

Studie distribuce zatížení evolventního ozubení v převodových ústrojí

Autor: Ing. Ondřej Berka

Školitelé: prof. Ing. Vojtěch Dinybyl, Ph.D., Ing. František Lopot, Ph.D.

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 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 přizpůsobené 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.

V oblasti experimentálních měření je jedním z nejdůležitějších 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_{HB} . 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.**

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:

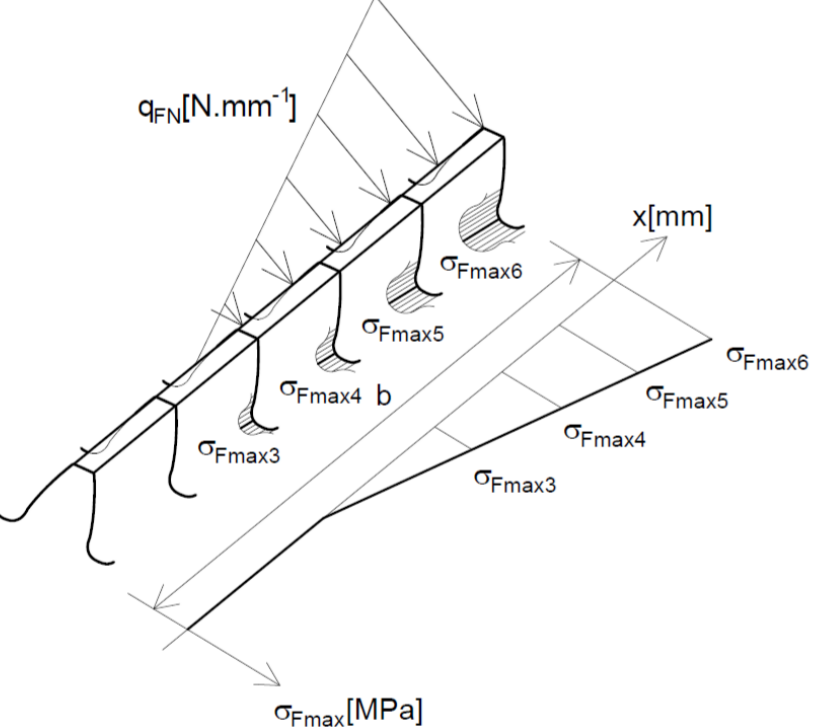
- univerzální použitelnost na ozubená kola čelní i jiná s definovanou vůlí spoluzabírajících zubů,
- dostatečná odolnost proti prostředí a změnám podmínek (mazací médium, teplota),
- instalace s minimálními nebo žádnými zásahy do konstrukce převodovky,
- nezávislost na vnějších zdrojích energie a výpočetní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

Potřeba vzniku kompletní metodiky vzešla z požadavků 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:

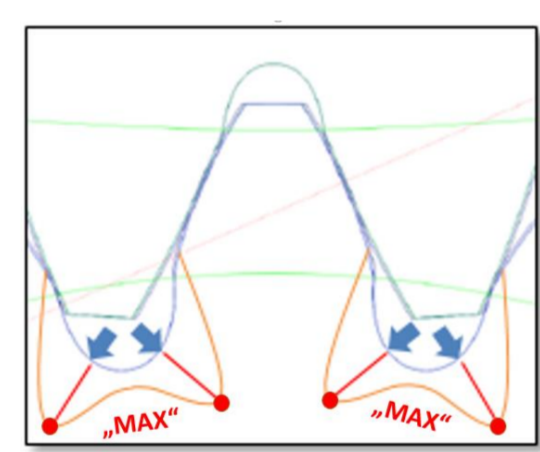
- Návrh experimentální metody využívající tenzometrického měření. Stanovení způsobu instalace tenzometrických snímačů, jejich zapojení, kompenzování vlivů teplotních rozdílů, stanovení parametrů a ochrany před vnějšími vlivy.
- Návrh měřicí aparatury s ohledem na požadované výstupy, počet měřicích kanálů,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

Metody zpracování

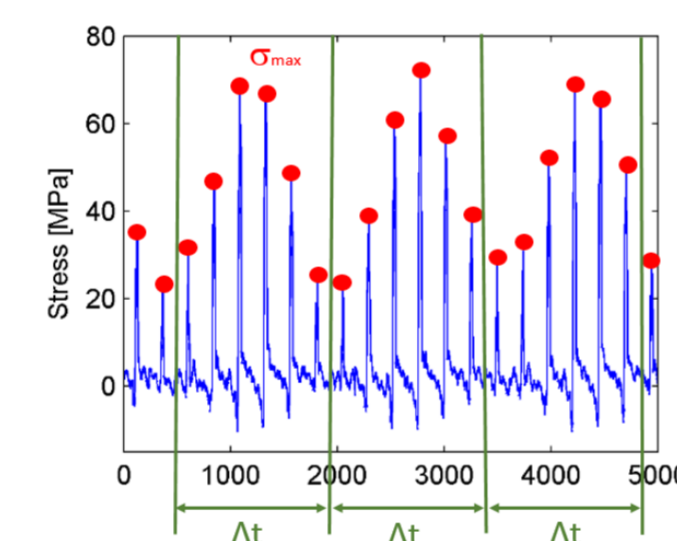
Zásadním krokem celé práce je stanovení postupu návrhu experimentu. Návrh experimentálního měření začíná zadáním problému, které již bylo v tomto případě provedeno včetně úvah nad problematikou a získání základních teoretických východisek pro možnost návrhu. Dále je zapotřebí stanovit konkrétní zobecněné parametry experimentu, které budou splňovat vytyčené požadavky a cíle. Podstata sledování kvality záběru ozubení vychází z provedené studie současného stavu experimentálních metod, kdy jako nevhodnější bylo zvoleno tenzometrické 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 zuby je patrné z obr. 1. Rozložení napětí je při nerovnoměrném zatížení v patě zuby v jednotlivých řezech zubu. Tenzometry, které jsou umístěny po šířce zuby, jsou naměřeny hodnoty rozložení napjatosti.



Obr. 1: Prostorové znázornění rozložení napětí v patě zuby v jednotlivých řezech jeho šířky při nerovnoměrném zatížení



Obr. 2: Distribuce napětí v okolí paty zuby a místo instalace tenzometru



Obr. 3: Maxima záběrových křivek

Koeficient K_{HB} je určen dle vztahu:

$$K_{HB} = \frac{\text{maximální hodnota na šířce zubu}}{\text{průměrná hodnota na šířce zubu}} = \frac{MAX\{\sigma_{AVGj}\}}{\bar{\sigma}_{AVGj}}$$

Pro převodovky, kde je konstrukce upravena tak, aby při změně zatížení dokázala reagovat a upravovat kvalitu záběru, je zajímavým ukazatelem vývoj tohoto s rostoucí zátěží (obr. 6).

Výsledky

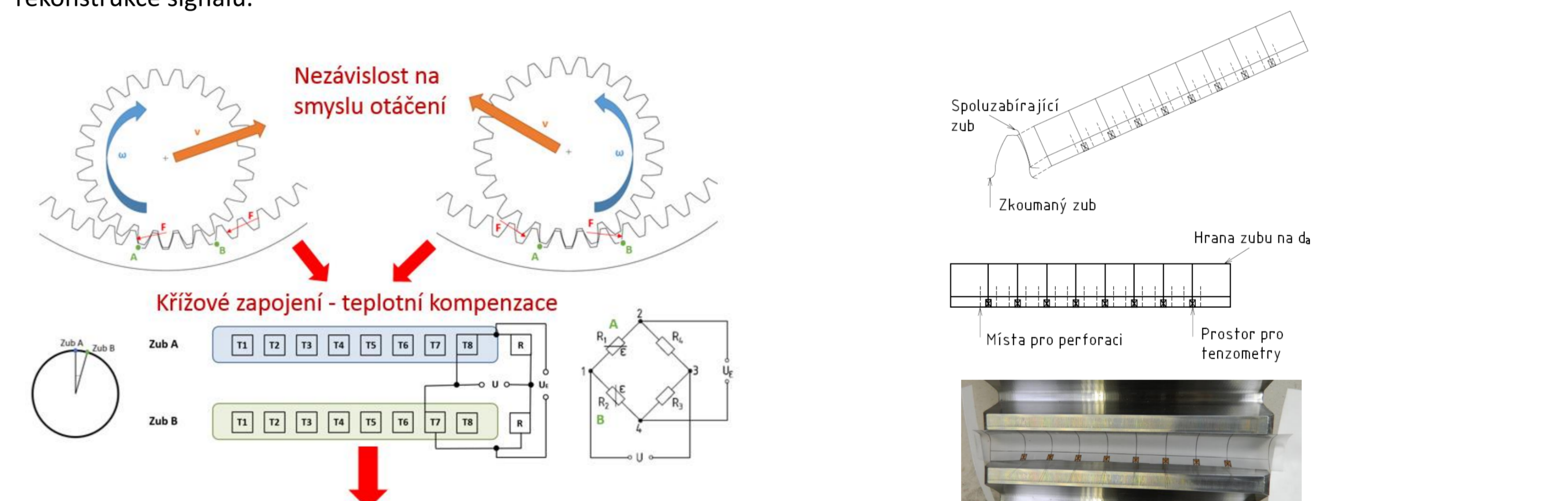
Za účelem verifikace navržené metodiky a dalšího zpřesnění teoretických východisek, byla provedena série měření. Studie zatížení ozubení byla provedena na planetových převodovkách s velkým převáděným výkonem v řádu MW. V rámci experimentální práce byly vyzkoušeny unikátní postupy testování a unikátní 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 měřicích stenech 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 měřicí 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 tenzometru. Robustnost metody při získávání dat je podpořena optimalizovaným křížovým zapojením tenzometru.

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 tenzometru 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_{HB} . Jedná se o hodnotu, která je jednak jedním z nejlepších úkazů správnosti návrhu ozubení, současně však ukazatelem kvality návrhu celého převodového ústrojí.

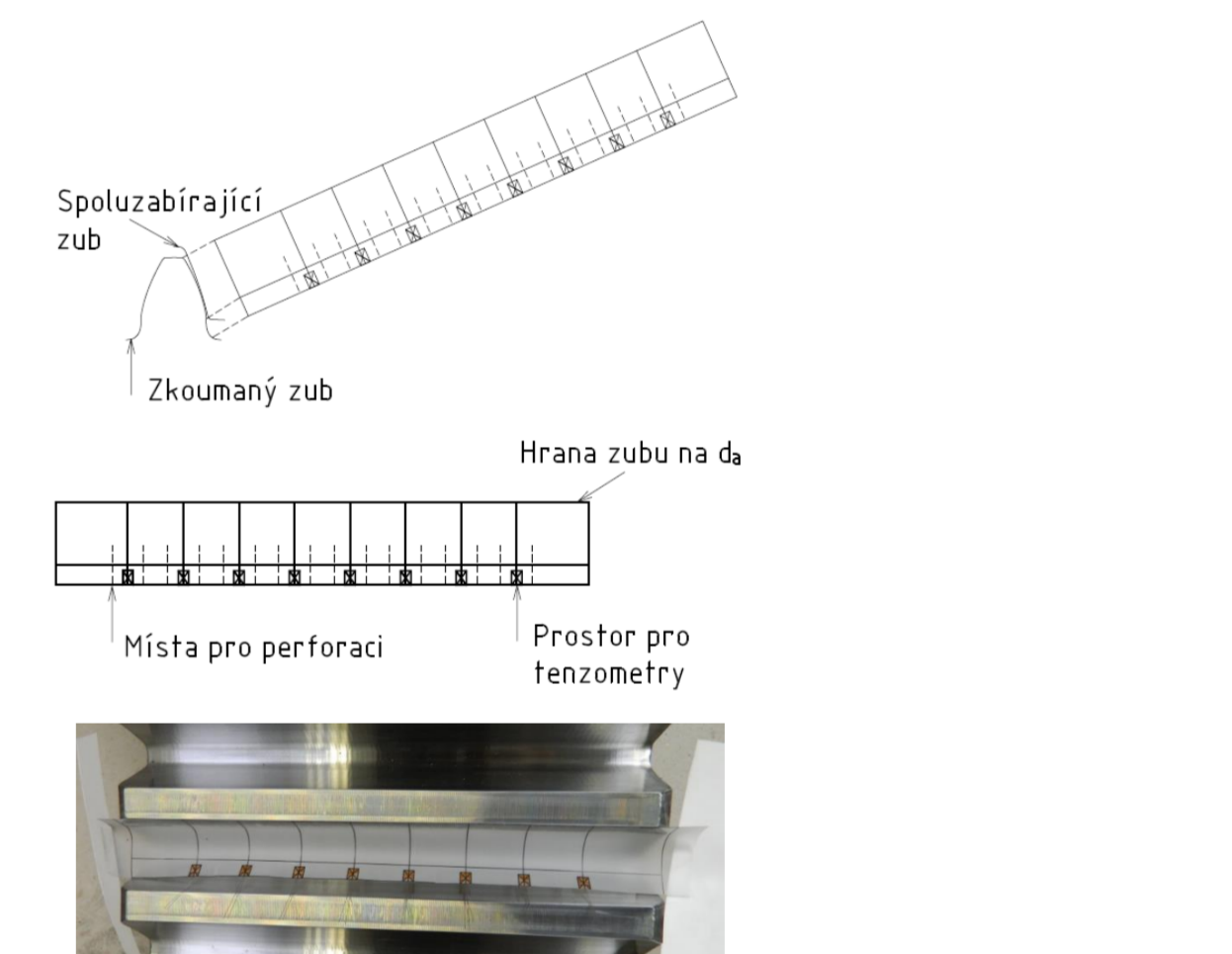
Velikost nejistot byla **značně snížena způsobem instalace tenzometrů použitím předtisknuté instalační folie. Optimalizovaným křížovým zapojením bylo docíleno větší robustnosti metody**, a je tedy **eliminována ztráta dat**. Kvalita záběru může být sledována nepřetržitě a je tedy možné odhalit jevy, ke kterým v převodovém ústrojí dochází na základě změny právě kvality záběru. Současně lze stanovit změnu kvality záběru v návaznosti na změnu zatížení převodovky.

Za účelem dodržení co možná největší přesnosti při umísťování tenzometrů na zub bylo vymyšleno užití tenzometrické instalační folie. Jedná se o samolepicí folii, na kterou je natisknuto pole pro umístění tenzometrů včetně vodičích úsečků pro správné zapojování folie na zubu (obr. 8). Výška folie je dána rozvinutím křivky zubu ve 2D řezu. Místo pro umístění tenzometru je na folii určeno dle odpovídajícího místa na boku zubu. Tenzometrická instalační folie zajišťuje rovnoměrné rozmístění tenzometru po šířce kola, velkou přesnost nalepení tenzometru na stejnou úroveň zubu a velmi snadnou instalaci tenzometru na zub, minimalizuje tak chybu při nalepení tenzometru.

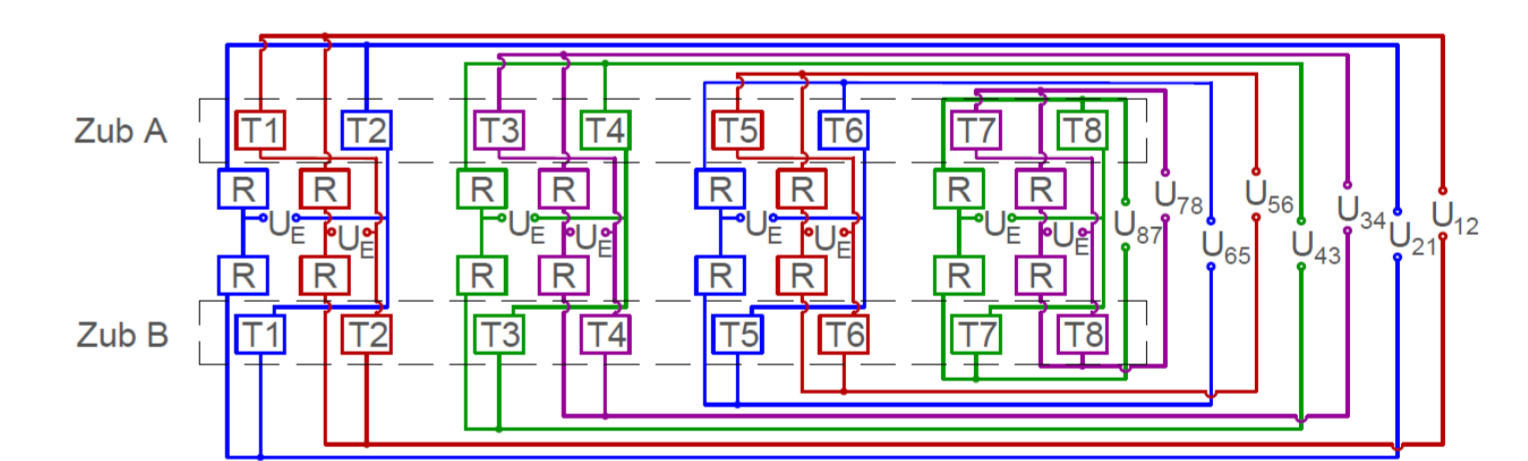
Optimalizované zapojení, umožňuje kompenzaci teploty, měření nezávislé na směru otáčení a navíc pokrývá možnou ztrátu dat z tenzometru. V případě, že dojde ke ztrátě dat z tenzometru je možnost signálů na základě použití algoritmu nahradit. Kompletní optimalizované křížové zapojení je uvedeno na obr. 9. 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 signálů.



Obr. 7: Způsob instalace tenzometrů a jejich zapojení



Obr. 8: Vznik instalační folie, její popis a použití



Obr. 9: Kompletní optimalizované křížové zapojení pro 8 tenzometrů

Závěr

V rámci této práce byl jako klíčový parametr pro sledování kvality záběru ozubení vybrán součinitel nerovnoměrnosti rozložení zatížení zubu K_{HB} . 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 průběžné 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 satelitu.

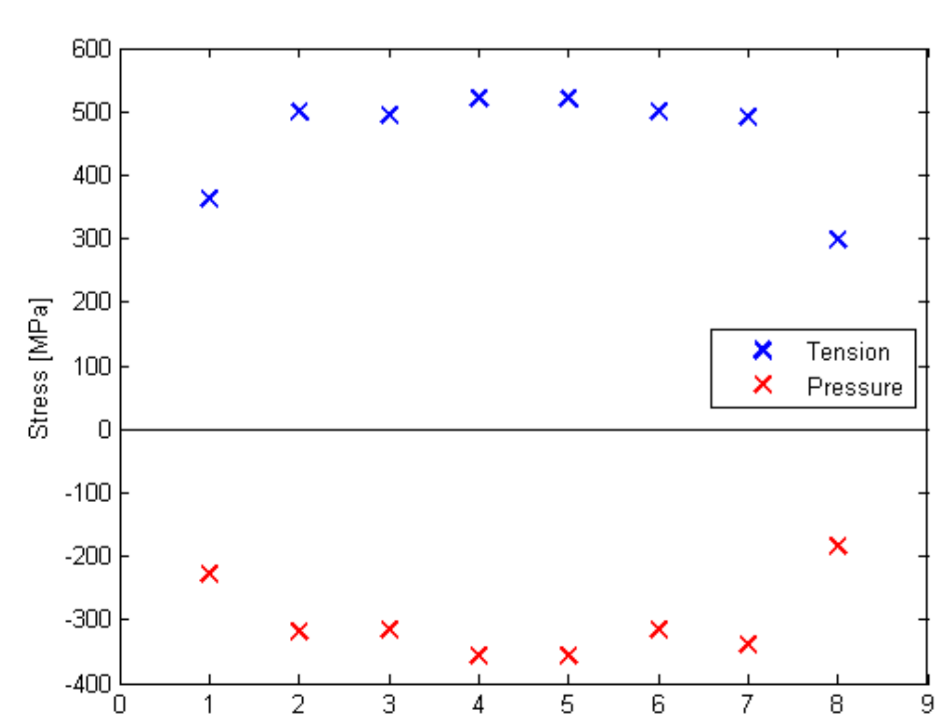
Robustnost metody je zajištěna propracovanou a odzkoušeným **křížovým zapojením tenzometrů**, kdy je navíc kompenzována teplota. Chyba při nepřesnosti nalepení tenzometru je minimalizována použitím **instalační předtisknuté folie**. Velice podstatnými výstupy jsou informace o aktuálním zatížení zubu 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:

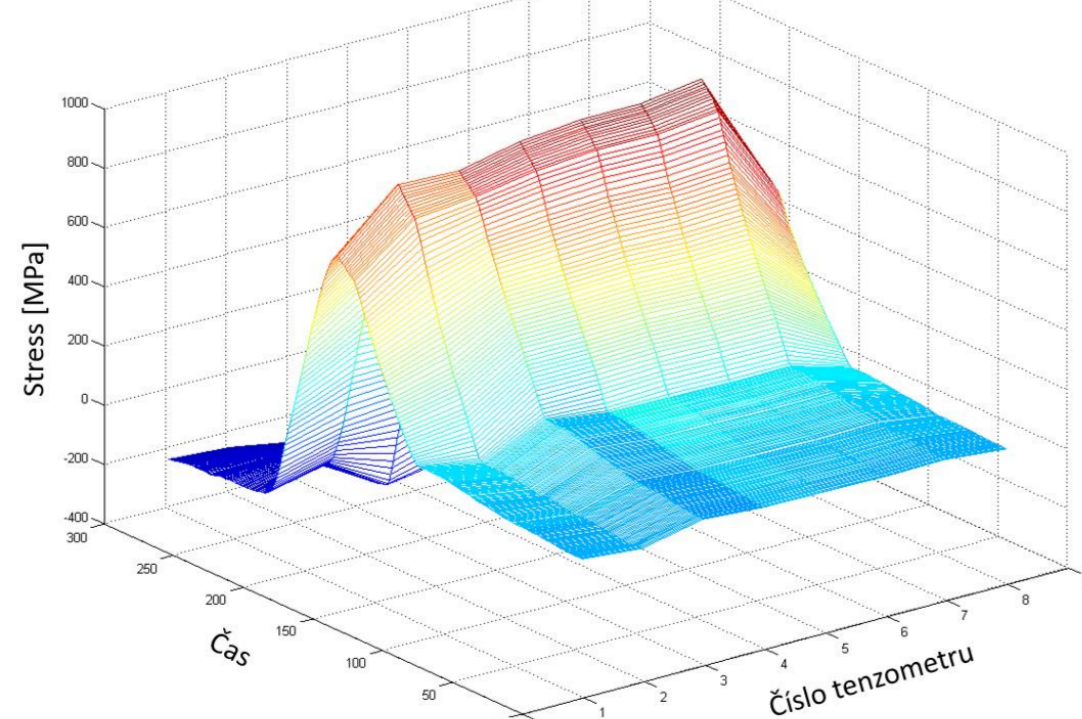
- nalézt a definovat parametr vhodný ke sledování v souvislosti se zaměřením práce a tento teoreticky zdůvodnit,
- navrhnout velmi robustní zapojení tenzometrů, které v dané aplikaci umožní rekonstrukci signálu i v případě dlího poškození instalovaného čidla jako celku,
- zvýšit přesnost lepení tenzometrů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

Publikace autora

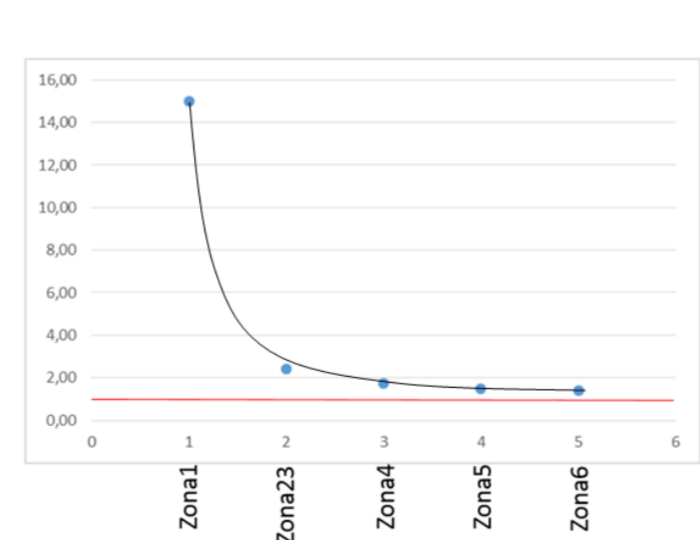
- [A1] Berka, O.: Design of Experiment for Load Gear Solution in Planetary Transmission. 2014.
- [A2] Berka, O., Dub, M., Lopot, F.; aj.: Analysis of satellites loading in planetary transmission. In EAN 2015 - 53rd Conference on Experimental Stress Analysis, 2015, s. 16–19.
- [A3] Berka, O.; Dub, M.; 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.



Obr. 4: Maxima záběrových křivek po šířce zubu



Obr. 5: Zatížení zuby naměřené osmi tenzometry



Obr. 6: Průběh koeficientu K_{HB} v závislosti na měřených fázích