

Oponentský posudok dizertačnej práce

Autor dizertačnej práce: Ing. Kateřina Fridrichová

Názov práce: ANALÝZA DYNAMIKY HYBRIDNÍCH POHONNÝCH JEDNOTEK S VYPÍNÁNÍM VÁLCŮ

Školiteľ: prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.

Pracovisko: Ústav automobilního a dopravního inženýrství, FSI VUT Brno

Študijný odbor: Konstrukční a procesní inženýrství

Autor posudku: Ing. Michal Pavlov, PhD., Vývoj spalovacích a pohonných systémů,
Škoda Auto a.s. tř. Václava Klementa 869, 293 01 Mladá Boleslav, Česká republika

Posudok dizertačnej práce bol spracovaný na základe požiadavky predsedu komisie pre obhajobu dizertačnej práce prof. Ing. Pavla Novotného, Ph.D. v zmysle zákonov a predpisov platných v Českej republike pre dizertačné práce.

Predložená dizertačná práca sa zaoberá analýzou dynamiky hybridných pohonných jednotiek s vypínaním valcov. Cieľom dizertačnej práce je vyvinúť metodiku dynamických simulácií mild-hybridnej pohonnej jednotky s vypínaním valcov a posúdiť prínos vyhladzovania točivého momentu.

1. Aktuálnosť tematiky dizertačnej práce

Téma dizertačnej práce je v súčasnosti aktuálna. Vzhľadom k stále sa sprísňujúcim emisným limitom je téma znižovania emisií CO₂ pomocou vypínania valcov u spaľovacích motorov veľmi aktuálna. Práca reaguje na skutočnosť, že veľká časť v súčasnosti vyrábaných motorových vozidiel je poháňaná hybridnou hnacou jednotkou, ktorá kombinuje spaľovací motor a elektrický točivý stroj. Spomínaný točivý stroj je možné využiť na vyhladzovanie točivého momentu spaľovacieho motora v režime vypínania valcov

Doktorandka na základe získaných poznatkov predkladá tzv. vedecké otázky a k nim tzv. pracovné hypotézy (str.32 a 33), ktoré tu uvediem skráteno:

Je možné rozšíriť pracovnú oblasť vypínania valcov pri implementácii vyhladzovania točivého momentu v hybridných pohonných jednotkách? Aký vplyv má vypínanie valcov a vyhladzovanie točivého momentu na zaťaženie ložísk a únavovú životnosť? Existujú také režimy elektrického točivého stroja, v ktorých by nemal byť elektrický točivý stroj prevádzkovaný, aby nedochádzalo ku vzniku nežiadúcich vibrácií?

2. Splnenie stanovených cieľov

Hlavný cieľ dizertačnej práce bol splnený pomocou vhodne zvolených čiastkových cieľov, ktoré boli v práci splnené.

Na základe prevedených rešerší a posúdenia súčasného stavu problematiky a postupov používaných pri vývoji si doktorandka stanovila tieto čiastkové ciele:

- získať tlak v spaľovacom priestore skúmaného motora v rôznych režimoch vypínania valcov,
- vytvoriť výpočtový model spaľovacieho motora s vypínaním valcov,
- návrh kompenzácie točivého momentu pomocou jeho vyhladzovania,
- analýza vibrácií pohonnej jednotky i samotného elektromotora/generátora.

Prvý čiastkový cieľ dizertačnej práce bol splnený prevedením celej rady meraní na dynamometri, ktoré sú popísané v kapitole 4.1.3.

Druhý čiastkový cieľ dizertačnej práce bol splnený vytvorením výpočtového modelu dynamiky hybridnej pohonnej jednotky s vypínaním valcov a vyhladzovaním točivého momentu v prostredí Virtual Dynamics. Tento výpočtový model vychádza z výpočtového modelu dynamiky spaľovacieho motora s vypínaním valcov a z výpočtového modelu dynamiky elektromotora. Tento výpočtový model bol validovaný na základe technických experimentov.

Tretí čiastkový cieľ dizertačnej práce bol splnený návrhom algoritmu vyhladzovania točivého momentu, ktorý spočíva v harmonickej analýze točivého momentu a vytvorení kompenzačného momentu ako súčtu harmonických zložiek kompenzačného momentu. Priebeh kompenzačného momentu je navrhnutý tak, aby jeho stredná hodnota bola nulová, teda aby nedochádzalo k zmene celkového točivého momentu v rámci sekvencie vypínania valcov.

Štvrtý čiastkový cieľ dizertačnej práce, analýza vibrácií pohonnej jednotky i samotného elektromotora/generátora, bol splnený realizáciou a analýzou meraní pomocou troch akcelerometrov umiestnených na skrini elektrického točivého stroja, na spodnom veke motora a na veke hlavy valcov. V rámci týchto meraní bolo aplikované vyhladzovanie točivého momentu pomocou obdĺžnikového a sinusového priebehu, ktoré bolo porovnávané s meraním pri ktorom bol elektrický točivý stroj len pretáčaný.

3. Postup riešenia problému a konkrétny prínos doktorandky

Zvolený postup riešenia možno považovať za adekvátny a metodicky správny. Doktorandka postupovala systematicky od analýzy súčasného stavu poznania, cez vymedzenie cieľov dizertačnej práce a formuláciu troch jasných pracovných hypotéz až po potvrdenie týchto hypotéz v závere práce.

V rešeršnej časti práce doktorandka odhalila, že väčšina výskumu v oblasti vypínania valcov sa zameriava na výsledky z pohľadu termodynamiky a zníženia spotreby paliva. Na základe tohto faktu sa doktorandka rozhodla podrobnejšie venovať výskumu torzných vibrácií a vyhladzovaniu točivého momentu pri vypínaní valcov.

Proces riešenia zahŕňa vytvorenie komplexného výpočtového modelu dynamiky hybridnej pohonnej jednotky s vypínaním valcov a vyhladzovaním točivého momentu v prostredí Virtual Dynamics. Vytvorený výpočtový model doktorandka validovala na základe výsledkov technických experimentov. S validovaným výpočtovým modelom doktorandka vykonala množstvo simulácií a analýz vyhladzovania točivého momentu, vrátane overenia vplyvu vypínania valcov a vyhladzovania točivého momentu na zaťaženie ložísk a únavovú životnosť kľukového hriadeľa.

Prínosom doktorandky je:

- Experimentálne ako aj simulačné overenie, že je s použitím sériovo vyrábaného spaľovacieho motora a elektrického točivého stroja možné dosiahnuť zníženie torzných vibrácií s použitím vhodného kompenzačného momentu točivého stroja. Ako aj porovnanie a vyhodnotenie niekoľkých variant sekvenčného a dvoch variant selektívneho vypínania valcov.
- Návrh algoritmu, na základe ktorého je možné vytvoriť vhodný kompenzačný moment pre vyhladzovanie točivého momentu motora pri vypínaní valcov.
- Významným prínosom tejto dizertačnej práce je aj vyhodnotenie dopadu vypínania valcov a vyhladzovania točivého momentu na únavovú životnosť kľukového hriadeľa a na zaťaženie ložísk.

4. Význam výsledkov pre prax či rozvoj vedného odboru

Výsledky dizertačnej práce sú prínosné pre prax a aj vedný odbor. Dizertačná práca prináša významný prínos pre prax a vedný odbor vyvinutím a overením algoritmu na vytváranie vhodného kompenzačného momentu pre vyhladzovanie točivého momentu motora. Hlavnou výhodou tohto prístupu je, že riadiaca jednotka nemusí počítať priebeh kompenzačného momentu v reálnom čase. U vopred definovaných sekvencií vypínania valcov je možné predikovať a účinne potláčať torzné vibrácie. Kvalitu tohto prístupu dokazujú aj experimentálne a simulačné výsledky uvedené v predloženej dizertačnej práci. Tieto výsledky ukazujú potenciál zníženia polovice rozkmitu uhlovej výchylky remenice až o 80,7%.

5. Formálna a jazyková úroveň práce

Predložená dizertačná práca je po formálnej stránke na vysokej úrovni. Textová časť ma 99 strán základného textu, ktorý je vhodne doplnený o tabuľky a obrázky. Práca je logicky členená do kapitol a odstavcov. V závere práce je uvedená použitá literatúra, prehľad vlastných publikácií, zoznam použitých skratiek a symbolov ako aj prílohy. Dizertačná práca je na vysokej jazykovej úrovni. Obsahuje len minimum gramatických chýb. Niektoré obrázky sú dosť neprehľadné alebo nečitateľné ako napríklad obr. 106. Niektoré obrázky simulačných modelov sú skôr ilustratívne. To však nenaruša celkovú formálnu úroveň práce.

6. Poznámky a otázky k dizertácii

K práci mám nasledujúce pripomienky:

V práci často používate pojem „ladenie modelu“, tento pojem nepovažujem za správny. Odporúčal by som používať pojem kalibrácia modelu alebo pojem validácia modelu v závislosti od charakteru úlohy.

Navrhované riešenie riadenia pohonnej jednotky pri vyhladzovaní točivého momentu v režime vypínania valcov sa javí ako zmysluplné a zaslúžilo by si ďalšie rozpracovanie.

Pri obhajobe, prosím, zodpovedajte nasledujúce otázky:

- 1) Na strane 42 popisujete modálne tlmenie použité vo výpočtovom modeli dynamiky kľukového mechanizmu. Konkrétne uvádzate, že „Ve výpočtovém modelu je použito tlmení závislé na pořadí vlastních tvarů, jehož hodnoty jsou stanoveny experimentálně.“ Aké modálne tlmenie je použité v modeloch elektrického točivého stroja?

- 2) V kapitole 5.2.2 s názvom „ÚNAVOVÁ ŽIVOTNOST“ sa konkrétne venujete únavovej životnosti kľukového hriadeľa. Na obrázkoch 97 až 99 je vyhodnotená únavová životnosť kľukového hriadeľa v režime všetkých valcov a v režime vypínania valcov s vyhladzovaním točivého momentu. Z textu dizertačnej práce vyplýva, že bola vyhodnocovaná aj únavová životnosť kľukového hriadeľa v režime vypínania valcov bez vyhladzovania točivého momentu. Presentujte pri obhajobe výsledky únavovej životnosti kľukového hriadeľa v režime vypínania valcov bez vyhladzovania točivého momentu.
- 3) V práci na str. 97 uvádzate, že „Celkový energetický management je však ovplyvnený, jelikož reťazec medzi elektrickým točivým strojom a batérií pracuje s určitou účinnosťou.“ Vyčíslite a pri obhajobe prezentujte hodnoty stratového výkonu reťazca medzi elektrickým točivým strojom a batériou a ovplyvnenie energetického managementu pre konkrétnu hodnotu kompenzačného momentu použitého v práci.
- 4) Prosím o vyjadrenie k použiteľnosti sériovo vyrábaného omega napínača pri vyhladzovaní točivého momentu spaľovacieho motora v režime vypínania valcov, vzhľadom k navrhovanému kompenzačnému momentu so sínusovým priebehom.

7. Odporúčanie práce k obhajobe

Autorka predloženej práce - Ing. Kateřina Fridrichová preukázala pri spracovaní dizertačnej práce vedecké schopnosti v danej oblasti výskumu. Práca spĺňa po obsahovej a formálnej stránke požiadavky štandardne kladené na dizertačné práce v zmysle § 47 odst. (4) zákona o vysokých školách (v platnom znení).

Z uvedených dôvodov preto predloženú dizertačnú prácu

„odporúčam“

k obhajobe v študijnom odbore Konštrukčné a procesné inžinierstvo a v prípade úspešnej obhajoby

„odporúčam“

udelieť akademický titul „philosophiae doctor“ v skratke „Ph.D.“.

V Mladej Boleslavi 16.3.2026

Ing. Michal Pavlov, PhD.