

Prof. Ing. Stanislav Beroun, CSc.  
Katedra vozidel a motorů  
Fakulta strojní  
Technická univerzita v Liberci

## Oponentský posudek disertační práce Ing. Víta Pouchy „Analýza proudění u dvoudobých spalovacích motorů“.

Ing. Vít Poucha předložil disertační práci „Analýza proudění u dvoudobých spalovacích motorů“ k obhajobě před komisí studijního oboru 2302V010 Konstrukce strojů a zařízení na Fakultě strojní Technické univerzity v Liberci: disertační práce vznikla na školicím pracovišti Katedry vozidel a motorů FS TU v Liberci. Celá práce je obsažena na 87 stranách: tvoří ji úvodních 9 stran všeobecných náležitostí (titulní strany, seznam označení, jednotky, obsah, .....), 74 stran textu s obrázky (grafy, nákresy) k řešení problematice proudění ve válci dvoudobého pístového spalovacího motoru (teoretický základ a vysvětlení způsobu řešení, modelové výpočty proudění a turbulence v kanálech a válci dvoudobého motoru, úpravy zkušebního motoru pro experimentální vyšetřování výměny obsahu náplně válce, komentáře výsledků a celkové zhodnocení výsledků disertace), 3 strany seznamu použité literatury (30 titulů – z toho 14 zahraničních autorů) a 3 tituly vlastních prací (z toho pouze 1 publikace na konferenci) a dále 9 stran tabulkových a grafických příloh a 3 listy výkresů k úpravě hlavy válce pro experimenty.

Cíle disertační práce jsou velmi stručně, ale srozumitelně definovány: výzkum výměny obsahu náplně válce dvoudobého motoru, postavený na kombinaci výpočtového modelování a experimentů na reálném motoru.

Disertant provedl výpočtová řešení výměny obsahu válce v prostředí CFD Fluent s popisem proudění při výměně obsahu náplně válce několika turbulentními modely v SW Fluent. Pro experimentální výzkum výměny obsahu válce použil motor JAWA 593, na kterém upravil hlavu válce zástavbou odběrného ventilu pro vzorkování náplně válce k určení složení náplně ve válci a tlakového snímače. Zkušební stanoviště pro experimentální výzkum mělo vedle standardního vybavení (měření otáček a točivého momentu motoru, spotřeby paliva, spotřeby vzduchu motorem, teplot vzduchu a výfukových plynů) i aparaturu pro měření průběhů tlaků (v klikové sřini, ve válci motoru a ve výfukovém kanálu), analyzátor výfukových plynů a aparaturu pro odběr vzorku z náplně válce. Ověření některých výsledků výpočtového modelování (zřejmě i pro „kalibraci“ modelových výpočtů) bylo provedeno i s využitím speciální měřicí stanice průtokových součinitelů kanálů a válce motoru v útvaru vývoje motorů společnosti Škoda Auto.

Předložená disertační práce dokládá, že stanovené cíle byly splněny: disertant srovnává výsledky z provedených experimentů s výsledky výpočtového modelování a kriticky hodnotí vliv různých výpočtových modelů turbulence v náplni válce na výpočet účinnosti výměny obsahu válce motoru (i s ohledem na provozní režimy motoru). Zpracované téma disertační práce patří mezi aktuální problémy výzkumu dvoudobých motorů s protiproudovým kombinovaným vyplachováním. Ing. Vít Poucha splnil cíle stanovené v kap.4. disertační práce: řešení jednotlivých úloh v kap. 5 až 7 splňují požadavky předpisů na původnost výsledků disertace. Poznatky z disertační práce Ing. Víta Pouchy jsou příspěvkem ke zpřesňování výpočtových řešení při vyšetřování povahy proudění v kanálech a ve válcové

jednotce dvoudobého motoru a umožňují podrobněji „nahlédnout“ do problémů vnitřní aerodynamiky v místech, kde experiment je nemožný nebo by byl příliš nákladný.

K práci mám následující připomínky, poznámky a dotazy:

- Při konečné redakci disertační práce měl disertant s větší pečlivostí kontrolovat věcnou i formální správnost a srozumitelnost obsahu v jednotlivých kapitolách.
- V práci se vyskytuje řada prohřešků proti češtině (chybějící nebo nesprávně použítá interpunkční znaménka, neúplné věty), které měly být odstraněny. Rovněž slovní spojení „experimentální měření“, které disertant často používá, je nesmyslné.
- V seznamu použitých zkratk a symbolů jsou u několika veličin chyby v jednotkách.
- Popisy pod jednotlivými obrázky (grafy, nákresy) jsou příliš stručné, lepší srozumitelností by prospěl alespoň nějaký komentář. Průběhy tlaků na obr.21 až 23 a teplot na obr.24 nejsou v textu vůbec zmíněny (v textu je pouze odkaz na zdrojový kód pro výpočty v příloze). Doporučuji, aby disertant ukázal při obhajobě srovnání výsledků výpočtového modelování průběhů tlaků s výsledky měření průběhů tlaků na zkušebním motoru (alespoň hodnoty  $p_{max}$  ve válci motoru a amplitudy tlakových pulzací v kanálech) ve významných provozních režimech motoru.
- Výpočet průtokových vlastností odběrného ventilu v kap.6.2.3 není správný, rovnice (49) na str.69 je neúplná (v napsaném tvaru je zcela chybná). V grafu na obr.38 nesouhlasí zakreslené průběhy s názvy os souřadného systému. Doporučuji, aby disertant vysvětlil při obhajobě způsob odběru vzorku použitým ventilem (časování odběru, rychlost otvírání a zavírání ventilu, tlakové poměry na průtokovém průřezu ventilu a průtokové vlastnosti odběrového ventilu).

Závěrem posudku disertační práce pana Ing. Víta Pouchy lze konstatovat:

Předložená disertační práce se vyznačuje logickou stavbou, jednotlivé části práce jsou vyvážené a tvoří kvalitní příspěvek k vyšetřovanému problému. Disertační práci Ing. Poucha prokazuje kvalitní znalosti ve studovaném oboru a ukazuje, že na velmi dobré úrovni ovládá vědecké metody i moderní prostředky pro řešení vědeckovýzkumných úloh v motorářské odbornosti. Z hlediska věcného a formálního zpracování je disertační práce i přes výše uvedené připomínky dobrým výsledkem doktorského studia. Doporučuji postoupit disertační práci pana Ing. Víta Pouchy k obhajobě a po jejím úspěšném průběhu doporučuji udělit panu Ing. V. Pouchovi akademický titul Ph.D.

V Liberci, 13.3.2017

  
prof. Ing. Stanislav Beroun, CSc.

### ***Analýza proudění u dvoudobých spalovacích motorů.***

**Autor: Ing. Vít Poucha**

Autor se v předložené disertační práci zabývá aplikací výpočetních numerických metod (CFD) za účelem kvalitativního zhodnocení výměny náplně válce dvou-dobého pístového spalovacího motoru Jawa 593. Metodicky lze však uvedené postupy využít i při optimalizaci jiných dvou-dobých motorů.

V poměrně stručném úvodu práce jsou popsány různé způsoby vyplachování dvou-dobých motorů. Dále je zde uveden popis v současnosti používaných experimentálních metod pro hodnocení výměny náplně válce. Zde i následně v celé práci používá autor terminologii integrálních veličin popisujících kvalitu procesu vyplachování, kterou osobně hodnotím jako nevhodnou. Konkrétně se jedná o pojmy: objemová účinnost, kvantitativní účinnost a kvalitativní účinnost. Místo těchto označení bych doporučoval použití termínů: vyplachovací poměr, zachycovací účinnost a vyplachovací účinnost.

Druhá část práce je věnována velmi stručnému popisu variant turbulentních modelů, ze kterých byl pro finální výpočty vybrán standardní model k- $\epsilon$ , u kterého bylo dosahováno nejlepší shody s experimentem. Autor zde mimo jiné uvádí i diferenciální rovnice zachování, avšak bez dostatečného vysvětlení uplatňujících se veličin. Tyto veličiny nejsou uvedeny ani v seznamu použitých zkratk a symbolů. Některé vztahy jsou navíc zapsané chybně. V této části práce se autor rovněž věnuje popisu tvorby výpočetní sítě a parametrizaci výpočtového programu Fluent.

Třetí část práce je experimentální. Zde autor sám navrhl a vyrobil speciální elektromagnetický ventil umístěný v hlavě válce, který umožňuje řízený odběr vzorku plynu přímo ze spalovacího prostoru motoru. Odebíraný vzorek plynu je následně podroben analýze s cílem určení vyplachovacích účinností. Odvození výpočetních vztahů je založeno na určitých zjednodušujících předpokladech, které lze akceptovat. Nelze však akceptovat opomenutí, že použité analyzátoři HORIBA PG 250 a PG 350 poskytují informaci o složení suchého vzorku plynu, kdežto ve výpočetních vztazích vystupují objemové podíly ve vlhkém vzorku plynu. Tato chyba značně snižuje kvalitu prezentovaných výsledků.

V závěru disertační práce autor srovnává výsledky simulačního CFD výpočtu s experimentálně zjištěnými vyplachovacími účinnostmi ve dvanácti vybraných provozních režimech motoru. Lze konstatovat poměrně dobrou shodu výpočtu s experimentem, ovšem ta je zřejmě ovlivněna nekorektním zpracováním změřených hodnot. Jako kritérium srovnání simulace a experimentu bych doporučoval vzít v úvahu i odchylky v objemové účinnosti (dle autorovy terminologie) a nehodnotit pouze prosté odchylky vyplachovacích účinností bez ohledu na rozdíly v nasátém množství směsi, neboť výsledky srovnání pak mohou být zkresleny.

Hodnocení předložené disertační práce po formální stránce je dosti kontroverzní. Na první pohled je práce zpracována pečlivě s náležitou úpravou, ovšem při detailnějším zkoumání lze zjistit vážnější nedostatky. V textu se občas objevují překlepy vedoucí k nesrozumitelnosti textu, seznam použitých zkratk a symbolů, který by měl být řazen abecedně, zdaleka neobsahuje všechny použité veličiny z textové části. V obrázcích zobrazené číselné údaje jsou nečitelné, na více místech opakující se tabulky obsahují odlišné číselné údaje. Autor často zaměňuje pojmy: nasávaný vzduch – nasávaná směs, objemové

podíly – hmotnostní podíly a to jak v textu, tak i následně ve výpočtech, což vede k nepřesným matematickým formulacím vztahů. Některé další nedostatky uvádím konkrétně:

- *str.27, vztah (11)* – uvedený vzorec platí pouze pro případ, že se ve válci motoru v okamžiku otevření výfukového kanálu nevyskytuje žádný značkovací plyn. Vzorec tedy neplatí obecně, tak jako vztah (10).
- *str.56, Obr.26* – dle uvedených výsledků je patrné, že na konci výplachu se na začátku výfukového potrubí nachází 100% podíl nespálené směsi. Tento výsledek však není v souladu s uvedenými výsledky v Příloze 4.
- *str.69, vztah (49) a (50)* – Ve vztahu pro rychlost proudění by měly vystupovat podíly tlaků a ne tlakové rozdíly. Hustota plynu by měla odpovídat podmínkám v nejužším průřezu – tato podstatná informace v textu chybí.
- *str.70, Obr.38* – Špatný popis na vodorovné ose grafu, u popisku svislé osy není zřejmé, co konkrétně představuje hodnota 100%.
- *str.81* – Přehozené popisky obrázků Obr.48 a Obr.49. Grafické zpracování hodnot pro 3000 ot/min neodpovídá číselným údajům uvedeným v tabulkách Tab.4 a Tab.6.
- Příloha 3 – Hodnoty točivého momentu a výkonu při plném zatížení motoru jsou zřejmě uvedeny chybně, neboť nekorrespondují s uvedeným průtokem vzduchu.
- Příloha 6 – K vyplachovací "S-křivce" nejsou uvedeny žádné informace o režimu motoru.

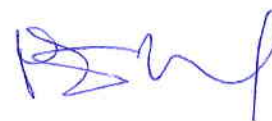
Byl bych rád, kdyby se autor vyjádřil k následujícím dotazům, které souvisí s nejasnostmi v předložené práci:

- V textu na str.49 je uvedeno, že změřené průběhy tlaků ve válci a v kanálech byly nahrazeny několika úsečkami. Jak tyto průběhy vypadaly?
- Jakým způsobem byla určována teplota náplně válce v okamžiku otevírání výfukového kanálu, tedy na počátku CFD výpočtu?
- Jakým způsobem byla určována teplota směsi ve vyplachovacích kanálech? Byla provedena citlivostní analýza na tuto teplotu?
- Navržený odběrný ventil umožňuje odebírat ze spalovacího prostoru relativně velké množství plynu. Jakým způsobem byl tímto zásahem ovlivněn chod motoru, resp. složení analyzovaných výfukových plynů?

Předložená disertační práce se zabývá dvou-dobými motory, které sice mezi pohonnými jednotkami nezaujímají dominantní postavení, nicméně pro pohon motocyklů a drobné zahradní techniky se stále používají. Zaslouží si tedy rovněž pozornost z hlediska jejich možné optimalizace.

Celkově lze pozitivně hodnotit autorův komplexní přístup k problematice výzkumu výměny náplně válce, kdy autor pokryl celou oblast od přípravy k provedení experimentu včetně výpočtové simulace. Při realizaci úkolu využil moderní měřicí a výpočetní techniku a prokázal schopnost jejího řízení a efektivního využití. Touto prací vytvořil metodický postup ke zvládnutí této složité problematiky. Dle mého názoru by však disertační práce měla být zpracována podrobněji, bez zbytečných chyb.

Přes četné výtky **disertační práci doporučuji k obhajobě.**



7. března 2017

Doc. Ing. Karel Páv, Ph.D.

## Posudek disertační práce Ing. Víta Pouchy

### „Analýza proudění u dvoudobých spalovacích motorů“

Předložená disertační práce se vztahuje k problematice dvoudobého malolitrážního motoru; tento motor má několik specifík – lze u něj dosáhnout značného litrového výkonu, nízké hmotnosti, ovšem jeho měrná spotřeba paliva i emise škodlivých látek ve spalínách, zejména uhlovodíků, jsou výrazně vyšší, než u čtyřdobého ekvivalentu. Tyto vlastnosti vždy předurčovaly jeho využití tam, kde převažují jeho přednosti, tedy do oblasti malých výkonných agregátů, například malé lesní mechanizace, a pro sportovní vozidla, například pro motokáry a motocykly; v těchto oblastech lze uvedené téma vnímat jako aktuální.

Hned úvodem budiž řečeno, že z práce vyzařuje zaujetí, zájem o obor i schopnost se v této oblasti komplikované prolínáním termodynamiky a aerodynamiky s přehledem pohybovat a řešit zadaný úkol. Doktorand si vytýčil složitý úkol, jímž bylo takové nastavení výpočtového modelu, aby bylo dále použitelné například pro tvarovou optimalizaci vyplachovacího systému. Trochu matoucí je věta v anotaci „Hodnotícím kritériem výpočtu byly hodnoty účinnosti popisující dokonalost vypláchnutí válce novou náplní“. To by znamenalo, že by bylo hledáno nastavení výpočtu pro nejlepší výplach válce; jedná se zřejmě nepřesnou formulaci.

Nastavení podmínek výpočtu bylo konfrontováno s experimentem – odběrem vzorku plynu ze spalovacího prostoru, což je provedením poměrně složitá úloha, a to, že ji doktorand dobře zvládnul, svědčí o jeho erudovanosti i v oblasti experimentální motorářiny. Toto měření bylo doplněno nízkotlakou a vysokotlakou indikací, zobrazené výsledky napovídají, že i zde doktorand úspěšně prošel úskalími těchto měření, jimiž jsou například problémy s kmity v indikačním kanálu, úhlové polohování dějů, správné stanovení absolutních hodnot tlaků, zvláště v nízkotlaké indikaci atd. Toto by nebylo možné bez hluboké znalosti vědeckých metod a teoretických znalostí. V neposlední řadě popis experimentů ukazuje na kvalitně vybavené zkušební stanoviště s masivní podporou měřicí a výpočetní techniky. Souhrnně lze konstatovat, že zvolené metody zpracování výsledků jsou vhodně zvoleny a výsledky vytvářejí solidní základnu pro pokračování v této práci. Práce je provedena pečlivě, srozumitelně a přehledně a přináší pokrok v oboru.

K práci mám několik poznámek, které nejsou výtkami k disertační práci, ale spíš podněty pro další směřování práce doktoranda v oblasti optimalizace výplachu dvoudobého motoru.

První poznámka se týká problému s hodnocením výplachu dle analýzy vzorku ze spalovacího prostoru u běžícího motoru. Udám příklad – jsou porovnávány dva rozdílné vyplachovací systémy, lišící se například jiným stabilizačním úhlem (tj. úhlovou vzdáleností mezi

otevřením přepouštěcích kanálů a počátkem tvorby stabilního výplachu, typická vlastnost každého vyplachovacího systému); tato individuální vlastnost musí být odražena v individuálním tvaru expanzní části výfukového rezonátoru. Pokud jsou porovnávací měření těchto rozdílných vyplachovacích systémů provedena s jedním výfukovým rezonátorem, je nutně jeden z vyplachovacích systémů znevýhodněn, analýza dle odběru dá u něho horší výsledek. Ten ale nemusí být způsoben horší kvalitou vyplachovacího systému, ale nevhodným párováním vyplachovací systém/výfukový rezonátor. Jinak řečeno, hodnocení výplachu dle odběru v hlavě je zatíženo více vlivy, nemusí proto správně vypovídat o kvalitě výplachu. Z toho důvodu jsou ve vývojových pracovištích ve světě pro vývoj moderních vyplachovacích systémů často používány způsoby přímého 3D hodnocení výplachu proudovými analyzátory, kde je výplach změřen diskrétním proudovým polem. To umožňuje následně průtokovou integraci v libovolném řezu ve válci a tím kvantifikaci ztrát do výfuku pomocí tzv. zachycovací účinnosti, nebo přímo zobrazení zkratového proudu.

Druhá poznámka se týká procesu výplachu ( tvarový vývin zóny čerstvé náplně ve válci), jíž je postupné řízené vyplňování prostoru nad pístem při minimalizaci ztrát do výfukového otvoru. Vhodný proces výplachu je rozdílný pro nízkoemisní motory (např. malá lesní mechanizace), motory se širokým otáčkovým rozsahem ( např. motokáry) a motory s extrémně vysokým výkonem. Disertační práce je zřetelně zaměřena na třetí skupinu motorů, u nichž se ukazuje jako nejúčinnější uspořádání splachovacího systému s dvojicemi bočních přepouštěcích kanálů ( event. zadní pátý ovlivňuje pouze stabilizaci systému, jinak nemá výrazný vliv na proces výplachu). Optimalizace výplachu zde znamená dosáhnout vzájemné aerodynamické vyvážení obou dvojic, kdy je během plnění vytvářena tlaková zóna čerstvé směsi ve válci, rostoucí směrem k hlavě válce a se zamezeným pohybem nad pístem směrem do výfukového kanálu. Zásadní vliv na aerodynamické vyvážení má rozložení výtokové rychlosti v tzv. hlavních přepouštěcích kanálech ( blíže u výfukového otvoru), které je silně ovlivněné sekundárním prouděním v šachtě těchto kanálů; citlivost mezi proudovým polem na výstupu z hlavních přepouštěcích kanálů a výkonem je mimořádná.

Pokud doktorand bude hledat cestu ke zlepšení výplachu, doporučuji orientovat se tímto směrem. S využitím nabytých zkušeností by stálo za úvahu dále dopracovat výpočtovou metodu i event. experiment tak, aby proudění na výstupu z přepouštěcích kanálů bylo formou 3D zobrazení a vyhodnocení sledováno podrobněji.

Třetí poznámka se týká průtokovosti vyplachovacího systému, jejíž osvědčenou a užívanou mírou je redukovaný průtokový součinitel, vypočtený z průtoku při pístu v dolní úvrati a nasazené hlavě válce, vztažený na plochu vývrtu válce s korekcí na poměr zdvih/vrtání. Pro různé rezonanční otáčky motoru existuje optimální hodnota, její zvýšení či snížení vede k poklesu max. výkonu. I zde doporučuji zmíněnou hodnotu sledovat a brát ji v potaz při optimalizačních pracích.

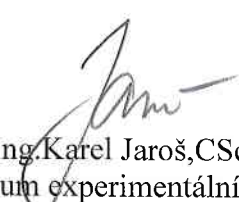
Poslední poznámka se týká tabulky „ Hlavní parametry motoru JAWA 593“ na straně 31; je zde uvedena rezonanční délka výfuku 735mm. Za rezonanční délku je považována osová vzdálenost mezi středem výfukového otvoru ve válci a buď středem reflexního kuželu (německá literatura), nebo počátkem reflexního kuželu (anglická literatura). Pro oba způsoby

vyjádření se domnívám, že rezonanční délka je jiná, než uvedeno, uvedená rezonanční délka by s úhlem výfuku dle tabulky vedla k výrazně vyšším rezonančním otáčkám.

Závěrem svého posudku bych chtěl doktorandovi poděkovat za jeho zjevný zájem a výrazný přínos pro dvoudobý motor, který bývá někdy neprávem pro svoji zdánlivou jednoduchost mírně podceňován. Ve skutečnosti se ale jedná o termodynamicky a aerodynamicky unikátní motor, který ve svém vývoji klade na techniky velké nároky, ale v případě úspěchu je umí svým explozivním výkonem patřičně ocenit.

Předložená disertační práce je kvalitní, přínosná a proto ji doporučuji k obhajobě.

V případě zájmu budu rád s doktorandem panem Ing. Vítem Pouchou diskutovat o problematice výplachu dvoudobého motoru.



Doc. Ing. Karel Jaroš, CSc.  
Výzkum experimentální aerodynamiky  
Cacovická 103, 61300 Brno

775624979  
jaros@jaros.info