problematiky stanovení vznětové charakteristiky paliv. Hlavní pozornost je pak věnována problematice průtahu vznícení a moderním metodám stanovení tzv. odvozeného cetanového čísla, jehož výpočet je založen na znalosti experimentálně stanovené hodnoty průtahu vznícení. Experimentální náplní práce je pak návrh a realizace zařízení na stanovení odvozeného cetanového čísla, resp. průtahu vznícení.

Vývoj a konstrukce výše zmíněného zařízení je zcela originální a komplexní, neboť vývoj zařízení začíná výběrem vhodného materiálu pro konstrukci tlakové komory, zahrnuje pevnostní, tepelně-bilanční a další nezbytné inženýrské výpočty i samotnou konstrukci poměrně složitěho zařízení, které zahrnuje i originální řídicí a regulační systém. Funkčnost celého zařízení byla otestována a byla provedena finální kalibrace se statistickým zpracováním dat. Je nutno zdůraznit, že ke zvládnutí vývoje popsaného zařízení je třeba si osvojit různé kompetence (znalosti z oblasti materiálů, strojní konstrukce a spalovacích motorů, inženýrských výpočtů, elektroniky a statistiky, problematiku paliv apod.). Předložená disertační práce je dokladem toho, že doktorand velmi dobře všechny tyto dovednosti získal a tvůrčím způsobem využil.

Je nanejvýš cenné, že na TUL bylo zkonstruováno výše uvedené zařízení, které lze minimálně v rámci České republiky považovat za unikátní. Vyzdvihnout je třeba i použití moderního vstříkovacího systému, díky kterému se podmínky vstříkování paliva do tlakové komory blíží podmínkám vstříkování v moderních vznětových motorech. Nesporným přínosem je i skutečnost, že možnosti tohoto zařízení se neomezují pouze na rutinní stanovení cetanového čísla. Vzhledem k možné variabilitě různých parametrů (např. vstříkovací tlak či objem tlakové komory) a možnosti videozáznamu vnitřku tlakové komory spatřuji v tomto zařízení velký potenciál pro další výzkumnou činnost.

Cíle disertační práce jsou jasně deklarovány. Způsob provedení experimentální činnosti lze považovat za optimální přístup k zadané problematice. Výsledky jsou prezentovány vhodným a vesměs srozumitelným způsobem. Cíle práce jsou jednoznačně splněny. Jisté rezervy spatřuji pouze ve formální stránce práce. Například na některé obrázky a grafy chybí v textu příslušné odkazy (např. obr. 1, 3, 4, 19 nebo grafy 5-7). U některých prezentovaných rovnic chybí popis symbolů jednotlivých veličin (např. 7, 8, 10, 13), přičemž ne všechny symboly jsou uvedeny v seznamu použitých zkratk. Význam většiny symbolů sice lze identifikovat z obvyklých konvencí a z informací v textu, nicméně jedná se o místa, na kterých může docházet ke zbytečnému nedorozumění, zvláště pak v případech, kdy jsou v jedné rovnici kombinovány symboly veličin a jejich jednotek (rovnice 11) a v případech, kdy jsou používány stejné symboly pro označení různých veličin (rovnice 10).

K práci mám následující drobné připomínky:

1. V seznamu použitých zkratk je zkratka CFPP vysvětlena jako „Cold Filter Plugging Point“ (teplota vylučování parafinů). CFPP a teplota vylučování parafinů (TVP či „Cloud Point“) jsou však dva odlišné nízkoteplotní parametry.

2. V kapitole 3.3.2 mi chybí zmínka o běžně používané čtyřparametrové rovnici pro výpočet cetanového indexu (EN ISO 4264 či ASTM D4737), která se používá i v rámci evropské specifikace EN 590 pro motorovou naftu. V práci je uvedena pouze starší dvouparametrová rovnice (ASTM D976).
3. Je samozřejmé, že na tak komplexním projektu, kterým vývoj diskutovaného zařízení bezesporu je, pracovalo více pracovníků, resp. studentů. Citovaná literatura je řádně označena, nicméně přítomnost několikastránkových bloků textu psaných v uvozovkách nepůsobí v technicky zaměřené práci příliš dobrým dojmem (kap. 5.8.1 a 5.8.2). Poněkud matoucí pak může být i převzetí číslování kapitol původní práce a odkazů na obrázky, které v disertační práci pod tímto číslem nejsou uvedeny (Příloha 4).
4. Nepovažuji za zcela obvyklé, že v disertační práci jsou umístěny odkazy pouze na vybranou literaturu (v tomto případě přibližně na 1/3 uvedených literárních pramenů) uvedenou v kapitole „Literatura“.

Dále vznáším tyto dotazy a náměty k diskusi:

1. Specifikuje výrobce blíže, pro jaké rozsahy viskozit je schopné pracovat použité palivové čerpadlo? V práci je uvedena pouze zmínka o maximální viskozitě přirovnávané k viskozitě nafty při  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , což může být zavádějící. Existuje ze strany výrobce čerpadla i jiný požadavek na mazivost než minimální viskozita použitého paliva?
2. Experimentálně bylo zjištěno, že použité vstřikovače dávkují po 480 a 2000 h provozu téměř stejné množství paliva. Bylo podobné testování provedeno i pro měření času, který uplyne mezi přivedením napájecího napětí na cívku vstřikovače a počátkem vstřiku paliva? V jakém rozpětí se tento čas pohyboval při uvedené průměrné hodnotě  $515\text{ }\mu\text{s}$ ?
3. Rozumím správně tomu, že parametry  $T_{vnitrni}$ ,  $T_{steny_n}$  a  $T_{steny_{n-1}}$  jsou do výpočtu odvozeného cetanového čísla zavedeny jako korekční faktory z důvodu obtížnosti přesné temperace tlakové komory, díky čemuž dochází k určitému kolísání teploty vzduchové náplně? Je známo, jak tento problém řeší výrobci komerčních zařízení?
4. Podle informací uvedených v příloze se tlaková komora plní syntetickým vzduchem při tlaku 3 MPa. Jaký je tlak v komoře těsně před vstřikem paliva a proč začíná průběh tlaku na grafu 6 od hodnoty cca 2,6 MPa?
5. Jakého původu byla referenční paliva použita pro přípravu směsí s definovaným cetanovým číslem a jak velká je dávka vstřikovaného paliva při standardním měření?

Po prostudování disertační práce Ing. Radka Holubce konstatuji, že disertant prokázal schopnosti potřebné k samostatné vědecké práci. Vzhledem k tomu, že jeho disertační práce splňuje podmínky kladené na doktorské disertační práce, **doporučuji přijmout předloženou práci k obhajobě.**

V Praze, dne 5. prosince 2016

doc. Ing. Pavel Šimáček, Ph.D.



## **Oponentský posudek disertační práce ing. Radka Holubce „Vývoj zařízení ke stanovení odvozeného cetanového čísla paliv“**

Ing. Radek Holubec, (dále jen autor) předložil k disertačnímu řízení v oboru „Konstrukce strojů a zařízení“ svoji práci zaměřenou na problematiku určení odvozeného cetanového čísla paliv (dále OCC), obsahující také návrh, realizaci a vývoj experimentálního zařízení. V práci jsou uvedeny výsledky souboru měření k ověření parametrů zařízení. Součástí je podrobný popis pro přípravu měření, způsob vyhodnocení experimentu a provedení ověřovacích zkoušek na souboru 7 referenčních paliv. Základní cíle disertační práce jsou uvedeny v úvodní části práce:

- přehled stávajících metod určování CC
- návrh a realizace měřicího zařízení,
- výpočtový model k určení OCC pro více ovlivňujících faktorů,
- ověření a určení závislosti mezi faktory a OCC,
- porovnání navržené nové metody měření OCC se stávajícími metodami měření.

Práce obsahuje 106 stran včetně příloh, seznam použité literatury s 59 tituly a uvádí 12 vlastních publikací (spolupublikací) autora, které převážně souvisí s problematikou paliv a jejich použitím ve spalovacích motorech.

V úvodní části práce autor stručně popisuje a analyzuje postupy a parametry měřicích zařízení k určování cetanového čísla. Lze souhlasit s jeho hodnocením, že klasická motorová metoda určení cetanového čísla dle ASTM D613, bude ještě v dalším období, (přes některé nevýhody metody) používána jako významná metoda měření. Práce navrhuje pro výpočet OC paliva údaje zjištěné při spalování paliva v komoře. Výhodou postupů určení OCC se spalovací komorou je ve snadné změně podmínek zkoušky. Měření se tak může uskutečnit v podmínkách odpovídajících provozu spalovacího motoru.

Práce obsahuje a popisuje konstrukční návrh, výrobu, vývoj a ověření vlastností měřicího zařízení. Základní částí zařízení je spalovací komora a proto se jí autor v práci podrobně zabývá a to jak stanovením požadavků na komoru, tak i vlastní realizací jednotlivých částí komory.

Autor zvolil při řešení jednotlivých částí disertační práce postup, založený na kombinaci studijních, teoretických a výpočtových přístupů, s velkým podílem matematických nástrojů (numerická matematika, statistická analýza) na řešení, uplatnil nové statistické postupy vyhodnocující analýzu rozptylu hodnot ve výběrových souborech. Při ověřování platnosti zvoleného modelu výpočtu OCC byla použita základní metoda minima součtu čtverců diferencí, postup je možné považovat za vhodný a vyhovující.

Dále uvádím některé připomínky k řešení a prezentaci práce, které nejsou zásadní a významně nesnižují úroveň předložené práce:

- chyba ve vztahu (14) str. 69,
- v seznamu veličin chybí rozměry některých veličin (i u některých grafů č. 14, 18)
- u vzorků paliv se jedná o referenční paliva tedy OC ne OCC,
- chyba ve vztahu (16), správně G2,

- v výpočtu reprodukovatelnosti se používá vztah (20), který popisuje nejistotu měření (obvyklé označení  $\varepsilon$ ), vliv relativně stálých faktorů při měření. Pro běžně používanou spolehlivost odhadu  $\gamma = 95\%$  a přihlédnutím k charakteru zjišťované veličiny OCC (větší či menší než referenční OC) a symetričnosti Studentovy náhodné veličiny, bude nejistota ve tvaru  $\pm \varepsilon$  (oboustranný spolehlivostní odhad) a odpovídající kvantily pro výpočet jsou  $\alpha_{0,05/2} = \alpha_{0,025}$  a  $\alpha_{1-0,05/2} = \alpha_{0,975}$ , (odpovídající hodnota kvantilu pro údaje v tab.7 má být 3,182),
- hodnocení variability na referenčních vzorcích může být doplněno také bezrozměrným poměrovým variačním koeficientem střední hodnoty. Pro měřené vzorky s OC (27-67) jsou variační koeficienty v rozmezí (0,83 až 1,16) % (soubory bez odlehlých hodnot), údaj lze použít k doplnění grafu 16.

#### Otázky pro obhajobu:

- k ověření normality byl použit Ryan-Joinerův test. Má tento test nějaké výhody a jaké další postupy je možné k ověření použít,
- při ověřování normality byly výběrové soubory (naměřené hodnoty) rozděleny do intervalů. Byla při určení počtu intervalů použita nějaká statistická metoda. Volba počtu intervalů významně ovlivňuje počet následných iterací při návrhu optimálního modelu výpočtu OCC (hodnoty konstant A až F),
- k ověření odlehlosti hodnot ve výběrovém souboru měření byly použity Grubbsovy testy, které vyžadují platnost normální náhodné veličiny. Jaké testy lze použít pokud náhodná veličina normální neplatí.

#### Celkové hodnocení disertační práce:

- V práci je řešená problematika uspořádána přehledně s logickým členěním, s vhodným počtem souhrnných grafů. Výsledky práce poskytují nové ucelené informace a zpřesnění používaných konstant v empirických vztazích k výpočtu OCC, používající hodnotu průtahu vznícení paliva. K řešení byly použity vhodné postupy a metody. Výpočtový model používá další hodnotící veličiny proti stávajícím komerčním řešením, teplotu náplně komory, gradient teploty stěny, různé plnicí tlaky a vizualizaci průběhu hoření vysokorychlostní kamerou. Proto je možné přesněji nastavit podmínky měření tak, aby odpovídaly parametrům provozu reálného spalovacího motoru.
- Výsledkem práce je funkční vzorek zařízení pro měření cetanového čísla paliv, jehož vlastnosti byly ověřeny na souboru měření paliv s různou velikostí cetanového čísla.
- Statistická metoda určení optimální velikosti konstant v navržených modelech je použitelná pro i jiné veličiny.
- Měřicím zařízením se spalovací komorou pro zjištění OCC a metodou vyhodnocování naměřených hodnot se dosahuje požadované spolehlivosti určení OCC.
- Součástí práce je v příloze 4 velmi podrobná metodika popisující postupy při používání navrženého zařízení.

Disertační práce obsahuje všechny předepsané části a byly v ní splněny cíle. Přínosem práce je ověřený funkční vzorek nového měřicího zařízení a postup zpracování naměřených hodnot s výpočtem OCC. Hodnoty OCC paliva jsou zaručovány s vyšší přesností než u některých stávajících komerčních měřicích systémů. Publikační činnost autora je v příloze prezentována dostatečným počtem titulů. Disertační práci doporučuji k obhajobě.

V Liberci 15.11.2016



Doc. Ing. Lubomír Moc, CSc.  
Technická univerzita v Liberci