

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**TEZE
DISERTAČNÍ
PRÁCE**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ A ČÁSTÍ STROJŮ

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

*Studie distribuce zatížení evolventního ozubení
v převodových ústrojí*

Ing. Ondřej Berka

Doktorský studijní program: Strojní inženýrství

Studijní program: *Konstrukční a procesní inženýrství*

Školitel: *prof. Ing. Vojtěch Dinybyl, Ph.D.*

Teze disertační práce k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Praha

Prosinec 2016

Název anglicky: *Study of Load Distribution of Involute Gear
in Transmission*

Disertační práce byla vypracována v prezenční formě doktorského studia na Ústavu konstruování a částí strojů Fakulty strojní ČVUT v Praze.

Disertant: Ing. Ondřej Berka
Ústav konstruování a částí strojů, Fakulta strojní ČVUT v Praze
Technická 4, Praha 6, Dejvice 166 07

Školitel: prof. Ing. Vojtěch Dinybyl, Ph.D.
Ústav konstruování a částí strojů, Fakulta strojní ČVUT v Praze
Technická 4, Praha 6, Dejvice 166 07

Školitel specialista: Ing. František Lopot, Ph.D.
Ústav konstruování a částí strojů, Fakulta strojní
ČVUT v Praze
Technická 4, Praha 6, Dejvice 166 07

Oponenti:

Teze byly rozeslány dne:

Obhajoba disertace se koná dne v hod v zasedací místnosti č. 17 (v přízemí) Fakulty strojní ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6 před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Konstrukční a procesní inženýrství. S disertací je možno se seznámit na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojní ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6.

prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
předseda oborové rady oboru Konstrukční a procesní inženýrství
Fakulta strojní ČVUT v Praze

Obsah

1	Současný stav problematiky	2
1.1	Úvod	2
1.2	Geometrie ozubení	2
1.3	Kinematika a dynamika převodu	2
1.4	Testování kvality záběru, testovací a zobrazovací metody	5
1.5	Závěry z výsledků rešerše	7
2	Cíle disertační práce	7
3	Metody zpracování	8
3.1	Návrh experimentálního měření kvality záběru	8
3.2	Volba snímačů	9
3.3	Instalace tenzometrů	10
3.4	Zapojení tenzometrů	10
3.5	Měřicí aparatura	12
3.6	Zpracování, vyhodnocení a interpretace dat	13
4	Výsledky	18
4.1	Provedení experimentů	18
4.2	Metodika pro průběžné testování kvality záběru	18
4.3	Instalační folie	20
4.4	Robustní zapojení tenzometrů v zubových mezerách	21
5	Závěr	21
5.1	Závěry práce	21
5.2	Splnění cílů	23
	Publikace související s tématem disertace	24
	Seznam použité literatury v tezích	24

1 Současný stav problematiky

1.1 Úvod

Práce se zabývá studiem zatížení evolventního ozubení v převodových ústrojích. Předmětem zkoumání jsou planetová převodová ústrojí, přenášející výkon v řádech MW. Pro tato zařízení je rozhodující **kvalita záběru**, která má přímý dopad na účinnost. Kvalita záběru je ovlivněna řadou parametrů od požadavků návrhu po detailní geometrické charakteristiky ozubení. Existuje řada výpočtových a testovacích metod, na základě kterých lze odhadovat kvalitu záběru. Nicméně experiment nelze ničím nahradit. Práce se proto zabývá především touto oblastí, zejména pak problematikou přímého sledování kvality záběru v závislosti na vytížení převodovky.

Důraz je kladen na potřebu zjišťovat účinky a data z ozubených kol při provozu převodových ústrojí. Jedná se tedy o proceduru, kdy je sledováno ozubení přímo v uzavřeném převodovém ústrojí. Motivací práce je doplnit informace o kvalitě záběru ozubení v souvislosti se zatížením. Tyto informace jsou využitelné při návrzích převodovek, kde umožní provést ozubení přesně přizpůsobenou aplikaci převodovky. Za tímto účelem je navrhována metodika pro testování těchto převodových ústrojí podle stanovených kritérií, která bude produkovat data zpětně uplatnitelná v návrhu ozubení.

1.2 Geometrie ozubení

Jedním z klíčových kroků pro přípravu metody, je znalost geometrie ozubení. Geometrie zubu má přímý vliv na jeho pevnost. Samotná velikost zubu se přímo podílí na hodnotě napjatosti. Rozložení napjatosti je poté dáno tvarem zubu a to jak po profilu zubu v průřezu, tak po jeho délce.

1.3 Kinematika a dynamika převodu

Důležitými parametry pro návrh experimentu jsou mezera mezi zuby za účelem prostorových možností instalace tenzometrů, doba záběru za účelem nastavení vzorkovací frekvence aparatury a znalost zatížení ozubení, ta slouží k výběru typu tenzo-

metrů, k určení místa jejich instalace, k nastavení parametrů elektroniky a k validaci naměřených hodnot.

Mezera mezi zuby je dána prostorem mezi patní částí zuby jednoho kola a hlavovou částí zuby kola spoluzabírajícího. V literatuře je tento prostor označován jako hlavová vůle c_a .

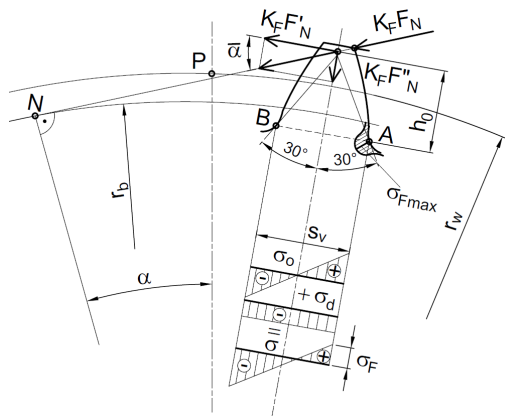
$$c_a = 0,25 \cdot m_n. \quad (1)$$

Dalším důležitým krokem při návrhu této metodiky je určení doby záběru sledovaného zuby. Doba záběru je určena na základě znalosti velikosti záběrové úsečky a rychlosti záběru zkoumaného zuby vztahem

$$t = \frac{1}{r_{b1} \cdot \omega_1} \cdot \left(\sqrt{r_{a1}^2 - r_{b1}^2} + \sqrt{r_{a2}^2 - r_{b2}^2} - (r_1 + r_2) \cdot \sin\alpha \right). \quad (2)$$

Pevnostní výpočty ozubených kol se běžně provádějí ve dvou základních směrech. Jedná se o výpočty na ohyb a na dotyk. Mezní stav pro výpočet na ohyb je únavový lom vycházející zpravidla z přechodové patní oblasti na činné straně zuby. Pro výpočet na dotyk se mezním stavem rozumí pitting.

Výpočet na dotyk je v přímé souvislosti s modifikacemi a výrobními a deformačními odchylkami, z toho je zřejmé, že existuje řada faktorů a řada opravných nástrojů, které ovlivňují kvalitu dotyku ozubení, zejména pak při uvažování parametru šířky zuby. Řešení vychází z klasického Hertzova vztahu pro dotyk dvou válců. U značně zatížených soukolí je zejména důležité řešit dotyk zubů. Ze získaných poznatků je totiž zřejmé, že k poškození povrchu zuby dochází dříve, než ke vzniku trhlin v oblasti přechodové křivky zuby. Nicméně získávání dat pro posouzení dotyku zubů je velice obtížné, proto se experimentálně zkoumá ohybové namáhání zubů. Představu o zatížení zuby na ohyb poskytuje obr. 1.



Obr. 1: Zatížení zubu a zobrazení napjatosti - upraveno z [3]

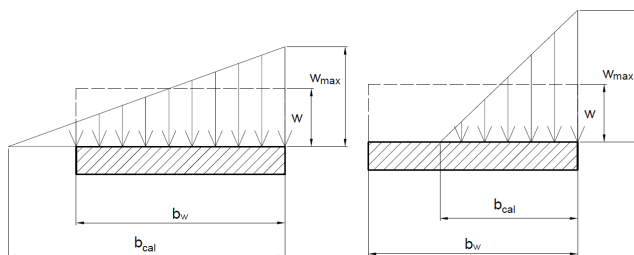
Ze schématu na obr. 1 je zřejmé, že z pohledu citlivosti je příznivější umístit'ovat tenzometrické snímače na bok zubu, kde dochází k tlakovému namáhání, tedy strana zubu, kde nedochází k záběru ozubení v místě nebezpečného průřezu s přihlédnutím k hlavové vůli.

Důležitým parametrem při zkoumání zatížení je také šířka zubu, která sebou přináší několik faktorů ovlivňujících kvalitu záběru. Mezi tyto faktory patří zejména samotná geometrie ozubení spojená s modifikacemi, deformace a jednotlivé výrobní odchylky. Tyto faktory se sumarizují do koeficientu nerovnoměrnosti zatížení K_β . Dle ČSN EN ISO 6336 je koeficient definován vztahem:

$$K_{H\beta} = \frac{w_{max}}{w_m} = \frac{(F/b)_{max}}{F_m/b}. \quad (3)$$

Určit analyticky nerovnoměrnost zatížení, patří mezi nejobtížnější úlohy pevnostních výpočtů. První možností řešení je užití klasických metod pružnosti, kdy deformace zubů je vyjádřena střední tuhostí ozubení a superpozicí jednotlivých deformací a výrobních nepřesností je poté určeno výsledné rozdělení zatížení. Druhou možností je řešení deformace ozubeného kola, jeho ozubení i se zahrnutím výrobních nepřesností společně, přičemž deformaci hřídelů a uložení superponovat a řešit zvlášť. Řešení potom vyžaduje užití metody konečných prvků a řešení soustavy několika rovnic [2]

a [4]. Zásadní je tedy to, že prvky ovlivňující záběr ozubení se sčítají a do ozubení se promítné suma všech odchylek. Možnosti výsledného sezení zubů v záběru kol jsou na prezentovány na obr. 2.



Obr. 2: Rozložení zatížení po šířce ozubení - upraveno z [2]

1.4 Testování kvality záběru, testovací a zobrazovací metody

Velmi ceněným údajem je vždy ověření správnosti návrhu dané součásti. Experimentální metody lze v tomto případě dělit na:

Metody k jednorázovému/okamžitému testování:

- ▶ Fotoelasticimetrie
- ▶ Test ozubení na barvu

Metody k průběžnému testování:

- ▶ Měření vibrací a hluku
- ▶ Tenzometrická měření

Metody použitelné mimo převodovku:

- ▶ Měření vibrací a hluku

Metody použitelné uvnitř převodovky:

- ▶ Test ozubení na barvu
- ▶ Tenzometrická měření

Fotoelasticimetrie je metoda, kterou lze využít při sledování zatížení ozubení, jedná se však o poměrně složitou metodu náročnou na umístění měřicí aparatury a pro využití v převodových ústrojí je tato metoda nepoužitelná.

Test ozubení na barvu je metoda, která sleduje kvalitu záběru ozubených kol. Výsledkem je určení geometrického prostoru na zubech, kde dochází k záběru kol, tzv. otisk. Jejím účelem je tedy stanovení rozložení záběru zubů jednotlivých kol. Nevýhodou testu ozubení na barvu je získání zkreslené informace o výsledném tvaru otisku. Ten je ovlivněn stíráním barvy po celou dobu testu a nepřináší tak zcela relevantní informace o kvalitě záběru ozubení při jmenovitém zatížení převodovky. Výsledný otisk může mít ideální tvar, který je však dán setřením barvy již při nižším zatížení. Závěr je tedy takový, že pro převodová ústrojí existuje značné omezení této metody a pro určení průběžného monitorování je nutno volit jinou metodu.

Nejrobustnější metodou pro získání informace ohledně skutečného zatížení zubů je změření deformace daného místa tenzometry (obr. 3).



Obr. 3: Tenzometrické měření zubu [1]

Z rozdělení metod a získaných informací vyplývá, že tenzometrie je nejbližší vhodnou metodou pro průběžné sledování zatížení ozubení uvnitř převodovky.

1.5 Závěry z výsledků rešerše

V oblasti experimentálních měření je jedním z nejpodstatnějších vlivů sledování distribuce zatížení po šířce ozubení, která má majoritní vliv na hladký chod ozubení. Pro stanovení kvality záběru se nepodařilo najít jednoznačně popsanou komplexní experimentální metodu, která by popisovala postup tenzometrického měření zjištění distribuce zatížení ozubení se všemi úskalími a aplikací do planetového ústrojí. **Na základě rešerše byl jako klíčový parametr pro sledování kvality záběru ozubení vybrán součinitel nerovnoměrnosti rozložení zatížení zubu $K_{H\beta}$. Tento parametr je obsažen ve většině norem pro dimenzování ozubení a je tedy obecně znám jeho význam a interpretace. Současně se pro jeho stanovení otevírají široké a přitom dostupné možnosti získání potřebných experimentálních dat. Pro přesné stanovení tohoto součinitele je vybráno tenzometrické měření, které zjišťuje průběžné zatížení zubu po jeho šířce, na rozdíl od testu na barvu, který nemůže vzhledem ke kontinuálnímu stírání barvy tato data poskytnout.**

2 Cíle disertační práce

Cíl práce vyplývá z výsledků rešerše, ze kterých současně vyplývají kroky a dílčí úkoly, prostřednictvím kterých bude vytyčeného cíle dosaženo.

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

V návaznosti na definovaný celkový cíl práce, je možné definovat vlastnosti měřicí aparatury jako prostředek pro jeho dosažení:

- ▶ univerzální použitelnost na ozubená kola čelní i jiná s definovanou vůlí spolupřabírajících zubů,
- ▶ dostatečná odolnost proti prostředí a změnám podmínek (mazací médium, teplota),
- ▶ instalace s minimálními nebo žádnými zásahy do konstrukce převodovky,
- ▶ nezávislost na vnějších zdrojích energie a výpočetní technice,

- měření v nejcitlivější oblasti.

Potřeba vzniku kompletní metodiky vzešla z poptávky průmyslu, konkrétně výrobce převodových ústrojí do těžkého průmyslu a větrných elektráren. Z dostupných zdrojů je zřejmé, že pro přesný popis kvality záběru je nutno detekovat vždy aktuální stav záběru, k tomuto je dosud nejrozšířenější testování na barvu nedostatečné.

Z hlediska naplnění stanoveného cíle práce z pohledu interpretace získaných experimentálních dat a zobecnitelnosti použité metody je možné definovat potřebné kroky:

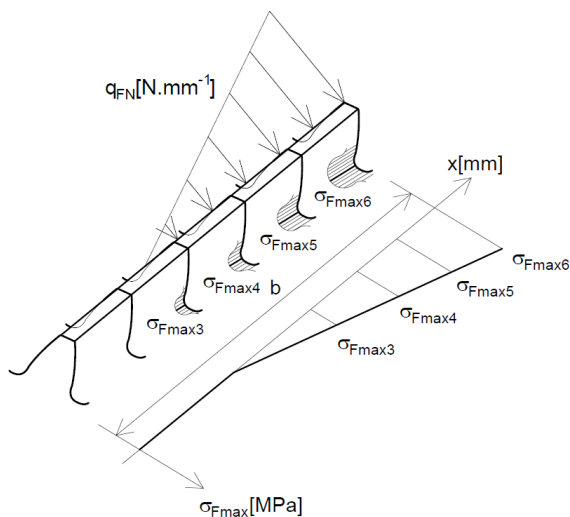
1. Návrh experimentální metody využívající tenzometrického měření. Stanovení způsobu instalace tenzometrických snímačů, jejich zapojení, kompenzování vlivů teplotních rozdílů, stanovení parametrů a ochrany před vnějšími vlivy.
2. Návrh měřicí aparatury s ohledem na požadované výstupy, počet měřících kanálů, snímkovací frekvence, parametry testování a požadovanou autonomii v plánetovém soukolí.
3. Stanovení postupu zpracování dat včetně vytvoření zpracovatelského softwaru.
4. Ověření a optimalizace stanovené metodiky měření na základě provedení série testovacích měření.
5. Interpretace výsledků, definice nejistot, diskuze.
6. Zobecnění výsledků práce pro další využití.

3 Metody zpracování

3.1 Návrh experimentálního měření kvality záběru

Zásadním krokem celé práce je stanovení postupu návrhu experimentu. Návrh experimentálního měření začíná zadáním problému, které již bylo v tomto případě provedeno včetně úvahy nad problematikou a získání základních teoretických východisek pro možnost návrhu. Dále je zapotřebí stanovit konkrétní zobecněné parametry experimentu, které budou splňovat vytyčené požadavky a cíle.

Podstata sledování kvality záběru ozubení vychází z provedené studie současného stavu experimentálních metod, kdy jako nejvhodnější bylo zvoleno tenzometrickému měření. Koncept této metody spočívá v rozmístění několika tenzometrů po šířce zubu, které budou sledovat aktuální velikost zatížení po šířce zubu. Rozložení napětí po šířce zubu je patrné z obr. 4. Rozložení napětí je při nerovnoměrném zatížení v patě zubu v jednotlivých řezech rozdílné.



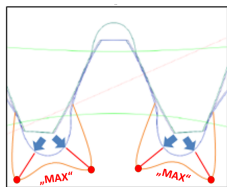
Obr. 4: Prostorové znázornění rozložení napětí v patě zubu v jednotlivých řezech jeho šířky

Tenzometry, které jsou umístěny po šířce zubu, jsou naměřeny hodnoty rozložení napjatosti. Na základě zpracování těchto dat je provedeno vyhodnocení kvality záběru ozubení prostřednictvím součinitele nerovnoměrnosti rozložení zatížení zubu $K_{H\beta}$, který byl pro tuto aplikaci vybrán jako nejvhodnější.

3.2 Volba snímačů

Vzhledem k vlastnostem snímačů, prostorovým možnostem a ekonomickému hledisku bylo přistoupeno k použití odporových tenzometrů. Pro měření ohybové deformace zubu je vhodné používat tenzometry pro měření jednoosé napjatosti. Volba

snímače je ovlivněna předpokládanou velikostí napjatosti (resp. deformace) v měřeném místě a prostorovými možnostmi v záběru ozubení (obr. 5).



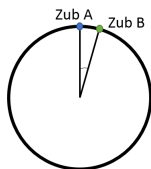
Obr. 5: Distribuce napětí v okolí paty zubu a místo instalace tenzometrů [A3]

3.3 Instalace tenzometrů

Instalace tenzometrů na bok zubu je z hlediska kvality měření klíčový problém. Zcela zásadním krokem je použití **instalační folie**. Její použití patří mezi přínosy této práce a nebylo dosud publikováno. Tenzometry je třeba nainstalovat na sledované zařízení a ochránit před vnějšími vlivy. Samotná instalace probíhá dle přesně daných a vzájemně na sebe navazujících operací, které je nutné provést pro správné fungování tenzometru. Velký důraz musí být kladen na sled jednotlivých kroků a zvýšenou pečlivost provádění.

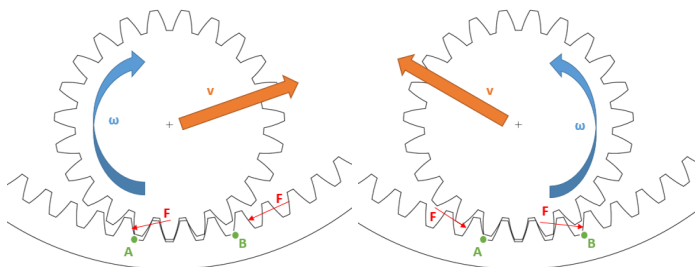
3.4 Zapojení tenzometrů

Dalším přínosem této práce je použití **optimalizovaného robustního zapojení tenzometrů**, které minimalizuje možnou ztrátu dat z jednotlivých tenzometrů. Zapojení tenzometrů vychází z teoretických poznatků. Pro měření deformace zubu, čili ohybového napětí je nevhodnější použít zapojení do čtvrt mostu. [A3], [A7], [A8]. Pro kompenzaci teploty je použit kompenzační tenzometr, který je umístěn přímo na jiném, než měřeném zubu. Vzdálenost zubu s kompenzačním tenzometrem je udána v počtu zubů od měřeného zubu a je závislá na parametrech převodovky. Vzdálenost musí být tak velká, aby nedocházelo k deformaci zubu s kompenzačním tenzometrem a zároveň, aby nebyl zub s kompenzačním tenzometrem příliš daleko, a tudíž aby neměl nadměrnou odlišnou teplotu (obr.6).



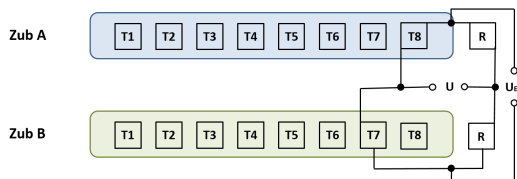
Obr. 6: Umístění tenzometrů na ozubené kolo [A3]

Tenzometry jsou pak zapojeny do půlmůstku, který funguje jako čtvrtmůstek s kompenzačním tenzometrem, kdy dochází ke střídání aktivního měřícího tenzometru podle toho, který zub je aktuálně v záběru. [A8] Princip, kdy jsou tenzometry nalepeny na dvou zubech kola, je velice vhodné využít pro měření opačného boku zubu. Na jednom zubu je tak měřeno tahové zatížení a na druhém tlakové zatížení. Díky této instalaci je navíc měřící **metoda nezávislá na smyslu rotace** kola a je vždy zjištěno zatížení na obou stranách zubu dle obr. 7. [A3]



Obr. 7: Umístění tenzometrů na korunovém kole - způsob otáčení [A7]

Na obr. 8 je zobrazeno optimalizované křížové zapojení tenzometrů pro jednu dvojici tenzometrů. Toto zapojení je definováno jako křížové, kdy jsou spojeny tenzometry do jednotlivých kanálů křížem. Je spojen tenzometr číslo 8 na zubu A s tenzometrem 7 na zubu B a opačně, to je provedeno pro všechny tenzometry. Původní zapojení bylo provedeno tak, že byly spojeny tenzometry na stejné pozici. Cílem optimalizace je zvýšení celkové robustnosti zapojení a měřícího celku.

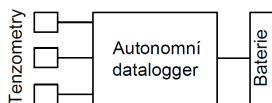


Obr. 8: Umístění tenzometrů na zubu s ukázkou optimalizovaného křížového zapojení

3.5 Měřicí aparatura

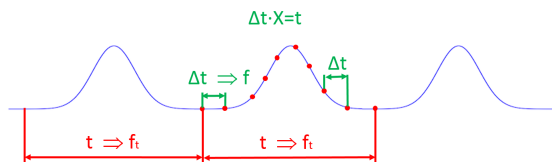
Komplikovanost měření v uzavřeném prostoru převodového ústrojí si vyžádala inovační přístup při návrhu měřicí aparatury. Dále popsany **autonomní datalogger** byl navržen na základě požadavků formulovaných autorem této práce. Z tohoto pohledu lze konečné elektronické provedení považovat za jeden z výstupů této práce.

Ve spolupráci s firmou CleverTech s.r.o. byla vyvinuta již zmíněná autonomní ústředna. Jedná se o zařízení, které obsahuje vlastní zdroj energie (baterie) a vlastní záznamové médium pro ukládání dat. Jedná se o 8-kanálový datalogger pracující s nastavitelnou vzorkovací frekvencí maximálně 6000 Hz/kanál. Jedná se o kompaktní zařízení o rozměrech 56 x 44 x 10 mm. **Autonomní datalogger je jedním ze zásadních přínosů této práce.** V rámci této práce byl nejdříve vyvinut datalogger s 12 bitovým převodníkem a následně datalogger s 24 bitovým převodníkem. Schéma měřicí ústředny je znázorněné na obr. 9.



Obr. 9: Blokové schéma bez zesilovačů

Prakticky jediným potřebným volitelným parametrem (mimo počet kanálů) je vzorkovací frekvence, ta je závislá na době záběru, resp. zatížení zubu a požadovaném počtu vzorků v tomto intervalu. Stanovení vzorkovací frekvence bylo publikováno v [A4].



Obr. 10: Vzorkovací frekvence

Stanovení vzorkovací frekvence vychází z výše vypočtené doby záběru t . Tento záběr zubu se v naměřených datech objevuje s přesně danou frekvencí f_t , což je graficky zobrazeno na obr. 10. Vzorkovací frekvence je dále určena počtem vzorků - bodů, kterými je měřený signál popsán. Počet těchto bodů je označen proměnou X . Výsledná vzorkovací frekvence f je tedy dána vztahem

$$f = \frac{1}{t} \cdot X. \quad (4)$$

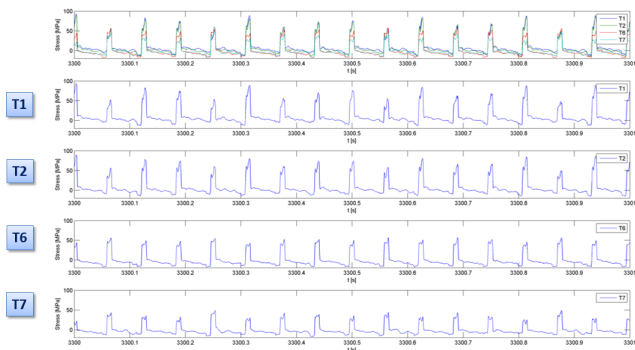
Umístění aparatury je vždy závislé na dané aplikaci. Záleží na zástavbovém prostoru kolem měřeného místa a na tom, zda je měřené místo statické nebo se pohybuje. V případě, že se jedná o pohyblivé kolo, je nutno posoudit zástavbový prostor pro možnosti umístění ústředny. Většina ozubených kol je ovšem v převodové skříní zabudována tak, že není možnost na ně umístit standardní ústřednu. Jelikož datalogger umožňuje vlastní záznam dat, případně vysílání dat přes rozměrově malou anténu, může být umístěn do daleko menšího zástavbového prostoru.

3.6 Zpracování, vyhodnocení a interpretace dat

V této části práce je proveden rozbor vyhodnocení a práce s daty. Pro všechna výše uvedená měření byl použit **vlastní vytvořený software** v programu Matlab, protože metodika zůstává pro všechna měření stejná. Popis jednotlivých kroků byl publikován v [A1], [A6], [A8], [A5],[A3].

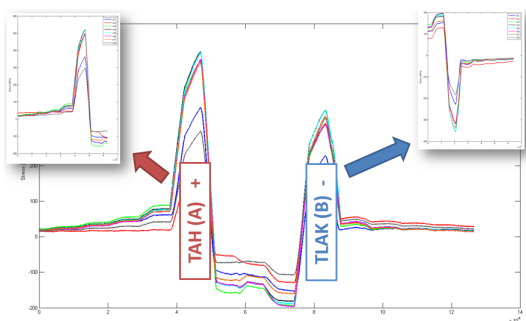
Během měření probíhá kontrola jeho stavu pomocí on-line zobrazování naměřených hodnot. Prvním krokem při následném vyhodnocování dat je úvodní vizuální globální

kontrola. V tomto kroku je provedeno grafické zobrazení celkového naměřeného signálu a vizuálně je posouzeno, zda jsou data naměřená na jednotlivých kanálech relevantní a mohou být dále zpracovávána. [A6] Kvalitní záznam dat je uveden na obr. 11.



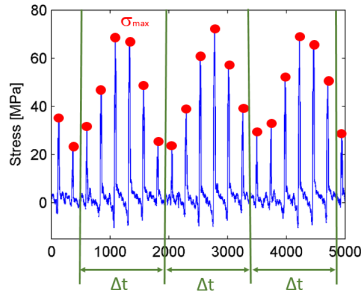
Obr. 11: Signál z tenzometrů T1, T2, T6 a T7 na pastorku

Identifikace signálů přichází jako další krok vyhodnocení dat. Jedná se již o práci se samotným naměřeným signálem a přímo souvisí se způsobem zapojení tenzometrů do můstku. Signál je v tomto kroku rozdělen na jednotlivé části a to jednak pro jednotlivé snímače na zubech kola (obr. 12) a jednak pro jednotlivé fáze měření dle měřícího protokolu.



Obr. 12: Identifikace signálů z tenzometrů na dvou zubech [A8]

Výhodou metody tenzometrického měření je získání absolutních hodnot mechanické napjatosti v měřeném místě zubu, což některé metody neumožňují. Pro posouzení kvality záběru jsou vybírána maxima křivek záběru (obr. 13).

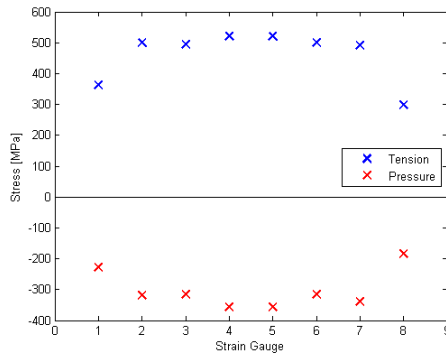


Obr. 13: Maxima záběrových křivek [A1]

Koeficient $K_{H\beta}$ je určen dle vztahu [A1]

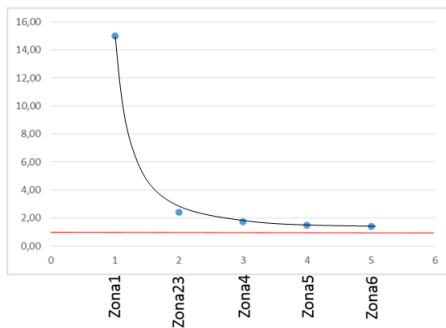
$$K_{H\beta} = \frac{\text{maximální hodnota na šířce zubu}}{\text{průměrná hodnota na šířce zubu}} = \frac{MAX \{ \sigma_{AVGj} \}}{\sigma_{AVGj}}. \quad (5)$$

Rozložení naměřených maximálních hodnot pro daný okamžik je zobrazeno na obr. 14.



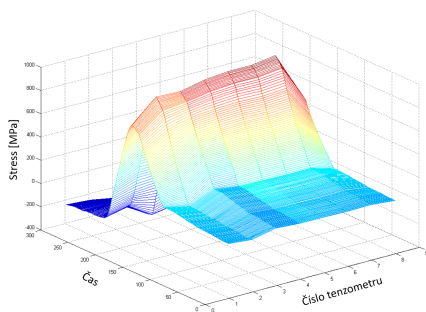
Obr. 14: Maxima záběrových křivek po šířce zubu

Pro převodovky, kde je konstrukce upravena tak, aby při změně zatížení dokázala reagovat a upravovat kvalitu záběru, je zajímavým ukazatelem vývoj koeficientu $K_{H\beta}$ s rostoucí zátěží (obr. 15).



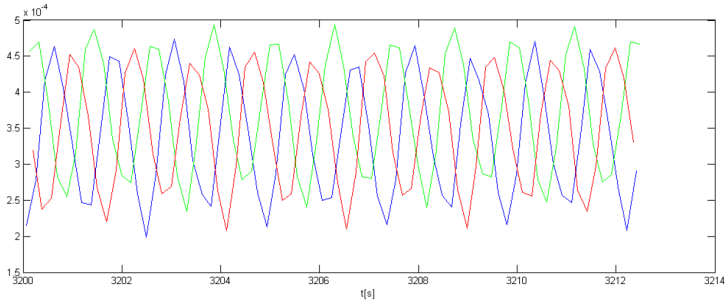
Obr. 15: Průběh koeficientu $K_{H\beta}$ v závislosti na měřených fázích

Graficky lze interpretaci naměřeného záběru názorně ukázat na 3D grafu na obr. 16.



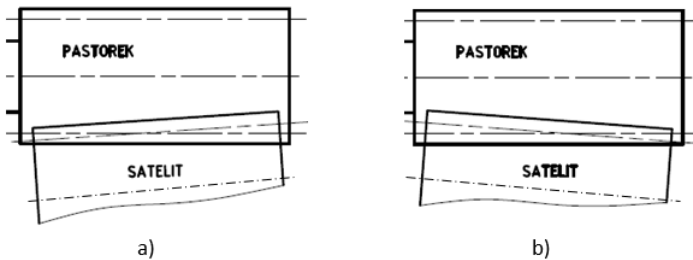
Obr. 16: Zatížení zubu naměřené osmi tenzometry [A3]

Na obr. 13 je prezentován jev oscilace špičkových hodnot záběrových křivek. Nejedná se však o jev žádoucí. Publikováno v [A2] a [A5].



Obr. 17: Frekvence změn velikosti zatížení satelitů [A5]

V praxi má u planetových převodovek smysl uvažovat dva typy oscilace případně jejich superpozice. První typ je způsoben nesouosostí kol planetového stupně případně zvýšenou ovalitou některého z kol. Oproti tomu druhý typ oscilace nastává vlivem pohybu satelitu na unašeči v radiálním směru, dochází tak k nerovnoměrnému záběru ozubení. Pro představu je tento pohyb zachycen na obr. 18.



Obr. 18: Vzájemné vychýlení satelitu s pastorkem (resp. korunovým kolem)

Celková nejistota naměřených dat skládající se z jednotlivých částí byla určena na základě vztahu:

$$u_y = \sqrt{u_{kA}^2 + u_{vA}^2 + u_{zA}^2 + u_{dzA}^2 + u_{duA}^2} = 2,25\%. \quad (6)$$

4 Výsledky

4.1 Provedení experimentů

Za účelem verifikace navržené metodiky v kapitole a dalšího zpřesnění teoretických východisek, byla provedena série měření. Studie zatížení ozubení byla provedena na planetových převodovkách s velkým převáděným výkon v řádu MW. V rámci experimentální práce byly vyzkoušeny unikátní postupy testování a unikátní aparatura, které byly navrženy v rámci této práce. Cílem těchto měření bylo určení kvality záběru, respektive rozložení zatížení zubu po jeho šířce. Všechna měření byla provedena v rámci záběrových zkoušek převodovek na měřících stendech ve zkušební laboratoři výrobce. V rámci těchto experimentů bylo provedeno měření na všech třech typech kol planetové převodovky (pastorek, satelit a koruna). Na každý typ kola byla použita jiná měřící aparatura, přičemž za přínos této práce lze označit ověření funkčnosti autonomního dataloggeru a všech jeho funkcí. Dalším přínosem této práce je vyvinutí instalační folie pro tenzometry, která byla aplikována při všech měřeních. Její užití se ukazuje jako nutné pro dodržení přesnosti při instalaci tenzometrů. Robustnost metody při získávání dat je podpořena optimalizovaným křížovým zapojením tenzometrů.

4.2 Metodika pro průběžné testování kvality záběru

Instalace tenzometrů je provedena na základě teoreticky zjištěného místa maximální hodnoty napjatosti. Kdy zjevně největším přínosem pro vysokou míru přesnosti je užití **předtisknuté instalační folie**, která umožní instalaci tenzometrů přesně na předem určené místo.

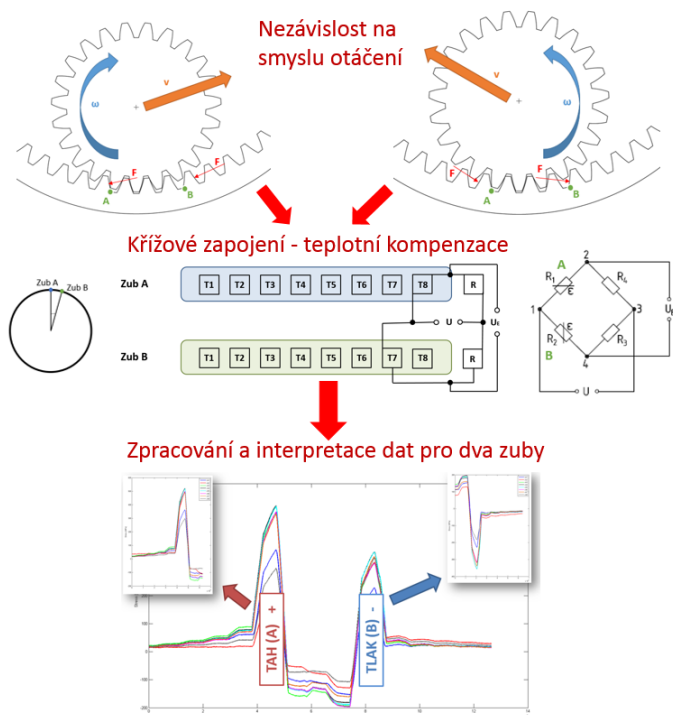
Nejsložitějším kolem pro měření je satelit. Z tohoto důvodu byl vyvinut **autonomní datalogger**, který je možno velice jednoduše instalovat do převodového stupně.

Pro zpracování dat je vyvinut jeden **univerzální software v programu Matlab**, který je možno jednoduše adaptovat pro jakýkoliv druh měření na základě změny několika parametrů.

Základním úkolem bývá zjištění stavu kvality záběru ozubení, které je nejlépe určeno součinitelem nerovnoměrnosti zatížení ozubení $K_{H\beta}$. Jedná se o hodnotu, která je jednak jedním z nejlepších ukazů správnosti návrhu ozubení, současně však ukazatelem kvality návrhu celého převodového ústrojí.

Velikost nejistot byla značně snížena způsobem instalace tenzometrů použitím předtisknuté instalační folie. Optimalizovaným křížovým zapojením bylo docíleno větší robustnosti metody, a je tedy eliminována ztráta dat.

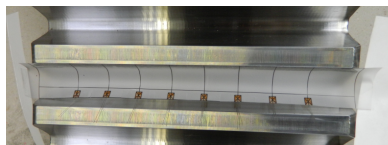
Kvalita záběru může být sledována nepřetržitě a je tedy možné odhalit jevy, ke kterým v převodovém ústrojí dochází na základě změny právě kvality záběru. Současně lze stanovit změnu kvality záběru v návaznosti na změnu zatížení převodovky.



Obr. 19: Způsob instalace tenzometrů a jejich zapojení

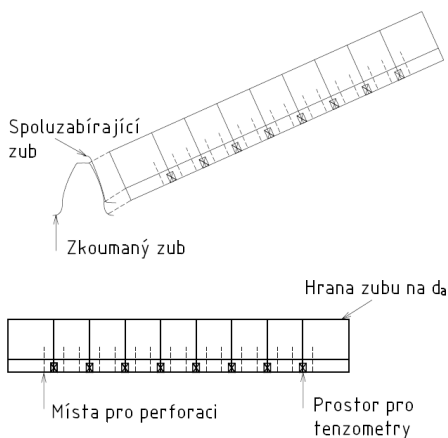
4.3 Instalační folie

Za účelem dodržení co možná největší přesnosti při umístění tenzometrů na zub bylo vymyšleno užití tenzometrické instalační folie. Jedná se o samolepicí folii, na kterou je natisknuto pole pro umístění tenzometrů včetně vodících úseček pro správné zapojování folie na zubu (obr. 20).



Obr. 20: Tenzometrická instalační folie s tenzometry

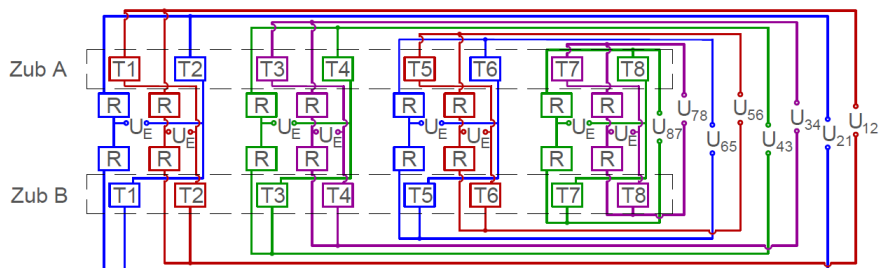
Výška folie je dána rozvinutím křivky zubu ve 2D řezu (obr. 21). Místo pro umístění tenzometrů je na folii určeno dle odpovídajícího místa na boku zubu. Tenzometrická instalační folie zajišťuje rovnoměrné rozmístění tenzometrů po šířce kola, velkou přesnost nalepení tenzometrů na stejnou úroveň zubu a velmi snadnou instalaci tenzometrů na zub, minimalizuje tak chybu při nalepení tenzometrů.



Obr. 21: Rozvinutí křivky zubu a popis folie

4.4 Robustní zapojení tenzometrů v zubových mezerách

Optimalizované zapojení, umožňuje kompenzaci teploty, měření nezávislé na směru otáčení a navíc pokrývá možnou ztrátu dat z tenzometru. 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. 22.



Obr. 22: Kompletní optimalizované křížové zapojení pro 8 tenzometrů

V případě ztráty informací z některého z tenzometrů, lze tyto informace nahradit na základě známé informace z ostatních tenzometrů.

Celkově se jedná o robustní nástroj zapojení a rozmístění tenzometrů, který zachycuje oba směry rotace, oba způsoby namáhání ozubení, kompenzuje deformaci vzniklou změnou teploty a navíc přináší možnost rekonstrukce signálu.

5 Závěr

5.1 Závěry práce

V rámci této práce byl jako klíčový parametr pro sledování kvality záběru ozubení vybrán součinitel nerovnoměrnosti rozložení zatížení zubu $K_{H\beta}$. Při návrhu ozubení je hodnota parametru určována z norem. Současně se pro jeho stanovení otevírají široké a přitom dostupné možnosti získání potřebných experimentálních dat. Pro přesné stanovení tohoto součinitele je vybráno tenzometrické měření, které zjišťuje průběžně

zatížení zubu po jeho šířce, na rozdíl od testu na barvu, který nemůže vzhledem ke kontinuálnímu stírání barvy tato data poskytnout.

V práci je detailně představen postup experimentálního měření založený na tenzometrii, který sleduje zatížení zubu. Veškerý postup od zadání, přípravy měření, instalace tenzometrů, instalace aparatury, měření, zpracování dat až po interpretaci výsledků je popsán v jednotlivých bodech.

Zásadní výhodou vytvořené metody je univerzální použití se zaměřením na planetové převody, kdy díky vytvoření **autonomního dataloggeru**, je možné měřit na libovolném kole včetně satelitů.

Robustnost metody je zajištěna zpracovaným a odzkoušeným **křížovým zapojením tenzometrů**, kdy je navíc kompenzována teplota. Chyba při nepřesnosti nalepení tenzometrů je minimalizována použitím **instalační předtisknuté folie**.

Velice podstatnými výstupy jsou informace o aktuálním zatížení zubu v několika časových krocích, kdy lze stanovit správnost provedených modifikací a potvrdit funkčnost konstrukce, která má reagovat a přizpůsobit se aktuálnímu zatížení. Výstupem jsou pak i časové průběhy pro jednotlivá zatížení a stejně tak i průběh vývoje kvality záběru napříč všemi fázemi.

V rámci práce se povedlo:

- 1) nalézt a definovat parametr vhodný ke sledování v souvislosti se zaměřením práce a tento teoreticky zdůvodnit,
- 2) navrhnout velmi robustní zapojení tenzometrů, které v dané aplikaci umožní rekonstrukci signálu i v případě dílčího poškození instalovaného čidla jako celku,
- 3) zvýšit přesnost lepení tenzometrů návrhem a použitím instalační folie,
- 4) navrhnout a odzkoušet metodiku pro průběžné měření sledovaného jevu, včetně následného vyvinutí nové verze dataloggeru bez zesilovačů.

5.2 Splnění cílů

Splnění stanoveného cíle je dokumentováno především na základě provedení série rozsáhlých měření, na které navazují měření další, spolu se silící poptávkou firem po zjišťování parametrů kvality záběru a ověření tak celkového návrhu převodovky.

Vzhledem k obsahu práce, provedeným měřením a získání hodnot z nich, lze konstatovat, že všechny cíle práce byly splněny. **Byla sestavena nová komplexní metodika studie distribuce zatížení s důrazem na sledování kvality záběru evolventního ozubení v převodových ústrojích.** Metodika se opírá o experimentální tenzometrické měření deformace zubů. Pro měření byly **nově** vytvořeny vlastní měřicí aparatury, umožňující vysokou míru univerzálnosti, zejména pak při zkoumání planetových převodových stupňů. Zároveň byl stanoven nový způsob křížového zapojení tenzometrů s kompenzací na dvojici zubů. A pro instalaci tenzometrů byla nově použita přesná instalační folie.

Publikace autora

- [A1] Berka, O.: Design of Experiment for Load Gear Solution in Planetary Transmission. 2014.
- [A2] Berka, O.; Dub, M.; Lopot, F.; aj.: Analysis of satellites loading in planetary transmission. In *EAN 2015 - 53rd Conference on Experimental Stress Analysis*, 2015, s. 16–19.
- [A3] Berka, O.; Dub, M.; Lopot, F.; aj.: Mesh quality monitoring in evolvent teeth in gearboxes under operation – signal identification. In *XXI IMEKO World Congress "Measurement in Research and Industry"*, 2015.
- [A4] Berka, O.; Dub, M.; Lopot, F.; aj.: Determination of Meshing Gears Quality in Transmission. In *57th International Conference of Machine Design Departments*, 2016.
- [A5] Berka, O.; Dub, M.; Lopot, F.; aj.: Experimental Analysis of Planetary Transmission Load Sharing. *Applied Mechanics and Materials*, ročník 732, 2016: s. 57–60.
- [A6] Berka, O.; Lopot, F.; Dub, M.: Design of Experiment for Load Gear Solution in Planetary Transmission. In *55th International Conference of Machine Design Departments*, 2014.
- [A7] Berka, O.; Lopot, F.; Dub, M.: Experimental analysis of gear loading in planetary transmission. In *EAN 2014 - 52nd International Conference on Experimental Stress Analysis*, 2014.
- [A8] Berka, O.; Lopot, F.; Dub, M.: Experimental Analysis of Gear Loading in Planetary Transmission. *Applied Mechanics and Materials*, ročník 732, 2015: s. 231–234.

Bez ohlasů a recenzí.

Seznam použité literatury v tezích

- [1] Petr, K.: Příspěvek k rozvoji metod navrhování vysoce únosných zubů čelního soukolí. *Disertační práce*, 2015.

- [2] Šalamoun, Č.; Suchý, M.: *Čelní a šroubová soukolí s evolventním ozubením*. Nakladatelství techn. lit., 1990.
- [3] Švec, V.: *Části a mechanismy strojů, Ozubené převody*. ČVUT v Praze, 2003.
- [4] Žák, P.: Příspěvek k navrhování modifikací geometrie ozubených válcových kol. *Disertační práce*, 2009.

Anotace

Tato disertační práce "Studie distribuce zatížení evolventního ozubení v převodových ústrojí" se zabývá návrhem metodiky pro experimentální monitoring kvality záběru čelních ozubených kol. Práce přináší přehled teorie, kde zdůvodňuje volbu parametru, který bude sledovaný navrhanou metodikou. Práce soustřeďuje informace související se studií na dané téma. V praktické části se práce zaměřuje na návrh metodiky sledování kvality záběru ozubení. Metodika byla navržena a ověřena v přímé spolupráci s výrobcem převodových ústrojí, který výsledky jednotlivých studií uplatnil ve vývoji svých produktů. Výstupem práce je zobecnění metodiky pro libovolnou aplikaci sledování zatížení ozubení.

Summary

This thesis "Study of Load Distribution of Involute Gear in Transmission" deals with design of the methodology for continuous monitoring of gears meshing quality. Thesis provides an overview of the theory, which justifies the choice of the parameter which will be monitored by the proposed methodology. Dissertation is focused on information related to studies on a given subject. The practical part focuses on proposed methodology for monitoring the quality of the gear mesh. The methodology was designed and tested in direct cooperation with the gearbox producer and the results of individual studies were used in the development of its products. The outcome of this thesis is a generalization of the methodology for monitoring any application of load gearing.

