

**doc. Ing. Josef KOLAŘ, CSc.**  
**U 12 120**  
**FS ČVUT v Praze**

Oponentský posudek disertační práce na téma:

## **„ Studie distribuce zatížení evolventního ozubení v převodových ústrojí “**

Doktorand:

**Ing. Ondřej BERKA**

Školící pracoviště: **U 12 113 - Ústav konstruování a částí strojů, FS ČVUT v Praze**

Školitel:

**Prof. Ing. Vojtěch Dynybyl, Ph.D.**

Školitel specialista:

**Ing. František Lopot, Ph.D.**

### **Úvod:**

Otázky experimentálního výzkumu rozložení zatížení po délce zubu evolventního ozubení, tj. distribuce zatížení evolventního ozubení v převodových ústrojích velmi výkonných strojů, přenášející výkon řadů MW je s ohledem na požadavky zvyšování životnosti, spolehlivosti a účinnosti velmi aktuální.

Předložená doktorská práce s přílohou dokumentuje doktorandem vynaložené úsilí a dále odborné zkušenosti a poznatky, které byly získány při návrhu nové metodiky měření.

V následující části oponentního posudku disertační práce Ing. Ondřeje Berky se vyjádřím k jednotlivým bodům hodnocení, daných mi osnovou, předepsanou oddělením VaV FS ČVUT.

### **1. Dosažení v disertaci stanoveného cíle**

**Hlavním cílem disertační práce je nový komplexní návrh metodiky sledování kvality záběru ozubení.**

Nová metodika využívá tenzometrické způsoby měření napjatosti v dílčích rovinách (řezech), které jsou rovnoměrně rozloženy po délce zubu, přičemž folie s tenzometry je nalepena v přechodové části boku zubu evolventního ozubení.

Splnění stanoveného cíle disertační práce vyžadovalo od doktoranda:

- provést rešerši dané problematiky a analyzovat vhodné způsoby provedení
- experimentálních měření
- navrhnout vhodné parametry a zvolit vhodné typy tenzometrických snímačů
- definovat vhodný způsob instalace tenzometrů, tj. nalepení tenzometrických snímačů
- navrhnout jejich optimální způsob zapojení i s ohledem na kompenzaci teplotních vlivů a ochranu před vnějšími vlivy
- navrhnout měřicí aparaturu, měřicí snímače a vytvořit vyhodnocovací software
- provést sérii testovacích měření a na jejich základě ověřit a optimalizovat stanovenou metodiku sledování kvality záběru ozubení

Dílčí stručný popis prováděných prací, analýza výsledků a doktorandem navržené řešení jednotlivých dílčích problémů je v disertační práci zdokumentováno v kapitolách 4 až 8.

***Po prostudování disertační práce konstatuji, že předložená práce splnila vytčený cíl disertace. Navržená metodika je využitelná pro analýzu distribuce zatížení evolventního ozubení s normálovým modulem  $m_n = 8\text{mm}$  a větší. Pro menší moduly ji patrně nelze aplikovat s ohledem na omezené možnosti instalace tenzometrů.***

## **2. Úroveň rozboru současného stavu v disertaci řešené problematiky**

Rozbor současného stavu v disertační práci řešené problematiky je proveden na stránkách 14 až 68. Přináší základní přehled o problematice určování zatížení a jeho distribuce u zubů evolventního ozubení. Rešerše je zaměřena na způsoby stanovení faktoru  $K_{H\beta}$ , hodnotí analytické postupy a dostupné softwary návrhu evolventního ozubení a dále způsoby testování kvality záběru a používané metody. Závěr přehledu je věnován teoretickým způsobům možností provedení tenzometrických měření a jejich vyhodnocení. Na základě provedené rešerše doktorand dospěl k správnému závěru, že pouze kvalitní tenzometrická měření s kompenzací vlivu teploty umožňuje získat informaci o rozložení zatížení po délce zubu.

K předloženému rozboru mám následující formální připomínku, komentář v provedeném rozboru současného stavu řešené problematiky by mohl být přesněji odborně definován.

K textu mám následující připomínky:

- kapitola 2.1, str. 15 - doktorand definuje podmínku stálého záběru, viz rovnice (2.1), ale v Obr. 2.1 nejsou absolutní rychlosti dílčích kol soukolí (ani jejich složky – normálová a tečná rychlost) zakresleny.
- kapitola 2.1, str. 17 – Nepřesné formulace v textu nebo překlep ve větě, cituji: „*Tvar zubu je určen základním profilem v normálné rovině na obr. 2.4*“. Vhodnější a výstižnější by bylo napsat: „*Tvar boku zubu je určen základním profilem výrobního nástroje v normálové rovině, viz obr. 2.4.*“
- kapitola 2.1, str. 18 – Nepřesné formulace v textu popis obr. 2.3 jde o normálovou rovinu, nikoliv *normálnou* rovinu.
- kapitola 2.1, str. 18 - Nepřesné formulace v textu ve větě, cituji: „*Tvar zubu je možno ještě měnit pomocí výškové korekce, kdy dochází k posunutí profilu [16]*“. Vhodnější a výstižnější by bylo napsat: „*Tvar zubu evolventního ozubení je možno ještě měnit pomocí výškové korekce, kdy dochází k posunutí roztečné přímky základního profilu nástroje (hřebenu) o určitou vzdálenost na vnější či vnitřní stranu roztečné kružnice vyráběného ozubeného kola.*“
- kapitola 2.2.1.3 str. 25 – výkladu záběrové úsečky postrádám informaci kdy, v jaké fázi záběru jsou v záběru dva zuby a kdy jeden zub a jak se tato skutečnost odráží v definici součinitele záběru  $\varepsilon = \varepsilon_\alpha + \varepsilon_\beta$  a v tuhosti ozubení a jak se tento vliv projeví na sledovaném průběhu součinitele  $K_{H\beta}$ .
- kapitola 2.2.2, str. 28 – místo krouticího momentu by bylo vhodnější používat točivý (hnací) moment,  $F_N$  není nominální síla, ale normálová síla, Proč v teoretickém rozboru nejsou silové účinky  $F_T$  a  $F_R$  vyjádřeny jako funkce  $F_N$ , případně jako funkce hnacího momentu.
- kapitola 2.2.2, str. 30 – postrádám informaci, co značí veličina  $\alpha_w$  a veličina  $u$  ve vztahu 2.26 a 2.27.

- kapitola 2.2.2, str. 33 – postrádám informaci, jak je definována korekce  $x$ , není uvedena ani v seznamu veličin.
- kapitola 2.2.2, obr. 2.15 až 2.19 – k anglickým popiskám by bylo vhodné doplnit české odborné překlady.
- kapitola 2.2.2, str. 43 – postrádám informaci, z jakého zdroje je uvedeno, že v záběru může velmi krátkodobě dosahovat teplota oleje několik stovek stupňů, předpokládám Celsia.
- kapitola 2.2.4, Obr. 2.31 – nečitelný.
- kapitola 2.2.4, str. 57 – špatný odkaz na vztah (2.49), správně vztah (2.50)

### **3. Teoretický přínos disertační práce**

Teoretický přínos disertační práce k problematice analýzy velikosti součinitele  $K_{HB}$  spatřuji v rozboru metodiky tenzometrických měření, rozboru vhodných typů tenzometrů a v posouzení možných variant zapojení tenzometrů a případně v algoritmu optimálního řešení křížového zapojení, umožňujícího eliminaci náhodné ztráty měřeného napětí a vhodnou kompenzací vlivu teploty na prováděná měření v planetových převodovkách pro velké výkony.

Teoretický rozbor algoritmu řešení dílčích úloh vytvořeného softwaru je však v předložené disertační práci popsán vcelku stroze, mimo jiné např. postrádám definici (vztah) jak daleko od sebe mají být od sebe řady tenzometrů A a B nalepeny. Nezkušený čtenář nemůže z textu doktorské práce pochopit výhody optimalizované křížové vazby na dvojici zubů, kdy při poruše jednoho z tenzometrů ve sledované rovině neztrácíme informaci, ale z půlmostového zapojení přechází systém do čtvrtmostového zapojení. Chybí informace jak je v tomto případě prováděná určitá korekce naměřeného napětí ze sousedního průřezu do měřeného průřezu.

Konstatuji, že teoretický rozbor dané problematiky není autorem přehledně zpracován do jedné souborné kapitoly, ale je rozložen do čtyř dílčích kapitol disertační práce. V nich se stručná teorie promíchává s analýzou naměřených dat a s interpretací výsledků. Teoretické a praktické požadavky, kladené na vytvořený autonomní datalogger nejsou v doktorské práci autorem blíže specifikovány, přestože tento datalogger lze považovat za jeden ze zásadních přínosů této práce, vytvořené na veřejné vysoké škole.

V kapitole 7.3 Robustní zapojení tenzometrů v zubových mezerách je uvedeno, cituji: „V případě, že dojde ke ztrátě dat z tenzometru je možnost signál na základě použití algoritmu nahradit. Kompletní optimalizované křížové zapojení je uvedeno na obr. 7.6.“

K této citaci musím konstatovat, že bližší a výstižný popis algoritmu náhrady nefunkčního tenzometru jsem v textu doktorské práce nenašel.

### **4. Praktický přínos disertační práce**

Praktický přínos disertační práce spočívá především v provedení velkého množství experimentálních měření, na nichž byla navržená tenzometrická metoda odzkoušena. Byly otestovány navržené a vyrobené snímače, byl odladěn vytvořený software. V práci je stručně popsána montáž instalační fólie s tenzometry do ozubení, pracnost a nutnost určité zručnosti při jejich zapojení k dataloggeru. Z předložené práce je patrné, že navržená metodika a postup je vhodný pro měření a analýzu součinitele  $K_{HB}$  u ozubení s normálovým modulem  $m_n=8$  mm a větším. Navržená experimentální metoda může po odtajnění „know-how“ přispět rychlejšímu posuzování vhodných tvarových modifikací ozubení. Ze stávajícího popisu uvedeného v doktorské práci, dospívám k závěru, že tuto metodiku může v praxi zatím vhodně aplikovat pouze autor, neboť měřící aparaturu si

z uvedeného popisu nikdo nevyrobí a pro praktické využití si ji bude muset od školícího pracoviště vypůjčit nebo si měření objednat.

## **5. Vhodnost použitých metod řešení**

Metody, použité doktorandem při řešení dílčích úkolů disertační práce, lze rozdělit do těchto základních oblastí:

- *měření fyzikálních veličin experimentů* - doktorand využíval jemu známé a ekonomicky dostupné elektrické měřicí systémy LabView s možnostmi digitálního záznamu dat. Pro zpracování naměřených dat použil software Matlab.
- *provedení teoretických výpočtů* - k vytvoření matematického modelu posuzovaných pojezdů a vyhodnocení jízdních vlastností vhodně využil Matlab .

## **6. Způsob, jak byly použité metody aplikovány**

K způsobu využití výše uvedených metod, které doktorand při řešení dílčích úkolů disertační práce použil, konstatuji, že odpovídají odborným znalostem a zkušenostem, které doktorand získal během inženýrského a doktorského studia a odráží ekonomické možnosti, které měl v době jejich řešení na pracoviště k dispozici.

## **7. Prokázání odpovídajících znalostí v daném oboru**

Předloženou disertační práci prokázal doktorand nejen vcelku dobré znalosti z teorie a konstrukce evolventních soukolí převodových ústrojí, ale především velké dovednosti v realizaci experimentálních tenzometrických měření na velmi výkonných převodovkách. Prokázal schopnost vyhodnocovat obsáhlé datové soubory pomocí vlastních programů, vytvořených v prostředí Matlab. Tyto programy však nejsou v práci přiloženy, v práci jsou pouze dokumentovány výstupy z těchto programů.

## **8. Formální úroveň disertační práce**

Disertační práce má na 149 stranách základního textu velmi dobrou grafickou úroveň, avšak méně logické členění. K lepší přehlednosti disertační práce by taky přispělo, aby u popisu jednotlivých obrázků zvolil jiný styl a výšku písma. Vhodné by bylo k anglickým popiskám doplnit české odborné překlady, neboť práce je psána v českém jazyce.

Domnívám se, že poněkud výstižnější a přesnější komentář by lépe umožnil čtenáři, získat úplný názor na obsah a šíři teoretické a experimentální práce, kterou doktorand v průběhu svého studia vykonal. Práce mohla být dále doplněna CD s vytvořenými programy a případně i výkresy konstrukce navržených snímačů, např. dataloggeru.

V textu práce je velké množství drobných překlepů či pravopisné chyby, které dokumentují menší zkušenost doktoranda s psaním tak rozsáhlého odborného vysvětlujícího textového komentáře. Ukazují, že doktorand nevěnoval závěrečné redakci textu doktorské práce patřičnou pozornost.

Jako ilustrační příklad uvedu chybu v titulním listu názvu disertační práce, cituji:

STUDIE DISTRIBUCE ZATÍŽENÍ EVOLVENTNÍHO OZUBENÍ  
V PŘEVODOVÝCH ÚSTROJÍ

Humorně zní i jeden ze závěrů v kapitole 8.4 Přínos pro vědu a výzkum, cituji:

„Potvrzení správnosti návrhů ozubení na základě teorie a za požití softwarů zahrnující modifikace .....“. Místo požití má být použití.

## 9. Otázky k obhajobě:

- 1) Ve vztazích (6.3) a (6.4) je patrně chyba, můžete je blíže objasnit?
- 2) Prosím o detailnější vysvětlení rozdílu mezi „rovinným“ a křížovým zapojením tenzometrů a objasnění principu algoritmu náhrady dat z nefunkčního tenzometru.
- 3) Prosím o podrobnější vysvětlení pojmu „robustní metodika pro posouzení celkového návrhu převodového ústrojí“, který je uveden na str. 148 předložené doktorské práce.

## 10. Závěrečné doporučení

Předloženou disertační práci a seznamem publikací autora souvisejících s disertační prací doktorand prokázal znalosti z problematiky experimentálních měření silových účinků a deformací ozubených kol planetových převodovek. Prokázal schopnosti samostatně provádět a vyhodnocovat experimentální měření evolventních soukolí.

I přes výše uvedené připomínky se domnívám, že předložená disertační práce splňuje podmínky tvůrčí vědecké práce a **doporučuji** ji k obhajobě.

V Praze dne 24. ledna 2017

doc. Ing. Josef **Kolář**, CSc.