

**doc. Ing. Václav Vaněk, Ph.D.**  
Západočeská univerzita v Plzni  
Fakulta strojní, Katedra konstruování strojů  
Univerzitní 8, 306 14 Plzeň

## **Oponentský posudek disertační práce**

**Ing. Ondřeje Berky**

s názvem

**„Studie distribuce zatížení evolventního ozubení v převodových ústrojích“**

**Studijní obor: Konstrukční a procesní inženýrství**

**Škola: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní**

### **Rozbor práce**

Práce se zabývá návrhem metodiky pro experimentální sledování kvality záběru ozubení především pomocí klíčového parametru, za nějž byl v práci stanoven součinitel nerovnoměrnosti rozložení zatížení po šířce zubu  $K_{H\beta}$ . V disertační práci (dále DisP) je představena nová metodika navržená především pro studium distribuce zatížení prostřednictvím čehož umožňuje sledování kvality záběru evolventního ozubení v převodových ústrojích. Předmětem zkoumání byly především planetová převodová ústrojí přenášející výkon v řádu MW.

### **Práce je rozčleněna do následujících částí**

- **Úvod** – V úvodu autor komentuje to, co je předmětem DisP a uvádí, že kvalita záběru ozubených kol je rozhodujícím faktorem pro posouzení soukolí z hlediska jeho chodu, únosnosti, životnosti, hlučnosti apod. Motivací autora pro sepsání DisP byla potřeba doplnění informací a kvalitě záběru ozubení a zvyšující se poptávka výrobních firem po ověřování konstrukčních návrhů převodových systémů. S tím souvisí i zajištění narůstající potřeby provádění experimentálních měření, která by umožňovala také sledování a monitorování zařízení přímo u koncového zákazníka i v průběhu reálného provozu převodového systému.
- **Přehled problematiky určení zatížení evolventního ozubení a jeho distribuce a problematiky tenzometrie** – V kapitole jsou uváděny základní a všeobecně známé poznatky z oblasti teorie a navrhování ozubených převodů. Je provedena rešerše v oblastech testování kvality záběru, zobrazovacích metod a tenzometrického měření. Velmi důležitý je zde uváděný závěr z výsledků rešerše (za klíčový ukazatel byl vybrán součinitel  $K_{H\beta}$ ).
- **Cíl** – Zde jsou stanoveny cíle DisP. Především vytvořit univerzálně použitelnou a robustní metodiku vhodnou pro sledování kvality záběru ozubení.
- **Návrh experimentálního měření kvality záběru** – Autor se zabývá problematikou volby, instalace a návrhu zapojení tenzometrů (nové a optimalizované zapojení tenzometrů). Dále se zabývá návrhem (autonomní datalogger), nastavením a zástavbou měřicí aparatury.
- **Provedení experimentů** – Byla provedena série třech měření za účelem verifikace a zpřesňování navržené metodiky. Měření byla prováděna na planetových převodovkách určených pro přenášení relativně velkých výkonů. V průběhu provádění experimentů byly vyzkoušeny nově navrhované postupy testování a měřicí aparatura. Všechna měření byla provedena v rámci záběrových zkoušek na zkušebních stencích přímo u výrobce převodovek.
- **Zpracování, vyhodnocení a interpretace dat** – V této kapitole autor uvádí, jakým způsobem pracoval a nakládal s naměřenými daty získanými z předchozích experimentů. Pro zobrazování, analýzu, a vyhodnocování naměřených dat byl použit autorem vyvinutý program běžící v prostředí Matlab.
- **Výstupy práce** – Výstupy této DisP jsou především

- Univerzální metodika pro průběžné testování kvality záběru ozub. kol (měření lze aplikovat na převodové systémy s přímým a šikmým evolventním ozubením).
  - Navržení a použití instalační fólie (zjišťuje zpřesnění výsledků získaných dle navržené metodiky).
  - Křížové zapojení tenzometrů (kompenzace teploty, nezávislost na smyslu otáčení ozub. kol, možnost náhrady ztráty dat s tenzometru).
- **Závěry práce** – V závěru práce autor hodnotí navrženou metodiku a její robustnost, co se v průběhu práce povedlo, zda byly splněny cíle DisP a jaké jsou její přínosy pro oblast VaV a pro průmysl (využití v praxi).

## Dosažení v DisP stanoveného cíle

Cílem DisP bylo vytvořit univerzálně použitelnou metodiku pro sledování kvality záběru ozubení dvou spoluzabírajících ozubených kol. Stanovení tohoto cíle nebylo samoúčelné, ale vzešlo především z poptávky průmyslu a to konkrétně od výrobce převodových systémů určených do těžkého provozu a větrných elektráren. V DisP bylo ukázáno, že jednotlivé postupové kroky navrhované metodiky umožňující sledovat kvalitu záběru v závislosti na zatěžovací charakteristice (kvantifikace dat) prostřednictvím součinitel nerovnoměrnosti rozložení zatížení po šířce zubu  $K_{H\beta}$  jsou v praxi realizovatelné a použitelné. Zjištěné informace lze pak využít v procesu návrhu převodových systémů pro úpravu parametrů ozubení dle skutečného použití převodovky v praktickém provozu.

**Cíle a sub-cíle disertační práce, které jsou uvedeny v kap. 3 DisP, považuji za splněné**

## Úroveň rozboru současného stavu v DisP řešené problematiky

Rozbor současného stavu řešené problematiky je v navrhované DisP uveden pouze zevrubně a poměrně stručně. Autor se spíše soustřeďuje na rešerši z oblasti problematiky určení zatížení evolventního ozubení, distribuce zatížení a tenzometrie. Východiskem je především stále narůstající potřeba výrobních firem na ověřování provedených návrhů převodových systémů a studium zatížení ozubení. Z provedené rešerše vyplývá, že standardní analytické výpočtové postupy již neodpovídají současnému tzv. „State of the Art“. Využívají se tedy především sofistikovanější nástroje zabudované v moderních softwarových nástrojích. Je však zřejmé, že i tyto moderní nástroje tzv. „Virtual Prototyping“ mají svá omezení a úskalí a tudíž provádění praktických experimentů je i přes jejich časovou a finanční náročnost v odůvodněných případech nezpochybnitelné. V průběhu rešerše se také nepodařilo najít jednoznačně popsanou experimentální metodu pro zjišťování distribuce zatížení v ozubení prostřednictvím tenzometrických měření v plné jeho šíři a úskalími, které provází jeho aplikaci především do převodových planetových systémů. Toto zjištění otevírá značný prostor pro bádání ve výše uvedené oblasti a tomuto také odpovídá DisP řešená problematika.

## Teoretický přínos disertační práce

V DP je stanovena posloupnost procesů probíhajících při návrhu experimentů, která je určitým vodítkem pro nalezení takové metodiky, která bude, pokud možno, co nejuniverzálněji použitelná pro sledování kvality záběru ozubení dvou spoluzabírajících kol. Východiskem pro nalezení vhodné metodiky a návrh jednotlivých postupových kroků (včetně určení jejich správné posloupnosti) bylo dodržení zásad metody DOE (Design of Experiments), což vedlo ke snížení nákladů a časové náročnosti praktické aplikace metodiky a provedení a vyhodnocení experimentů dle navržených metodických pokynů. Za hlavní teoretický přínos DisP tedy považuji návrh nové metodiky určené pro studii distribuce zatížení po šířce zubu oz. kola, která je prioritně zaměřená na sledování kvality záběru evolventního ozubení v převodových systémech. Uvedená problematika není řešena komplexně a v DisP jsou tedy uvedeny dva další možné směry bádání – optimalizace představené metodiky a rozšíření využití dat získaných již podle stávající metodiky. Přínosem je také potvrzení správnosti výše zmiňovaného prostřednictvím vyžití a aplikace poznatků z oblasti teorie ozubených převodů a použití sofistikovaných softwarových nástrojů pro analýzu, posouzení a verifikaci naměřených dat.

## Praktický přínos disertační práce

Praktickým přínosem DP je nově vzniklá a v rámci záběhových zkoušek na zkušebních stenech přímo u výrobce převodovek aplikovaná metodiky pro sledování kvality záběru ozubení. Ověřování a optimalizace metodiky proběhlo na základě zpracovaných experimentálních dat získaných z provedené série testovacích měření. Provedená měření jsou velice srozumitelně popsána, chybí mi zde však uvedení některých podmínek, za kterých experiment probíhal a které by mohly také mít zásadní vliv na výsledky měření (teploty, časy, použité mazivo apod.). Metodika se opírá o tenzometrické měření deformace zubu v místě s předpokládaným nejvyšším tahovým/tlakovým napětím, z něhož je možné stanovit součinitel nerovnoměrnosti rozložení zatížení po šířce zubu  $K_{H\beta}$ , který byl v DisP stanoven jako klíčový pro sledování kvality záběru ozubení. Za přínosné je možno také považovat vlastní měřicí aparaturu navrženou s ohledem na požadované výstupy, počet měřících kanálů, snímkovací frekvenci, parametry testování a požadovanou autonomii v planetovém soukolí. Za významnou lze považovat iniciaci návrhu na vytvoření autonomního dataloggeru a jeho vyladění během provádění experimentální fáze, což vyústilo k návrhu a výrobě druhé verze dataloggeru firmou Cleverttech, s.r.o. Významné je také v DisP navržení přesné instalační fólie, která byla přímo použita pro instalaci tenzometrů a tím minimalizována chyba nepřesnosti jejich nalepení. Pomocí instalační fólie bylo dosaženo zvýšení přesnosti a spolehlivosti dle metodiky prováděných měření. Byl také stanoven nový způsob křížového zapojení tenzometrů s kompenzací teploty. Toto napomohlo ke zvýšení spolehlivosti metodiky a eliminaci ztráty dat.

Závěrem je možné podotknout, že výsledky DisP nabízí významnou možnost jejich využití průmyslovou sférou a to především pro optimalizaci návrhových parametrů tvaru a velikosti zubů. Na základě metodiky lze také hodnotit a optimalizovat celkový návrh převodového systému.

## Způsob, jak byly použité metody aplikovány

Zvolené metody a především aplikovaná a univerzálně použitelná metodika pro sledování kvality záběru ozubení byly aplikovány vhodně a správně v návaznosti na logiku postupu vývoje, konstrukčního návrhu a optimalizace převodových systémů.

## Prokázání odpovídajících znalostí v daném oboru

Domnívám se, že autor je velmi dobře zorientován v řešené problematice, což plyne i z jím již dříve získaných jak teoretických, tak i praktických poznatků a zkušeností.

V daném oboru prokázal jednoznačně odpovídající znalosti, které využil k návrhu v práci uváděných vlastních řešení.

## Formální úroveň práce

DisP je systematicky zpracována. Její jazyková úroveň i grafické zpracování má velmi dobrou úroveň. V DP jsou pouze drobné chyby především stylistického charakteru. Za závažnější nedostatek však považuji to, že některé obrázky jsou pouze oskenované a překopírované, což způsobuje v některých případech jejich nesrozumitelnost a špatnou čitelnost. Domnívám se také, že legendy a popisky u obrázků, grafů a schémat by měly být uváděné v českém jazyce. U některých charakteristik chybí popisy os.

## Dotazy k obhajobě

1. Jaké byly získány poznatky a praktické zkušenosti s chováním lepidel a ochranných epoxidových pryskyřic v poměrně agresivním prostředí (olej, zvýšená teplota ...)? Byla zjišťována stabilita parametrů jejich (výrobce deklarovaných) vlastností v čase (samozřejmě při vystavení lepidel, pryskyřic a tmelů nepříznivým vlivům)?
2. Vysvětlíte přínos nově navrženého způsobu křížového zapojení tenzometrů (zvýšení spolehlivosti, kompenzace ztráty dat)?
3. Jaký má vliv invazivní umístění aparatury na výsledky měření? Byl takto umístěn datalogger při provádění měření III?

## **Závěrečné vyjádření**

Na základě výše uvedeného doporučuji disertační práci Ing. Ondřeje Berky k obhajobě a v případě úspěšné obhajoby doporučuji udělit disertantovi akademický titul

**„doktor“.**

doc. Ing. Václav Vaněk, Ph. D.

V Plzni dne 25. 1. 2016