

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ A ČÁSTÍ STROJŮ  
(Konstrukční a procesní inženýrství)

## DISERTAČNÍ PRÁCE

STUDIE DISTRIBUCE ZATÍŽENÍ EVOLVENTNÍHO  
OZUBENÍ V PŘEVODOVÝCH ÚSTROJÍ

**Autor:** Ing. Ondřej Berka

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

**Školitel specialista:** Ing. František Lopot, Ph.D.

Praha, 2016

---

## Poděkování

Rád bych poděkoval svému školiteli panu prof. Ing. Vojtěchu Dynybylovi, Ph.D. a školiteli specialistovi Ing. Františku Lopotovi, Ph.D. za velké množství cenných nápadů, inspiraci a odborné vedení.

Velké díky také patří rodině za trpělivost a celoživotní podporu.



---

## Prohlášení

Prohlašuji, že disertační práci na téma "Studie distribuce zatížení evolventního ozubení v převodových ústrojí" jsem vypracoval samostatně. Použitou literaturu a podkladové materiály uvádím v seznamu použité literatury.

V Praze dne

---

## **Anotace**

Tato disertační práce "Studie distribuce zatížení evolventního ozubení v převodových ústrojích" se zabývá návrhem metodiky pro experimentální monitoring kvality záběru čelních ozubených kol. Práce přináší přehled teorie, kde zdůvodňuje volbu parametru, který bude sledovaný navrhouvanou 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.

## **Annotation**

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.

---

## **Klíčová slova**

Ozubení; Zatížení zubu; Distribuce zatížení; Koeficient nerovnoměrnosti zatížení; Modifikace tvaru zubu; Tenzometrie; Experimentální měření; Měřicí aparatura.

## **Key words**

Gear; Tooth load; Load distribution; Load distributin factor; Tooth profile modification; Tensimetry; Experimental measurement; Measuring apparatus.

# Obsah

<b>Seznam použitého značení a symbolů</b>	<b>10</b>
<b>1 Úvod</b>	<b>12</b>
1.1 Motivace . . . . .	13
<b>2 Přehled problematiky určení zatížení evolventního ozubení a jeho distribuce a problematiky tenzometrie</b>	<b>14</b>
2.1 Ozubený převod čelními koly . . . . .	14
2.1.1 Tvar zubu . . . . .	16
2.1.2 Modifikace ozubení . . . . .	20
2.2 Kinematika a dynamika převodu . . . . .	21
2.2.1 Faktory přímo ovlivňující kinematiku . . . . .	21
2.2.1.1 Úchytky v ozubení . . . . .	21
2.2.1.2 Zubová mezera . . . . .	23
2.2.1.3 Záběrová úsečka . . . . .	25
2.2.1.4 Rychlostní poměry . . . . .	27
2.2.1.5 Doba záběru . . . . .	27
2.2.2 Silové poměry . . . . .	28
2.2.2.1 Pevnostní výpočet na dotyk . . . . .	30
2.2.2.2 Pevnostní výpočet na ohyb . . . . .	31
2.2.2.3 Rozložení napětí v okolí paty zubu . . . . .	34
2.2.2.4 Koeficient nerovnoměrnosti zatížení $K_{H\beta}$ , problematika společného záběru ozubení . . . . .	35

---

2.2.3	Ztráty v ozubení . . . . .	43
2.3	Navrhování ozubení . . . . .	43
2.3.1	Analytický postup návrhu . . . . .	43
2.3.2	Dostupný software pro navrhování ozubení . . . . .	46
2.3.3	Související legislativa a normy . . . . .	46
2.4	Testování kvality záběru, testovací a zobrazovací metody . . . . .	47
2.4.1	Fotoelasticimetrie . . . . .	48
2.4.2	Test ozubení na barvu . . . . .	49
2.4.3	Měření vibrací a hluku . . . . .	50
2.4.4	Tenzometrická měření . . . . .	52
2.5	Tenzometrické měření . . . . .	56
2.5.1	Principy měření . . . . .	56
2.5.2	Zapojení tenzometrů . . . . .	59
2.5.3	Dostupná provedení tenzometrů a jejich aplikace . . . . .	66
2.6	Závěry z výsledků rešerše . . . . .	67
<b>3</b>	<b>Cíle disertační práce</b>	<b>69</b>
<b>4</b>	<b>Návrh experimentálního měření kvality záběru</b>	<b>71</b>
4.1	Návrh tenzometrů . . . . .	73
4.1.1	Volba snímačů . . . . .	74
4.2	Instalace tenzometrů . . . . .	75
4.2.1	Postup lepení . . . . .	76
4.3	Zapojení tenzometrů . . . . .	82
4.3.1	Optimalizace zapojení tenzometrů . . . . .	84
4.4	Měřicí aparatura . . . . .	85
4.4.1	Měřicí ústředny . . . . .	85
4.4.2	Autonomní datalogger . . . . .	87
4.4.3	Nastavení parametrů aparatury . . . . .	90
4.4.4	Zástavba aparatury . . . . .	91
4.4.4.1	Invazivní způsob umístění aparatury . . . . .	92

---

4.4.4.2	Vnější umístění aparatury . . . . .	93
4.4.5	Vodiče a jejich instalace . . . . .	94
4.4.6	Napájení . . . . .	95
<b>5</b>	<b>Provedení experimentů</b>	<b>96</b>
5.1	Měření I . . . . .	96
5.1.1	Účel měření . . . . .	96
5.1.2	Vstupní informace . . . . .	97
5.1.3	Instalace . . . . .	97
5.1.4	Instrumentace . . . . .	98
5.1.5	Protokol měření . . . . .	99
5.1.6	Metodika zpracování a vyhodnocení dat . . . . .	100
5.1.7	Závěr . . . . .	100
5.2	Měření II . . . . .	100
5.2.1	Účel měření . . . . .	100
5.2.2	Vstupní informace . . . . .	101
5.2.3	Instalace . . . . .	101
5.2.4	Instrumentace . . . . .	102
5.2.5	Protokol měření . . . . .	102
5.2.6	Metodika zpracování a vyhodnocení dat . . . . .	103
5.2.7	Závěr . . . . .	103
5.3	Měření III . . . . .	104
5.3.1	Účel měření . . . . .	104
5.3.2	Vstupní informace . . . . .	105
5.3.3	Instalace . . . . .	105
5.3.4	Instrumentace . . . . .	106
5.3.5	Protokol měření . . . . .	107
5.3.6	Metodika zpracování a vyhodnocení dat . . . . .	107
5.3.7	Závěr . . . . .	108
5.4	Shrnutí . . . . .	109

---

<b>6</b>	<b>Zpracování, vyhodnocení a interpretace dat</b>	<b>110</b>
6.1	Vizuální zhodnocení a kvantifikace dat . . . . .	110
6.2	Identifikace dat . . . . .	112
6.2.1	Měření na pastorku a korunovém kole . . . . .	113
6.2.2	Měření na satelitu . . . . .	114
6.2.3	Kompilace dat . . . . .	115
6.3	Přepočítání získaných hodnot . . . . .	115
6.3.1	Srovnání nuly . . . . .	116
6.4	Rozbor naměřených dat a interpretace výsledků . . . . .	116
6.4.1	Posouzení kvality záběru . . . . .	116
6.4.1.1	Výpočet koeficientu nerovnoměrnosti zatížení . . . . .	119
6.4.1.2	Průběh kvality záběru . . . . .	120
6.4.2	Oscilace hodnot záběru . . . . .	122
6.4.3	Průběh křivky záběru . . . . .	124
6.4.4	Rovnoměrnost toku výkonu . . . . .	125
6.4.5	Nejistoty měření . . . . .	126
6.5	Shrnutí . . . . .	130
<b>7</b>	<b>Výstupy práce</b>	<b>132</b>
7.1	Metodika pro průběžné testování kvality záběru . . . . .	132
7.1.1	Východiska, zadání . . . . .	132
7.1.2	Měřicí standy . . . . .	132
7.1.3	Měřicí protokol . . . . .	133
7.1.4	Instalace a instrumentace . . . . .	133
7.1.5	Záznam a zpracování dat . . . . .	134
7.1.6	Vyhodnocení dat . . . . .	135
7.1.7	Chyby metody . . . . .	135
7.1.8	Interpretace výsledků . . . . .	136
7.1.9	Validace výsledků . . . . .	136
7.1.10	Zobecnění metodiky . . . . .	137
7.2	Instalační folie . . . . .	138

---

7.3	Robustní zapojení tenzometrů v zubových mezerách . . . . .	141
<b>8</b>	<b>Závěry práce</b>	<b>144</b>
8.1	Závěr . . . . .	144
8.2	Splnění cílů . . . . .	145
8.3	Otevřenost problematiky . . . . .	147
8.4	Přínos pro vědu a výzkum . . . . .	148
8.5	Přínos pro průmysl - praktické využití . . . . .	148
	<b>Použitá literatura</b>	<b>150</b>
	<b>Publikace autora</b>	<b>153</b>
	Publikace prezentující výsledky disertace . . . . .	153
	Další publikace . . . . .	154
	<b>Seznam obrázků</b>	<b>160</b>
	<b>Seznam tabulek</b>	<b>161</b>
	<b>Příloha A - Výsledky z měření I</b>	<b>I</b>
	<b>Příloha B - Výsledky z měření II</b>	<b>II</b>
	<b>Příloha C - Výsledky z měření III</b>	<b>III</b>



# Seznam použitého značení a symbolů

$a$	[mm]	Osová vzdálenost
$A$	[mm <sup>2</sup> ]	Plocha průřezu vodiče
$\alpha$	[°]	Úhel záběru
$b$	[mm]	Délka dotykové úsečky
$b$	[mm]	Šířka ozubeného kola
$b_w$	[mm]	Pracovní šířka kola
$\beta$	[°]	Úhel sklonu zubů
$c_a$	[mm]	Hlavová vůle
$d_w$	[mm]	Průměr roztečné kružnice
$E$	[N mm <sup>-2</sup> ]	Modul pružnosti v tahu
$\varepsilon_\alpha$	[-]	Součinitel záběru
$\varepsilon$	[-]	Poměrná mechanická deformace
$F_N$	[N]	Nominální síla
$F_t$	[N]	Tečná síla
$F_r$	[N]	Radiální síla
$f_t$	[Hz]	Frekvence záběrů
$f$	[Hz]	Vzorkovací frekvence
$h_0$	[mm]	Výpočtová výška zubu
$i$	[-]	Převodový poměr
$I$	[A]	Elektrický proud
$k$	[-]	k-faktor tenzometru
$K, K_A, K_F, K_H, K_V, K_\beta, K_\alpha$	[-]	Součinitelé přidavných zatížení
$K_\beta$	[-]	Koeficient nerovnoměrnosti zatížení zubu
$l$	[m]	Délka vodiče
$m$	[mm]	Modul
$m_n$	[mm]	Modul normální
$m_t$	[mm]	Modul tečný
$M_K$	[N m]	Krouticí moment
$\mu$	[-]	Poissonovo číslo
$\omega$	[rad s <sup>-1</sup> ]	Úhlová rychlost
$p$	[mm]	Rozteč
$P$	[W]	Výkon

$R, \Delta R$	[ $\Omega$ ]	Elektrický odpor a jeho změna
$r$	[mm]	Poloměr roztečné kružnice
$r_a$	[mm]	Poloměr hlavové kružnice
$r_b$	[mm]	Poloměr základní kružnice
$r_f$	[mm]	Poloměr patní kružnice
$\rho$	[mm]	Poloměr křivosti evolventního boku zubu
$\rho$	[ $\Omega$ m]	Měrný elektrický odpor
$S$	[-]	Součinitel bezpečnosti
$s_v$	[mm]	Výpočtová tloušťka zubu
$\sigma$	[N mm <sup>-2</sup> ]	Napjatost celková
$\sigma_d$	[N mm <sup>-2</sup> ]	Napjatost v tlaku
$\sigma_F$	[N mm <sup>-2</sup> ]	Nominální napětí zubu
$\sigma_H$	[N mm <sup>-2</sup> ]	Napjatost v dotyku
$\sigma_o$	[N mm <sup>-2</sup> ]	Napjatost v ohybu
$t$	[s]	Doba záběru
$T$	[°C]	Teplota
$U$	[V]	Výstupní elektrické napětí můstku
$U_b$	[V]	Napájecí napětí
$u_{zA}$	[%]	Standardní nejistota typu A
$u_{zB}$	[%]	Standardní nejistota typu B
$u_y$	[%]	Celková nejistota
$v$	[mm s <sup>-1</sup> ]	Absolutní rychlost
$v_n$	[mm s <sup>-1</sup> ]	Normálová rychlost
$v_t$	[mm s <sup>-1</sup> ]	Tečná rychlost
$w$	[N mm <sup>-1</sup> ]	Poměrná síla na šířku zubu
$Y, Z$	[-]	Přídavný součinitelé
$z$	[-]	Počet zubů

# Kapitola 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 kvalita záběru rozhodující a má přímý dopad na účinnost. Stroje jsou často navrhovány a konstruovány na dolní hodnotě bezpečnosti. Důvodem je ekonomické hledisko a snížení hmotnosti. Ovšem ani v takovém případě nesmí dojít k poruše zařízení. Jakékoliv zlepšení kvality záběru, které vede ke zlepšení účinnosti, je pro převodovky s takovým výkonem významné a vede ke značnému zlepšení výstupních parametrů.

Rozhodující faktor pro posouzení soukolí z hlediska jeho chodu, únosnosti, životnosti, hlučnosti apod. je **kvalita záběru**. Kvalita záběru je ovlivněna řadou parametrů od požadavků návrhu po detailní geometrické charakteristiky ozubení. Důležitým faktorem je také vztah mezi převáděným výkonem a provedením převodovky - do kvality záběru promlouvá i deformační charakteristika skříně, hřídele a dalších komponent. 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. Umístění měřicí aparatury vně ústrojí skýtá celou řadu omezujících podmínek. Měřicí

aparatura přitom nesmí nijak ovlivnit ani narušit fungování stroje.

## 1.1 Motivace

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. Jedná se o vytyčení postupu sledování kvality převodových ústrojí v těžkém průmyslu, větších rozměrů a celkově velkého přenášeného výkonu v řádech MW. Za tímto účelem je navrhována metodika pro testování těchto převodových ústrojí podle stanovených kritérií, která bude produkovat data zpětně uplatnitelná v návrhu ozubení.

## Kapitola 2

# Přehled problematiky určení zatížení evolventního ozubení a jeho distribuce a problematiky tenzometrie

Jelikož dochází ke zdokonalování technologií a výpočetních prostředků, nese sebou tento pokrok zvyšující se nároky na produkty tak, aby byly takřka ideální. V oblasti výroby převodových ústrojí se práce zaměřuje na ozubená kola. Zatížení ozubeného kola je zde zkoumáno v souvislosti s jeho geometrií. Dalšími faktory jsou materiálové vlastnosti, které mají vliv zejména na životnost ozubení. Současným cílem je zvýšení nebo zachování únosnosti ozubení při zachování nebo snížení hmotnosti (velikosti) ozubeného kola [21]. Následující text přináší přehled informací k tématu geometrii zubu a ozubení, kinematiky spoluzabírajících kol a teorii zatěžování ozubení.

### 2.1 Ozubený převod čelními koly

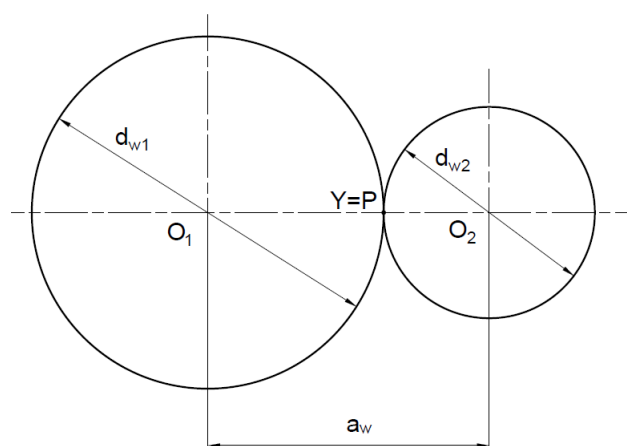
Kinematickou vazbou mezi dvěma středy otáčení  $O_1$  a  $O_2$  je možné obecně vytvořit záběrem dvou vhodně tvarovaných profilů dle obr. 2.1. Tyto zatím zcela obecné profily mají společný bod  $Y$ , ve kterém mají společnou normálu a tečnu. Základní zákon ozubení vychází z požadavků stálého přenosu záběru a vyjadřuje závislost mezi geometrickými parametry spoluzabírajících profilů v bodě dotyku a okamžitým převodovým poměrem  $i$ . Podmínka stálého záběru je vyjá-

dřena rovnicí pro normálovou složku rychlostí

$$v_{n1} = v_{n2} = v_n. \quad (2.1)$$

Po úpravě tohoto vztahu dle [28] je získána rovnice

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{d_{w2}}{d_{w1}}. \quad (2.2)$$



Obr. 2.1: Geometrie převodu - upraveno z [28]

Průsečík společné normály je označen jako pól pohybu  $P$ . Pro plynulý záběr dvou profilů je tedy dle základního zákona ozubení nezbytné, aby společná normála v bodě jejich dotyku procházela v každém okamžiku právě pólem  $P$ .

Z rozkladu absolutních rychlostí  $v$  do společné normály a tečny je patrné, že při dodržení základního zákona ozubení, jsou tečné složky různé. Mezi profily tak nastává vzájemný pohyb, který je charakterizován kluznou rychlostí dle [28]

$$v_k = v_{t1} - v_{t2}. \quad (2.3)$$

Je tedy zapotřebí navrhnout takový profil, který bude skluzovou rychlost minimalizovat. Ta je nulová v případě, že pól pohybu je shodný s bodem  $Y$  [28]. Jako jeden z nejvhodnějších profilů pro tuto podmínku je evolventní tvar profilu zubu.

Skutečnost, že je záběr realizován dvojicí evolventních profilů, nutí k rovnoměrnému rozmístění těchto profilů po obvodu valivé kružnice. Rozteč těchto profilů je označována jako  $p$ . To vede ke vzniku rovinného ozubeného kola. Jelikož obvod valivé kružnice musí být celistvým násobkem zvolené rozteče  $p$ , kde je tento násobek zastoupen počtem zubů  $z$ , označuje se tato kružnice taky jako kružnice roztečná. Průměr valivé kružnice není tedy libovolný ale je vázán vztahem

$$\pi \cdot d_w = z \cdot p. \quad (2.4)$$

Aby bylo vyhověno těmto podmínkám, je rozteč určena jako konečný násobek  $\pi$  dle vztahu dle [28]

$$p = m \cdot \pi \quad (2.5)$$

a průměr roztečné kružnice poté vztahem

$$d_w = m \cdot z, \quad (2.6)$$

kde modul  $m$  lze chápat jako úsečku, jako  $z$ -tý díl průměru  $d_w$ . Modul  $m$  je základní parametr, ovládající prakticky všechny rozměry ozubeného kola a získává se zpravidla jako výsledek pevnostních výpočtů.

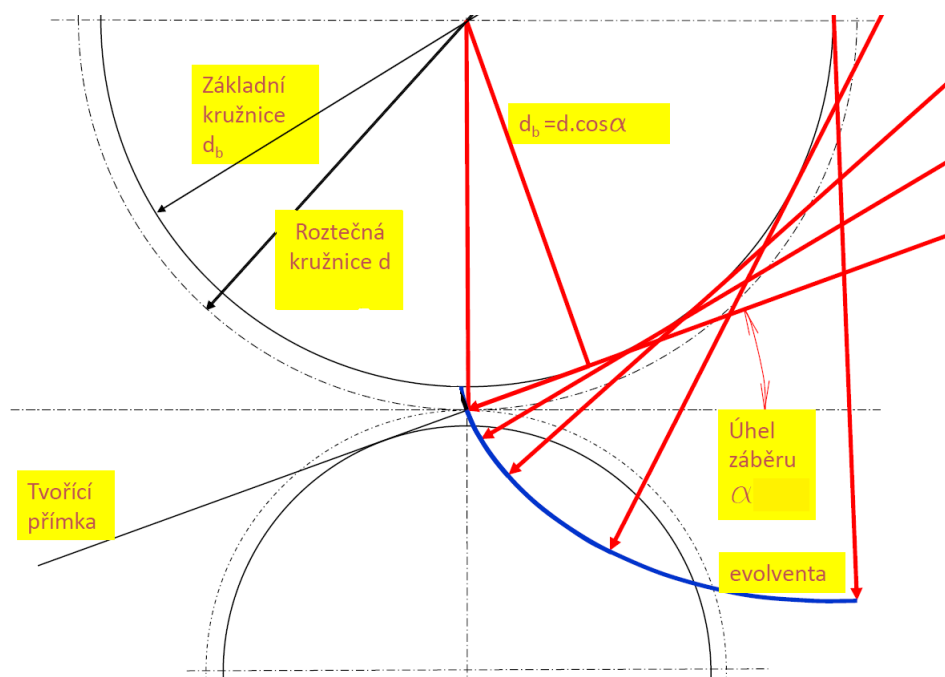
### 2.1.1 Tvar zubu

O kvalitě ozubených převodů se největší měrou rozhoduje při jejich geometrickém návrhu. D nedávna se z důvodu dostupných možností nedalo hovořit v žádném případě o optimálním

návrhu. Nyní však ku prospěchu kvality návrhu soukolí hrají hlavní roli speciální programy pro návrh ozubených kol. [17]

Geometrie zubu má přímý vliv na jeho pevnost. Samotná velikost zubu se přímo podílí na hodnotě napjatosti. Druhou veličinou je tvar zubu, který ovlivňuje rozložení napjatosti a to jak po profilu zubu v průřezu, tak po jeho délce.

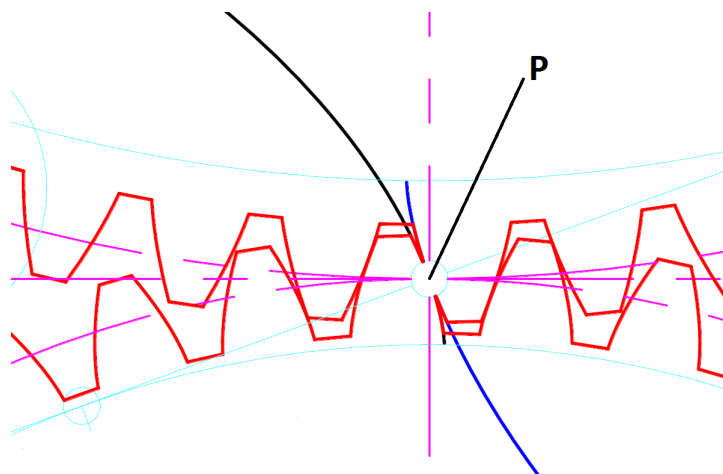
Nejčastěji používaným typem je evolventní ozubení. Evolventa je křivka, kterou opíše bod tvořící přímky při odvalování této přímky po základní kružnici (obr. 2.2).



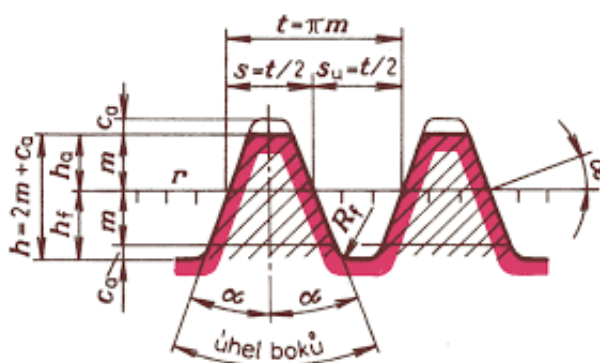
Obr. 2.2: Vznik evolventy - upraveno z [28]

Část této křivky poté tvoří bok zubu, jak je patrné z obr. 2.3. Tvar zubu je určen základním profilem v normální rovině na obr. 2.4. Přímka, která svým odvalováním vytváří evolventu, je bok základního profilu. Je však důležité si uvědomit, že každý zub má svou šířku. Tím se problematika ozubení stává komplikovanou zejména pak s ohledem na kvalitu záběru ozubení. Proto se za účelem kompenzace deformace komponent převodovky a výrobních nepřesností provádějí modifikace, které zlepšují kvalitu záběru.





Obr. 2.3: Charakteristika evolventního ozubení - geometrie zubu v normální rovině - upraveno z [28]

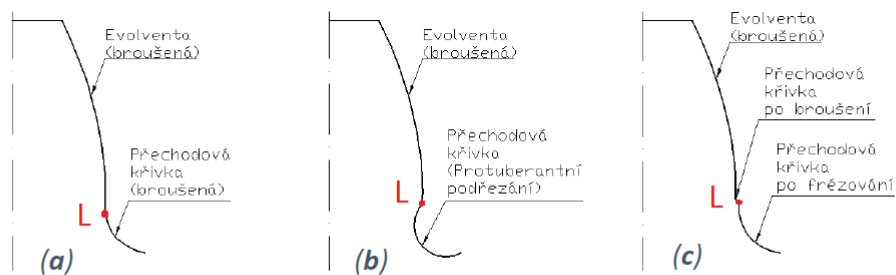


Obr. 2.4: Základní profil ozubeného hřebene [27]

Znalost geometrie ozubení je nutná pro určení zatížení zubu a pro některé kroky, které jsou prováděny při následném návrhu experimentu. Jedná se o znalost rozměrů zubu a tvaru zubu. Nejdůležitějšími parametry pro charakteristiku tvaru zubu jsou modul a úhel záběru. Tvar zubu je možno ještě měnit pomocí výškové korekce, kdy dochází k posunutí profilu [16].

Zub se skládá z evolventní plochy ozubení a patního válce. Místo mezi těmito plochami se nazývá patní přechod. Plocha patního přechodu je důležitým místem ozubení, protože do značné míry určuje jeho ohybovou pevnost. Možné tvary patního přechodu jsou uvedeny na obr. 2.5, kde bod L je rozhraní mezi evolventou a přechodovou křivkou.

Tvar zubu, respektive geometrie paty zubu má přímý podíl na rozložení napjatosti v okolí paty a přechodové křivky. Přechodová křivka a její typ velmi často rozhoduje o únosnosti ozubení. Nejběžnější tvary patních přechodů pro evolventní přechodové křivky jsou zobrazeny na obr.2.5. Moderní trendy popisují i další typy křivek, které je možné vytvořit díky novým výrobním metodám, které ztrácejí některé výrobní limity. Geometrii tvaru zubu lze měnit nejen výše zmíněnou korekcí, ale také provádět tzv. modifikace. Jedná se o modifikace za účelem zlepšení styku zubů dvou kol, z čehož vyplyne snížení vibrací v ozubení a tím pádem i hlučnosti a zvýšení pevnosti zubu.

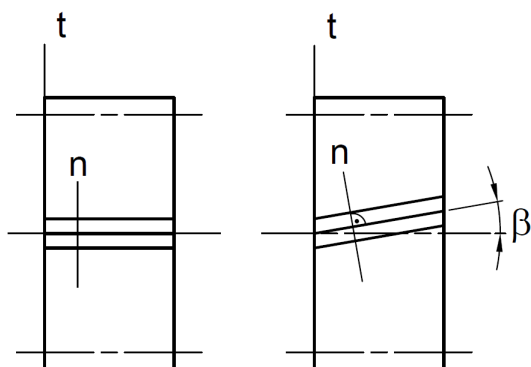


Varianty geometrie tvaru paty zubu. (a) Broušený celý zub; (b) Zub s protuberantním podřezáním; (c) Zub s vrubem po broušení

Obr. 2.5: Tvar patního přechodu [21]

Výše uvedené popisy geometrie zubu se vztahují na tvar zubu v normální rovině. Ve skutečnosti se jedná o prostorovou problematiku, kde kola mají svou šířku. Čelní evolventní ozubení je rozděleno na dva případy, jedná se o kola s přímými zuby a o kola se šikmými zuby. Geometrie je pro oba typy kol posuzována vždy v základní normálové rovině  $n$ , ta je vždy kolmá na zub dle obr. 2.6. Pro šikmé ozubení je úhel mezi osou kola a normálovou rovinou označován jako úhle sklonu zubu  $\beta$ . Na základě zkoumání ozubení ve dvou rovinách jsou rozlišovány dva typy modulů. Jedná se modul tečný  $m_t$  a modul normální  $m_n$ , které jsou v následujícím poměru

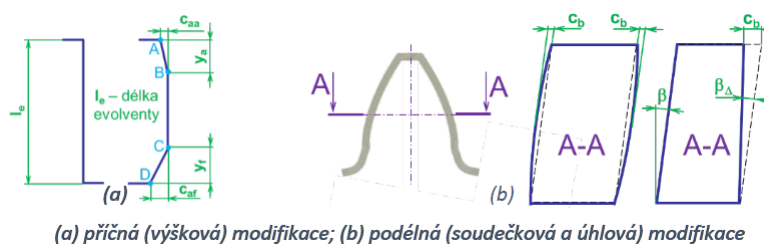
$$\frac{m_n}{m_t} = \cos \beta. \quad (2.7)$$



Obr. 2.6: Normálová rovina (n) a tečná rovina (t) pro přímé (vlevo) a pro šikmé ozubení (vpravo) - upraveno z [28]

### 2.1.2 Modifikace ozubení

Výrobní a provozní odchylky jsou zdrojem vibrací, které způsobují hluk ozubeného převodu, a zároveň snižují únosnost ozubení, zvláště pak v dotyku, tudíž je třeba snížit směrem k těmto místům zatížení. Výrobní a provozní odchylky lze do značné míry úspěšně eliminovat úmyslnou změnou teoretického tvaru boku zubu. Takové změny jsou nazývány modifikacemi ozubení. Jedná se o výškové modifikace (změna tvaru evolventy) a podélné modifikace (změna tvaru boční křivky). Podélná modifikace se dále dělí na modifikaci soudečkovou a úhlovou (obr. 2.7). Modifikací jsou kompenzovány faktory deformací komponent, nepřesností výroby a montáže, teplotními deformacemi a deformací ozubení při jejich tepelném zpracování.[17]



Obr. 2.7: Modifikace ozubení [21]

Jedním z velice důležitých aspektů pro zlepšení záběru (chodu) ozubení a snížení poruchovosti je vhodný návrh modifikací boku zubu na základě výpočtu deformací a napětí v převodové skříní, hřídelích a při samotném záběru ozubení. Díky modifikacím dochází ke zvýšení životnosti a

snížení hluku převodovky. [21]

Modifikace mají přímý vliv na kvalitu záběru respektive i nerovnoměrnost zatížení zubu po jeho délce. S využitím některého výpočetní softwaru, pro příklad je uveden program KISSsoft, nebo při vhodných analytických výpočtech je možno příčiny nedokonalosti predikovat a tedy modifikace při návrhu stanovit. Způsoby jsou uvedeny v [2],[14], [11]. Jedná se o zohlednění předpokládaných deformací jednotlivých dílů a skříně a výrobních úchylek. Na základě těchto předpokladů je vytvořen výpočtový model, který stanoví hodnotu nerovnoměrnosti zatížení zubu a následně také potřebné modifikace za účelem zlepšení kvality záběru. Jako parametr je pro hodnocení využíván součinitel  $K_{HB}$ , jeho rozbohem se detailně zabývá kapitola 2.2.2.4.

## 2.2 Kinematika a dynamika převodu

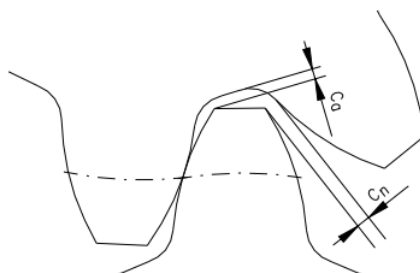
Aby bylo možné vysvětlit výše uvedené, je třeba detailně prostudovat a porozumět kinematickým poměrům, geometrii a silovým poměrům v převodu.

### 2.2.1 Faktory přímo ovlivňující kinematiku

Hlavní důraz je v této kapitole kladen na výčet úchylek v ozubení a je zde proveden detailní rozbor zubové mezery za účelem prostorových možností instalace tenzometrů a rozbor doby záběru za účelem nastavení vzorkovací frekvence aparatury.

#### 2.2.1.1 Úchylky v ozubení

Geometrie převodu je určena provozní polohou ozubených kol a jednotlivých zubů, která se liší od teoretických předpokladů. Zuby se smějí dotýkat pouze ve směru záběru, proto je nezbytné aby byla v ozubení boční a čelní vůle dle obr. 2.8.



Obr. 2.8: Čelní a boční vůle [20]

Odchyly od teoretické polohy ozubených kola a od teoretického tvaru a jmenovitých rozměrů ozubení se dělí na odchyly výrobní a provozní. Odchyly výrobní vznikají při výrobě a jsou podmíněny nepřesností výroby, představují je úchyly od požadovaného tvaru ozubení a úchyly rovnoběžnosti os otáčení kol. Odchyly provozní vznikají při provozním zatížení ozubeného soukolí a jsou způsobeny deformacemi zubů, těles ozubených kol, hřídelů, ložisek a těles skříní a také vůlemi v ložiscích. Mezi výrobní úchyly patří dle [28]:

- úchylka čelní rozteče  $f_{pt}$
- úchylka profilu  $F_{\alpha}$
- úchylka tvaru profilu  $f_{f\alpha}$
- úchylka úhlu profilu  $f_{H\alpha}$
- úchylka sklonu zubů  $F_{\beta}$
- úchylka tvaru sklonu zubu  $f_{f\beta}$
- úchylka úhlu sklonu zubu  $f_{H\beta}$

Úchyly čelní rozteče a úchyly profilu patří mezi zdroje vnitřních dynamických jevů v ozubení a ovlivňují velikost jeho vibrací a hluku, velikost vnitřních dynamických sil i kvalitu rozložení mezi páry spoluzabírajících zubů. Úchyly sklonu zubů způsobují nerovnoměrnost rozložení zatížení po šířce ozubení. Nerovnoměrnost má poté největší vliv na únosnost ozubení.[17]

Provozní odchylky lze rozdělit následujícím způsobem:

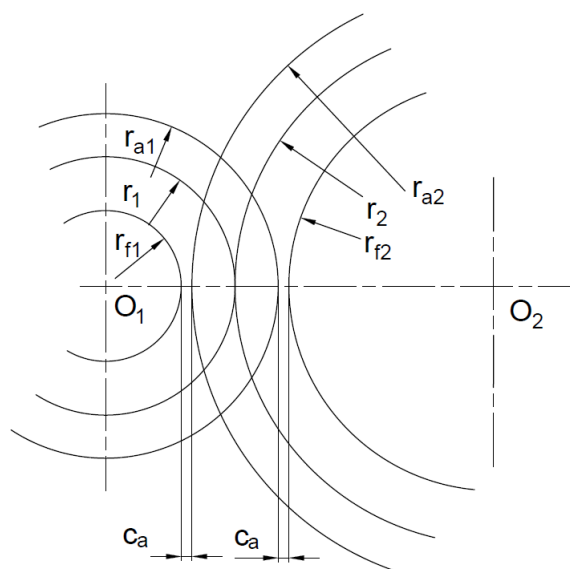
deformační úchylky:

- vnitřní:  $\delta$ 
  - ozubení  $\delta$
- vnější:  $F_{H\beta}^d$ 
  - hřídele - ohyb  $f_{bh}$
  - těles kola - ohyb  $f_{bk}$
  - těles kola - krut  $f_{tk}$
  - ložisek (včetně vůle)  $f_{be}$
  - tělesa skříně  $f_{ca}$

Souhrnná vnější deformační úchylka  $F_{H\beta}^d$  způsobí, že spoluzabírající zuby pod zatížením budou mít nerovnoměrné rozložení zatížení podél boku zubu. [17]

### 2.2.1.2 Zubová mezera

Pro tuto práci je zásadní stanovit vůli mezi zuby při záběru kol, kvůli prostoru pro instalaci tenzometrů a jejich vodičů. Tato vůle je dána prostorem mezi patní částí zubu jednoho kola a hlavovou částí zubu kola spoluzabírajícího, čili zubovou mezerou. Určení tohoto prostoru je pro nekorigované ozubení poměrně jednoduché a vychází ze základních rozměrů ozubení. V literatuře je tento prostor označován jako hlavová vůle  $c_a$ , při určení je vycházeno ze schématu na obr. 2.9.



Obr. 2.9: Schéma pro výpočet hlavové vůle

Pro šikmé ozubení jsou rozměry jednotlivých kružnic následující. Roztečná kružnice  $d = z \cdot m_t$  hlavová kružnice  $d_a = z \cdot m_t + 2 \cdot m_n$ , patní kružnice  $d_f = z \cdot m_t - 2,5 \cdot m_n$ , kde  $z$  je počet zubů  $m_t$  je čelní modul a  $m_n$  je normální modul. Vzdálenost středů kol je dána součtem poloměrů roztečných kružnic

$$\overline{O_1O_2} = r_1 + r_2. \quad (2.8)$$

Vzdálenost středů kol je také dána součtem poloměru hlavové kružnice kola "1", poloměru patní kružnice kola "2" a patní vůle

$$\overline{O_1O_2} = r_{a1} + r_{f2} + c_a. \quad (2.9)$$

Sloučením vzorců 2.8 a 2.9 je získán vztah pro určení patní vůle

$$c_a = r_1 + r_2 - r_{a1} - r_{f2}, \quad (2.10)$$

po dosazení

$$c_a = \frac{z_1 \cdot m_t}{2} + \frac{z_2 \cdot m_t}{2} - \frac{z_1 \cdot m_t + 2 \cdot m_n}{2} - \frac{z_2 \cdot m_t - 2,5 \cdot m_n}{2} \quad (2.11)$$

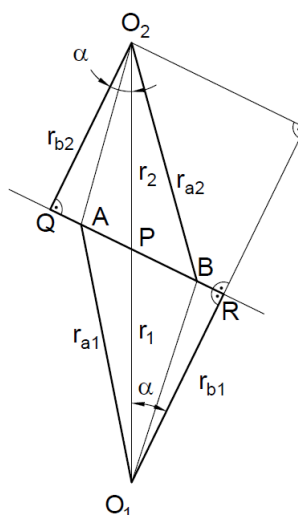
a po úpravě

$$c_a = 0,25 \cdot m_n. \quad (2.12)$$

Pro nekorigované ozubení je tedy prostor pro umístění tenzometrů dán hlavovou vřlí 2.12.

### 2.2.1.3 Záběrová úsečka

Dalším důležitým krokem při návrhu této metodiky je určení doby záběru sledovaného zubu. Za tímto účelem musí být nejdříve stanovena délka záběrové úsečky. Libovolný záběrový bod evolventy zubu se pohybuje po společné přímce, tzv. přímce záběru (obr. 2.2). Reálný záběr je časově i prostorově omezen a je tak definována záběrová úsečka dle obr. 2.10. Dráha je určena na základě schématu na obr. 2.10. Jedná se o výpočet nekorigovaného šikmého ozubení. Délka záběru je rovna velikosti úsečky  $\overline{AB}$ .



Obr. 2.10: Schéma pro určení délky záběru - upraveno z [4]



Velikost úsečky je dána vztahem

$$\overline{AB} = \overline{AP} + \overline{PB}. \quad (2.13)$$

Pro určení dílčích úseček je vycházeno z trojúhelníků  $ARO_1$   $BQO_2$ .

$$\overline{AO_1}^2 = \overline{RO_1}^2 + (\overline{AP} + \overline{PR})^2 \quad (2.14)$$

$$\overline{BO_2}^2 = \overline{QO_2}^2 + (\overline{PB} + \overline{PQ})^2 \quad (2.15)$$

Jednotlivým úsečkám jsou přiřazeny hodnoty poloměrů kružnic definující ozubení včetně využití goniometrické funkce je získán tvar

$$r_{a1}^2 = r_{b1}^2 + (\overline{AP} + r_1 \cdot \sin\alpha)^2 \quad (2.16)$$

$$r_{a2}^2 = r_{b2}^2 + (\overline{PB} + r_2 \cdot \sin\alpha)^2, \quad (2.17)$$

po úpravě

$$\overline{AP} = \sqrt{r_{a1}^2 - r_{b1}^2} - r_1 \cdot \sin\alpha \quad (2.18)$$

$$\overline{PB} = \sqrt{r_{a2}^2 - r_{b2}^2} - r_2 \cdot \sin\alpha. \quad (2.19)$$

Dosazením rovnic 2.18 a 2.19 do 2.13 je získána velikost záběrové úsečky

$$\begin{aligned}
 \overline{AB} &= \sqrt{r_{a1}^2 - r_{b1}^2} + \sqrt{r_{a2}^2 - r_{b2}^2} - (r_1 + r_2) \cdot \sin\alpha = \\
 &= \sqrt{\left(\frac{z_1 \cdot m_t + 2 \cdot m_n}{2}\right)^2 - \left(\frac{z_1 \cdot m_t \cdot \cos(\alpha)}{2}\right)^2} + \\
 &+ \sqrt{\left(\frac{z_2 \cdot m_t + 2 \cdot m_n}{2}\right)^2 - \left(\frac{z_2 \cdot m_t \cdot \cos(\alpha)}{2}\right)^2} - \\
 &- (z_1 \cdot m_t + z_2 \cdot m_t) \cdot \sin\alpha.
 \end{aligned} \tag{2.20}$$

Pro určení doby záběru resp. dráhy záběru pouze pro jeden zub není zapotřebí určovat součinitele záběru. Postačující je určení dráhy záběru, která je přiřazena jednomu konkrétnímu zubu.

#### 2.2.1.4 Rychlostní poměry

V návaznosti na předchozí kapitolu musí být pro stanovení doby záběru určena rychlost záběru konkrétního sledovaného zubu. Bod na záběrové úsečce se obecně pohybuje rychlostí  $v$ , směr této rychlosti je kolmý na průvodič od středu kola  $O$ . Rychlost  $v$  se rozkládá na dvě kolmé složky  $v_t$  a  $v_n$ . Rychlost  $v_t$  je kolmá na záběrovou přímku a leží tedy na společné tečně profilů. Ve směru normály působí normálová rychlost  $v_n$ . Aby zuby zůstávaly v dotyku, musí být normálová rychlost pro obě kola stejná ( $v_{n1} = v_{n2} = v_n$ ). Rovnice pro výpočet normálové rychlosti dle [25] má tvar

$$v_n = r_{b1} \cdot \omega_1 = -r_{b2} \cdot \omega_2. \tag{2.21}$$

#### 2.2.1.5 Doba záběru

Určení délky záběru je důležité z hlediska určení nutné doby pro snímání zatížení snímaného zubu.

Doba záběru jednoho zubu je s odkazem na kapitoly 2.2.1.3 a 2.2.1.4 jednoduše vyjádřena

vzorcem

$$t = \frac{\overline{AB}}{v_n} \quad (2.22)$$

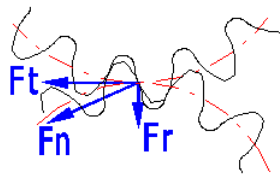
a po dosazení 2.20 a 2.21

$$t = \frac{1}{r_{b1} \cdot \omega_1} \cdot \left( \sqrt{r_{a1}^2 - r_{b1}^2} + \sqrt{r_{a2}^2 - r_{b2}^2} - (r_1 + r_2) \cdot \sin\alpha \right). \quad (2.23)$$

### 2.2.2 Silové poměry

Znalost zatížení ozubení slouží v této práci k výběru typu tenzometrů, k určení místa jejich instalace, k nastavení parametrů elektroniky a k validaci naměřených hodnot.

Krouticí moment přiváděný na hnací hřídel kola ve formě silové dvojice se v záběrové oblasti realizuje jako síla na rameni za vzniku doplňkové síly, která je zachytávána v ložiscích. Při zanedbání třecích sil v místě dotyku zubů lze vzájemné působení ozubených kol vyjádřit pomocí osamělé síly  $F_N$  [28].



Obr. 2.11: Rovinný model silových poměrů v ozubení [15]

Vnější silové namáhání krouticím momentem má za následek přenášení zatížení na hřídele, reakcí do ložisek a dále do skříně převodovky. To vede ke vzniku deformace těchto komponent.

Pro názornost je uveden rozbor pro přímé ozubení. Vnitřní silový poměr je tvořen tokem nominální síly  $F_N$  do ozubení. Tato síla má za následek silové namáhání zubu na dotyk a na ohyb.

Teoretických rozbor silových poměrů ozubených kol vychází z předpokladu přímé úměry mezi vnějším momentem a obvodovou silou, rovnoměrného zatížení po šířce, neuvažuje hmotnost, poddajnost, záběr více zubů, výrobní a montážní nepřesnosti atd. Reálné ozubení ovšem všechny tyto fenomény obsahuje. Podobně jako v případě tvaru zubu, i zde je nutno zdůraznit, že se jedná o prostorový problém.

Skutečné silové poměry, které jsou rozhodující pro namáhání zubů, jsou jiné než teoretické. Pro praktické výpočty je účelné vycházet ze silových poměrů teoretických a jmenované vlivy zahrnout do vhodných součinitelů dle příslušných norem. Reálná zatížení jsou vždy větší než teoretická, a proto se mluví o přídatných zatíženích. Tato zatížení se dělí do třech skupin. Jedná se o vnější přídatná dynamická zatížení (součinitel  $K_A$ ), vnitřní přídatná dynamická zatížení (součinitel  $K_V$ ) nerovnoměrnost zatížení po šířce zubu (součinitel  $K_\beta$ ) a nerovnoměrnost zatížení jednotlivých párů (součinitel  $K_\alpha$ ) [28].

Vnější přídatná dynamická zatížení zahrnují dynamické jevy ve strojním celku. Jejich zdroj je mimo vlastní ozubení. Může se jednat například o nerovnoměrnosti chodu motoru a pracovního stroje, různé vibrace apod. Vnitřní přídatná dynamická zatížení vznikají přímo uvnitř ozubení a jsou způsobena jeho poddajností a nepřesnostmi zubů. Podobně jako nerovnoměrnost zatížení jednotlivých párů, která je také způsobena deformacemi a nepřesnostmi zubů. Zatímco nerovnoměrnost zatížení po šířce zubu je navíc způsobena deformacemi ozubených kol, hřídelů, ložisek a skříně a výrobními úchyly. Celkový součinitel přídatných zatížení  $K$ , který zahrnuje všechna vnější zatížení je určen součinem těchto dílčích zatížení opět dle příslušné normy.

$$K = K_A \cdot K_V \cdot K_\beta \cdot K_\alpha \quad (2.24)$$

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 zubu. Pro výpočet na dotyk se mezním stavem

rozumí pitting. Oba způsoby výpočtu mohou být prováděny jako kontrolní i jako návrhové. V těchto výpočtech se objevuje řada součinitelů. Součinitel  $K$  je společný pro oba výpočty, pro silovou část se pro ohyb používá součinitel  $Y$  a pro dotyk  $Z$ , stejně tak jako rozlišovací indexy pro napjatost,  $F$  pro ohyb a  $H$  pro dotyk. Pro ilustraci a názornost budou v následujících kapitolách popsány výpočty válcových kol s přímými zuby.

### 2.2.2.1 Pevnostní výpočet na dotyk

Výpočet na dotyk je v přímé souvislosti s modifikacemi uvedenými v kapitole 2.7 a odchylkami uvedenými v kapitole 2.1.2, z těchto kapitol je zřejmé, že existuje řada faktorů a řada opravných nástrojů, které ovlivňují kvalitu dotyku ozubení, zejména pak při uvažování parametru šířky zubu. Řešení vychází z klasického Hertzova vztahu pro dotyk dvou válců. Vzorce jsou uváděny na základě [25].

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{\frac{K_H \cdot F_N}{b} \cdot \left(\frac{1}{\rho_1} \pm \frac{1}{\rho_2}\right)}{\pi \cdot \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2}\right)}} \quad (2.25)$$

Po dosazení lze vztah upravit na tvar

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{E_H}{2\pi(1 - \mu^2)}} \cdot \sqrt{\frac{4 - \varepsilon_\alpha}{3}} \cdot \sqrt{\frac{2}{\cos^2 \alpha \cdot \operatorname{tg} \alpha_w}} \cdot \sqrt{\frac{K_H \cdot F_t \cdot (u \pm 1)}{b_w \cdot d_1 \cdot u}} \quad (2.26)$$

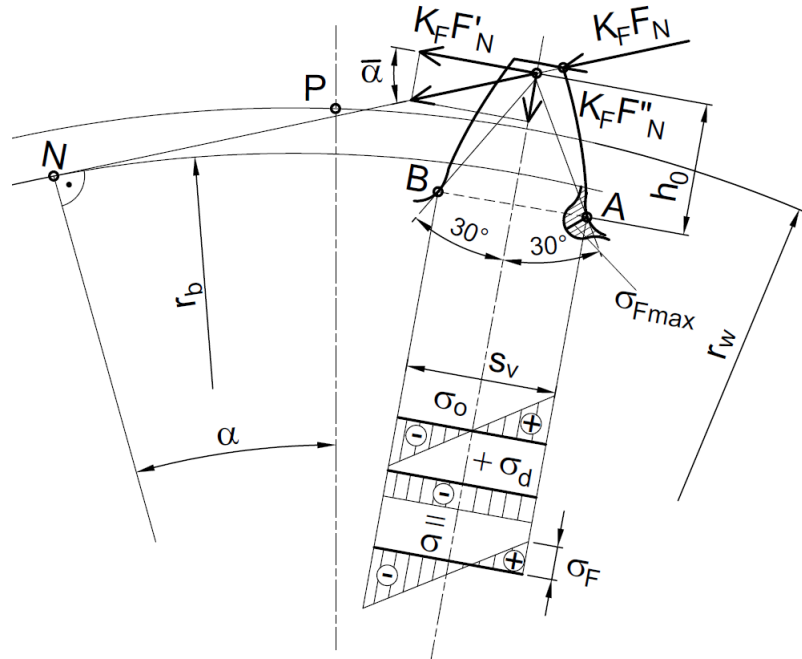
a dále na pevnostní podmínku

$$\sigma_H = Z_E \cdot Z_\varepsilon \cdot Z_H \cdot \sqrt{\frac{K_H \cdot F_t \cdot (u \pm 1)}{b_w \cdot d_1 \cdot u}} \leq \sigma_{HD} = \frac{\sigma_{Hkrit}}{S_{Hmin}}, \quad (2.27)$$

kde  $Z_E$  je součinitel mechanických vlastností materiálů,  $Z_\varepsilon$  je součinitel efektivní délky dotykových čar,  $Z_H$  je součinitel tvaru spoluzabírajících kol a  $S_H$  je součinitel bezpečnosti.

### 2.2.2.2 Pevnostní výpočet na ohyb

Představu o zatížení zubu poskytuje obr. 2.12.



Obr. 2.12: Zatížení zubu a zobrazení napjatosti - upraveno z [28]

Při klasickém výpočtu ozubení na ohyb se vychází z rovinného modelu zubu, který je uvažován jako vetknutý nosník zatížen osamělou silou  $K_F \cdot F_N$  na vrcholové hraně.  $K_F$  je součinitel přidavného zatížení při výpočtu na ohyb. Sílu lze po jejím posunutí do osy zubu rozdělit na ohybovou a tlakovou složku.

$$K_F \cdot F'_N = K_F \cdot F_N \cdot \cos \bar{\alpha} \quad (2.28)$$

$$K_F \cdot F''_N = K_F \cdot F_N \cdot \sin \bar{\alpha} \quad (2.29)$$

Místo vetknutí zubu se smluvně určuje tak, že do obrysu zubu se centricky zasune klín o vrcholovém úhlu  $60^\circ$  s body dotyku  $A$  a  $B$  se spojí tětivou. Nebezpečným průřezem je pak obdélník o stranách  $s_v$  a  $b_w$ , kde  $s_v$  je výpočtová tloušťka zubu a  $b_w$  pracovní šířka kola. Současně je

určena i výpočtová výška  $h_0$ .

Průběh nominálního napětí - ohybového  $\sigma_0$ , tlakového  $\sigma_d$  a výsledného  $\sigma = \sigma_0 + \sigma_d$  - podél úsečky  $AB$  je zřejmý z obr. 2.12. Přestože absolutně největší je tlakové napětí v bodě  $B$ , pro případný vznik a rozvoj únavového poškození je určující tahové napětí v bodě  $A$ , tj.:

$$\sigma_F = \frac{K_F \cdot F_N \cdot \cos \bar{\alpha} \cdot h_0}{\frac{1}{6} b_w \cdot s_v^2} - \frac{K_F \cdot F_N \cdot \sin \bar{\alpha}}{b_w \cdot s_v} \quad (2.30)$$

Po zavedení poměrných veličin

$$h_0^* = \frac{h_0}{m}, \quad (2.31)$$

$$s_v^* = \frac{s_v}{m} \quad (2.32)$$

a po náhradě

$$F_N = \frac{F_t}{\cos \alpha} \quad (2.33)$$

a

$$F_t = \frac{2M_k}{d} = \frac{2M_k}{m \cdot z} \quad (2.34)$$

lze dospět ke vztahům

$$\sigma_F = \frac{K_F \cdot F_t \cdot Y_F}{b_w \cdot m} = \frac{2K_F \cdot M_k \cdot Y_F}{b_w \cdot m^2 \cdot z}, \quad (2.35)$$

kde  $Y_F$  je součinitel tvaru zubu

$$Y_F = \frac{1}{\cos\alpha} \cdot \left( \frac{6h_0^* \cdot \cos\bar{\alpha}}{s_v^{*2}} - \frac{\sin\bar{\alpha}}{s_v^*} \right). \quad (2.36)$$

Součinitel tvaru záběru je bezrozměrná veličina závislá při použití standardního nástroje pouze na parametru  $z$  a korekci  $x$  řešeného kola.

Nominální napětí  $\sigma_F$  je podkladem pro určení maximální hodnoty - špičky napětí  $\sigma_{Fmax}$  - vznikající v okolí bodu  $A$  a dané vztahem

$$\sigma_{Fmax} = Y_S \cdot \sigma_F, \quad (2.37)$$

kde  $Y_S$  je teoretický součinitel koncentrace napětí (součinitel tvaru). Jeho hodnota převážně záleží na střední poloměru přechodové křivky a je možno ji odečítat z diagramů jako funkci  $z$  a  $x$ . Jelikož součinitel  $Y_F$  a  $Y_S$  závisí na parametrech  $z$  a  $x$ , lze je nahradit jedním souhrnným součinitelem

$$Y_{FS} = Y_S \cdot Y_F. \quad (2.38)$$

Výpočtové metody podle norem ČSN, ISO, DIN a další zanedbávají vliv tlakového napětí. Dochází tak ke zjednodušování vztahů. Do vztahu pro špičkové napětí dále zahrnují součinitel vlivu záběru profilu  $Y_\varepsilon$



$$Y_\varepsilon = 0,2 + \frac{0,8}{\varepsilon_\alpha}. \quad (2.39)$$

Pevnostní podmínku lze poté rozšířit na tvar

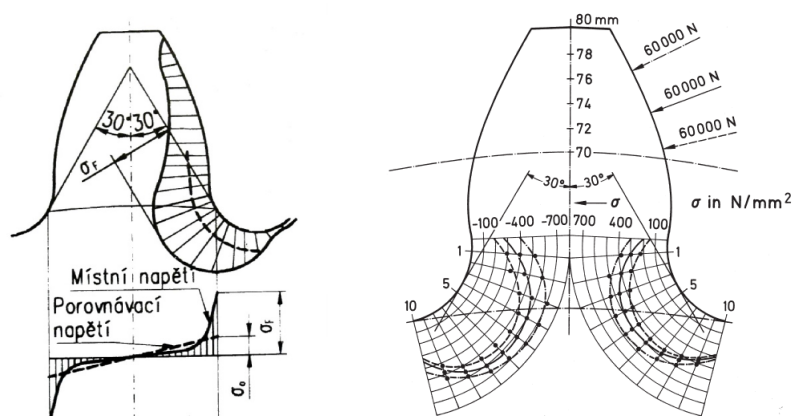
$$\sigma_{Fmax} = \frac{K_F \cdot F_t \cdot Y_{FS} \cdot Y_\varepsilon}{b_w \cdot m} = \frac{2K_F \cdot M_k \cdot Y_{FS} \cdot Y_\varepsilon}{b_w \cdot m^2 \cdot z} \leq \sigma_{FD} = \frac{\sigma_{Fkrit}}{S_{Fmin}}. \quad (2.40)$$

$S_F$  je součinitel bezpečnosti, resp.  $S_{Fmin}$  je minimální součinitel bezpečnosti, díky kterému je možné využít vztah i jako kontrolní výpočet. Pevnostní podmínku lze po dosazení  $b_w = \Psi_m \cdot m$ , kde  $\Psi_m$  je poměrná šířka volená dle diagramů.

### 2.2.2.3 Rozložení napětí v okolí paty zubu

Ze schématu na obr. 2.12 je zřejmé, že z pohledu citlivosti je příznivější umisťovat tenzometrické snímače na bok zubu, kde dochází k tlakovému namáhání, tedy strana zubu, kde nedochází k záběru ozubení.

Nejvhodnějším místem pro instalaci tenzometru je místo nebezpečného průřezu, jak je zřejmé z obr. 2.13. Jedná se o místo zubu s nejvyšší hodnotou celkového napětí. Konečné umístění tenzometrických snímačů závisí na záběru ozubení a jeho patní vůli a snaze umístit snímač co nejbližší místu nebezpečného průřezu.



Obr. 2.13: Rovinný model ohybového namáhání ozubení [25] a [7]

#### 2.2.2.4 Koeficient nerovnoměrnosti zatížení $K_{H\beta}$ , problematika společného záběru ozubení

V předchozím textu byl zub řešen jako rovinná křivka v normálné rovině. Důležitým parametrem je ovšem šířka zubu, která sebou přináší několik faktorů, které ovlivňují kvalitu záběru.

Na vlastnosti a kvalitu záběru ozubení má vliv geometrie ozubení (kapitola 2.2), jeho modifikace (kapitola 2.1.2), a celá řada faktorů, které se sumarizují do koeficientu nerovnoměrnosti zatížení  $K_{\beta}$ . Tento koeficient v sobě především zohledňuje šířku ozubení.

Ozubená kola jsou vysoce namáhané a technicky složité strojní součásti, které nestačí navrhovat jen vzhledem ke krouticímu momentu, rychlosti, životnosti a požadavku na hluk, ale navíc musí být kompenzovány nepříznivé efekty. Tyto efekty vznikají výrobními nepřesnostmi, modifikacemi a elastickou deformací jednotlivých dílů převodového ústrojí. Kromě toho musí také být při návrhu uvažována elastická deformace, výrobní nepřesnosti ozubených kol, hřídelí a skříně. Za předpokladu, že by hřídele byly dokonale vyrovnány v dokonale tuhé skříně, ložiscích a pouzdrech, mohlo by toto všechno vést ke značnému opotřebení a hlučnému provozu. [8] Při návrhu je již vycházeno z předpokládané poddajnosti a odchylek od ideálního stavu.

Montáží hřídelí do ložisek s odchylkou uložení nebo deformací hřídelí, ložisek a skříně vlivem zatížení dojde k tomu, že osy rotace ozubených kol již nejsou rovnoběžné. Toto má za následek

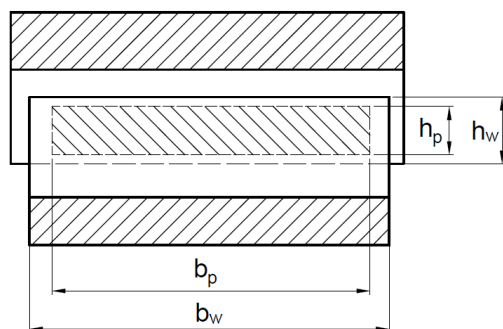
nerovnoměrnou distribuci zatížení po šířce boku zubu a tedy na jedné straně s velmi málo nebo vůbec zatíženou částí zubu a naopak na protější straně boku zubu s přetíženou částí zubu. Hlavním výzkumným tématem je predikce rozložení zatížení po boku zubu a rozložení výsledného napětí. [8]

Pro popis rozložení je užíván faktor  $K_{H\beta}$ . Jedná se o jednu z nejdůležitějších položek pro pevnostní výpočet ozubení, který při výpočtu představuje rozložení zatížení po šířce ozubení při záběru ozubených kol.

Dle ČSN EN ISO 6336 je koeficient definován jako poměr největší (místní) síly působící na jednotku šířky zubu  $w_{max}$  a průměrné síly působící na jednotku šířky zubu  $w_m$ , tedy

$$K_{H\beta} = \frac{w_{max}}{w_m} = \frac{(F/b)_{max}}{F_m/b} \quad (2.41)$$

U značně zatížených soukolí je zejména důležité řešit dotyk zubů. Předpisy dotyku zubů určují úplnost přiléhání pracovních povrchů ozubených kol. Jedná se důležitý parametr z pohledu trvanlivosti ozubení. Ze získaných poznatků je zřejmé, že k poškození povrchu zubu dochází dříve, než ke vzniku trhlin v oblasti přechodové křivky zubu. Komplexními ukazateli jsou relativní rozměry celkového pásma dotyku zubů vztažené na pracovní šířku a výšku ozubení (obr. 2.14), relativní rozměry pásma dotyku zubů na jednu otáčku pastorku a parametry zachycující úchyly rovnoběžnosti os otáčení kol v různých rovinách. Celkovým pásmem dotyku se rozumí část aktivního povrchu boku zubů, na němž dochází při protáčení soukolí zatíženého předepsaným způsobem ke styku se zuby spoluzabírajícího kola. Předpisy relativních rozměrů pásma dotyku jsou uváděny v závislosti na požadovaném stupni přesnosti. Dotyk není možno prakticky posuzovat, proto je zásadní použití koeficientu  $K_{H\beta}$ .



Obr. 2.14: Pásmo dotyku zubů (pracovní šířka  $b_p$  a výška  $h_p$ ) - upraveno z [25]

Určit toto rozdělení 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. Jedná se ovšem pouze o přibližné řešení. 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. [25] a [31]

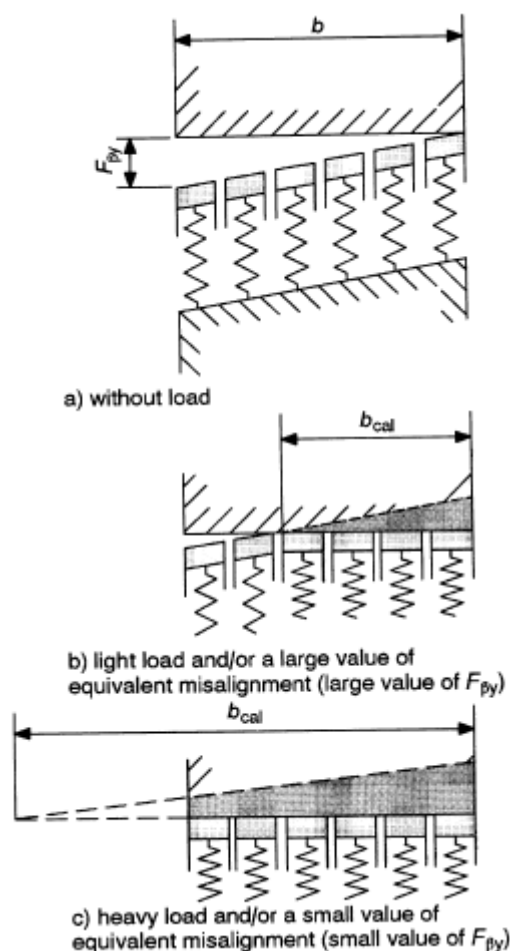
Součinitel nerovnoměrnosti zatížení zubů po šířce se dále dělí podle sledovaného účinku zatížení. Druh namáhání je upřesněn indexem: ohyb - F, dotyk - H, zadírání - B. Vzhledem k dalšímu využití je použit součinitel pro výpočet napětí v dotyku  $K_{H\beta}$ . Tímto koeficientem se do výpočtu napětí zubu v ohybu zahrnuje okolnost, že měrné zatížení (tj. celkové působící zatížení vztahované na jednotku šířky zubu) není po celé aktivní ploše zubů rozloženo rovnoměrně. Přitom se uvažuje takové rozložení měrného zatížení, při kterém toto podél dotykových křivek směrem od jednoho čela zubu ke druhému buď trvale trvale vzrůstá, nebo trvale klesá.

Koeficient  $K_{H\beta}$  patří spíše k popisu tvarových vlastností zubů (vliv geometrie, tuhosti, přesnosti). [12]

Při okamžitém kontaktu boků zubů dochází teoreticky k liniovému kontaktu. Při deformaci má okamžitá kontaktní oblast teoreticky tvar úzkého obdélníku u přímého ozubení a úzké elipsy u šikmého ozubení. [4]

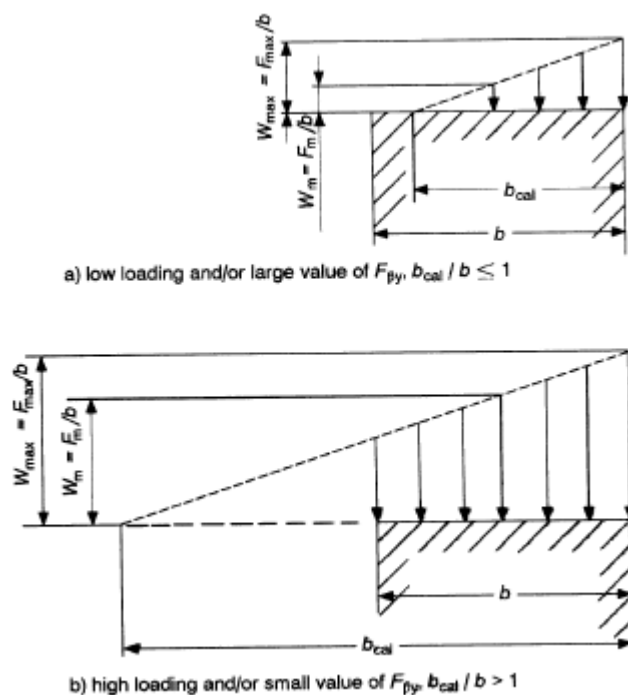
Současné normy uvádějí vzorec pro faktor  $K_{H\beta}$ , který ovšem není v některých případech úplně vhodný k použití pro danou aplikaci. Jako mezinárodní standard se uvádějí pro tuto hodnotu normy ISO 6336-1 metoda C, AGMA 2001, AGMA 2101. V současné době roste počet softwarových návrhářů ozubených kol, které využívají metodu kontaktní analýzy zubů (TCA - tooth contact analysis). [10]

Graficky jsou možnosti sezení zubů v závislosti na zatížení prezentovány na diagramech obr. 2.15. Vlivy na sezení zubů byly popsány v kapitole 2.2.



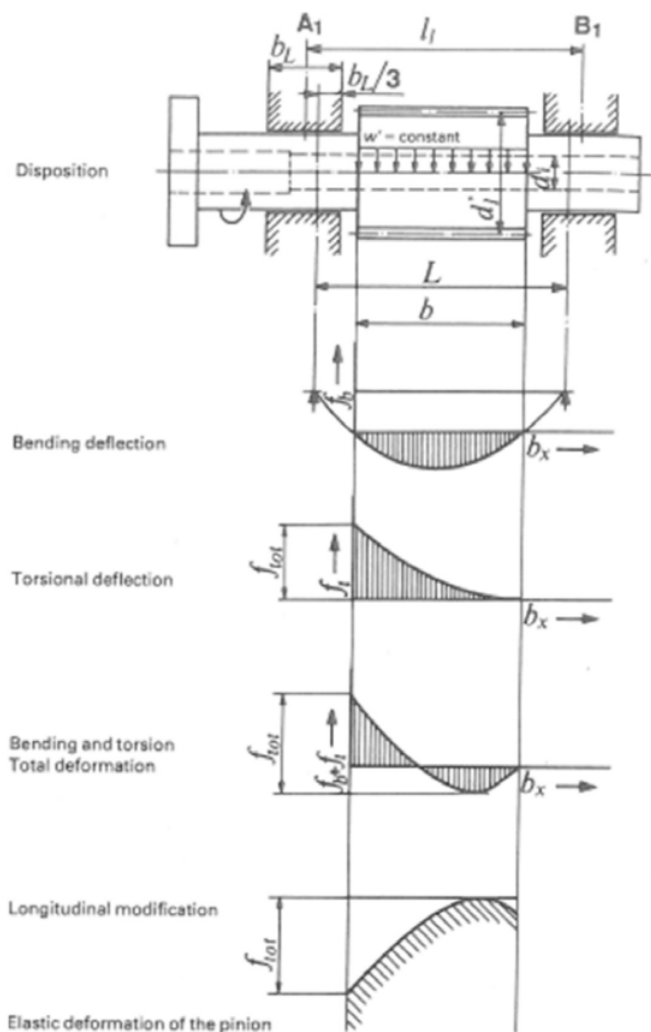
Obr. 2.15: Distribuce zatížení přes šířku zubu s lineárním ekvivalentním přesazením [1]

Postup určení určení jednotlivých zatížení je na obr. 2.16.



Obr. 2.16: Určení zatížení na jednotkové šířce zubu [1]

Mezi nejvýznamnější důvody ovlivňující nerovnoměrnost zatížení zubu po šířce patří odchylky od ideálních tvarů, vůle, montážní odchylky a deformace součástí převodového ústrojí. Deformace hřídele je možno řešit superpozicí jednotlivých příspěvků zatížení (obr. 2.17).

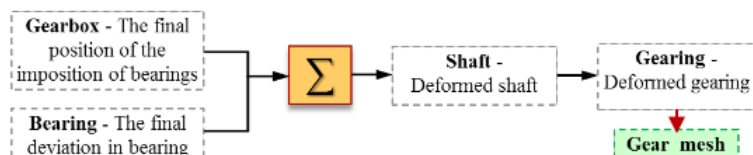


Obr. 2.17: Zobrazení určování odchylek vlivem deformace komponent [10]

Konečná pozice uložení v ložiskách je dána sumou výrobních úchylek rovnoběžnosti a úchylkami danými deformací skříně. Sečtou-li se tyto úchylky s vůlí na jednotlivých ložiscích a úchylkami vzniklými deformací ložisek výsledkem jsou konečné souřadnice polohy geometrického středu ložisek (obr. 2.18). Do těchto pozic je přemístěn hřídel ze své ideální polohy. Svými výrobními odchylkami a deformací ovlivní polohu a orientaci ozubení. Závěrečným prvkem řetězce je geometrie ozubených kol přemístěná do pozic z minulého kroku. Zde hraje roli jednak geometrická tolerance kotouče kola vztahována ke středicímu průměru a dále odchylka způsobená deformací [21].

Zásadní je tedy to, že prvky ovlivňující záběr ozubení se sčítají a do ozubení se promítne suma

všech odchylek.



Obr. 2.18: Prvky ovlivňující kvalitu záběru [21]

Výsledkem softwarových návrhových analýz je určení rozložení napjatosti při uvažovaných de-  
 formacích, vůlí a modifikací (Obr. 2.19).

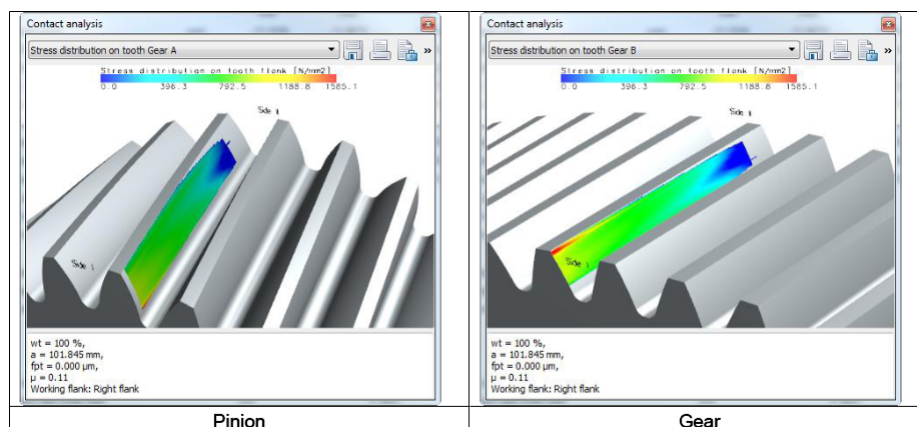


Figure 9. stress distribution calculated with  $K_{HB} = 2.2$

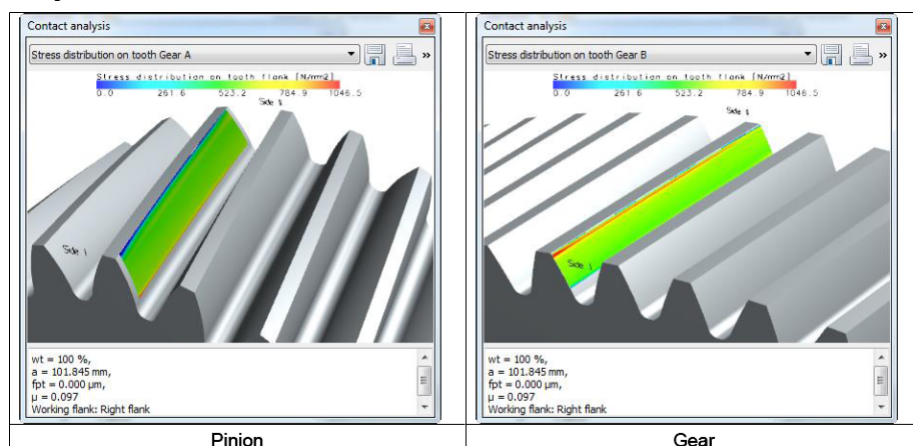


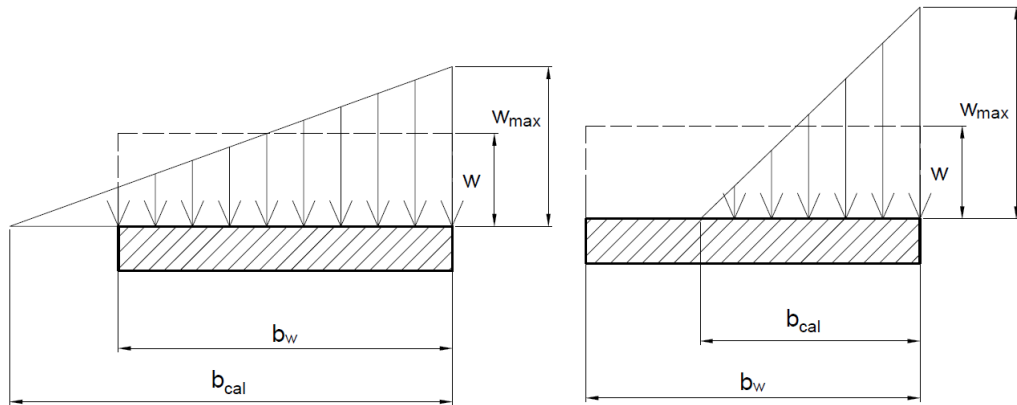
Figure 23. stress distribution calculated with  $K_{HB} = 1.0023$

Obr. 2.19: Výsledky návrhu ozubení před a po optimalizaci [2]

Vzhledem k tomu, že je přesné určení rozdělení zatížení velmi obtížné, tak je ve výpočtové  
 praxi vycházeno nejčastěji z předpokladu lineárního rozdělení zatížení po šířce ozubení. Přitom



mohou nastat dva extrémní případy. Zatížení je rozděleno po celé šířce ozubení nebo je zatížení neneseno jen částí šířky ozubení (dle obr. 2.20).



Obr. 2.20: Rozložení zatížení po šířce ozubení - upraveno z [25]

První případ nastává u přesného a silně zatíženého ozubení, je popsán rovnicí 2.42 a součinitel je v rozmezí  $1 \leq K_\beta \leq 2$ .

$$wb_w = \frac{1}{2}w_{max}\left(1 + \frac{b_w}{b_{cal}}\right) \quad (2.42)$$

Naopak druhý případ nastává u méně přesného a méně zatíženého ozubení, je popsán rovnicí 2.43 a součinitel nabývá hodnot  $K_\beta \geq 2$ .

$$wb_w = \frac{1}{2}w_{max}b_{cal} \quad (2.43)$$

Dle doporučení normy ISO (1978) a ČSN (1989) se pro výpočet součinitele  $K_\beta$  užívá pro kompletní zatížení zubu vztah 2.44 a pro částečné zatížení šířky zubu vztah 2.45.

$$K_{\beta} = \frac{2 \frac{b_{cal}}{b_w}}{2 \frac{b_{cal}}{b_w} - 1} \quad (2.44)$$

$$K_{\beta} = 2 \frac{b_w}{b_{cal}} \quad (2.45)$$

Samotné rozdělení zatížení po šířce ozubení se mění po dráze záběru tak, jak se mění tuhost jednotlivých párů zubů, a proto uváděná rozdělení platí pro určitou fázi záběru.

### 2.2.3 Ztráty v ozubení

Převodové ústrojí slouží k přenosu krouticího momentu ze vstupní hřídele na hřídel výstupní. Princip ozubení je založen na přenosu energie tvarovým stykem (kapitola 2.1). Při tomto procesu dochází vlivem vzniklého tření v kontaktu ozubení k mechanickým ztrátám, kdy výkon přivedené se výkonu odvedenému a ztrátám dle vztahu

$$P_{in} = P_{out} + P_{ztr}. \quad (2.46)$$

Tyto ztráty mají nejvýraznější vliv na celkovou účinnost převodovky. Ztráty jsou mimo jiné způsobovány deformacemi ozubení, hřídelí a skříně. Energetický tok se projeví nárůstem tepla. Teplota oleje může být 80 až 120°C při různých způsobech chlazení, kdy v záběru může velmi krátkodobě dosahovat několik stovek stupňů.

## 2.3 Navrhování ozubení

### 2.3.1 Analytický postup návrhu

Návrh a kontrola standardního profilu ozubení se řídí vydanými normami. Standardizované postupy pro návrh ozubení se v jednotlivých normách zásadně neliší. Odlišnost se nachází v

pohledu na model zubu a na stanovení hodnoty součinitelů, které jsou zahrnovány do návrhových výpočtů. Výsledné návrhy ozubení a kontrolní parametry se dle jednotlivých norem shodují pouze s drobnými odchylkami. Níže je uveden soupis norem vztahující se k dané problematice návrhů a kontroly ozubení. Byly vybrány normy, které jsou v oboru u nás vnímány jako používané. Jedná se o normy české, evropské a americké.

ČSN EN ISO 1328 - Čelní ozubená kola - Soustava přesnosti ISO

ČSN EN ISO 6336 1-3 - Výpočet únosnosti čelních ozubených kol s přímými a šikmými zuby

AGMA 2001-C95 - Fundamental Rating Factors and Calculation Methods for Involute Spur and Helical Gear Teeth

ANSI B6.1-1968 - Coarse pitch gears

AGMA 908-B89/95 - Geometry Factors for Determining the Pitting Resistance and Bending Strength of Spur, Helical, and Herring Gear Teeth

AGMA 2003-A86/88 - Rating the Pitting Resistance and Bending Strength of Generated Straight Bevel, Zerol Bevel, and Spiral Bevel Gear Teeth

AGMA 2005-D03 - Design Manual for Bevel Gears

DIN 3971 - Definitions and Parameters for Bevel Gears and Bevel Gear Pairs

DIN 3991 Kegelnradern 1-4 - Calculation of load capacity of bevel gears without pinion offset

DIN 3965 Toleranzen für Kegelnradverzahnungen 1-4 - Tolerancing of bevel gears

DIN 3990 T1-T4, - Calculation of load capacity of cylindrical gears

Základní podmínkou "standardního" postupu je zajištění definované životnosti dle požadavků odběratelů případně norem v odběrném místě.

Kontrolní výpočty ozubení se běžně provádějí ve dvou základních směrech. Prvním případem je ohyb, kdy jako mezní stav se sleduje únavový lom zubu. Druhou variantou je výpočet na dotyk, kdy mezním stavem je progresivní únavové vydrolování pracovních povrchů (pitting). V případě potřeby se tyto kontrolní výpočty doplňují o kontrolní výpočet na zadírání a opotřebení. [28]

Výpočet na ohyb je popsán v kapitole 2.2.2. Pomocí tohoto výpočtu je získáno nominální napětí  $\sigma_F$ , které je však pouze podkladem pro určení maximální hodnoty špičky napětí  $\sigma_{Fmax}$ . To je dáno vztahem

$$\sigma_{Fmax} = k_\alpha \cdot \sigma_F, \quad (2.47)$$

kde  $k_\alpha$  je teoretický součinitel koncentrace napětí, který závisí převážně na středním poloměru přechodové křivky. Pro výpočet na únavu se ovšem špičková hodnota neuplatňuje v plné výši, protože různé materiály na ni reagují s odlišnou citlivostí. Proto se zavádí snížená špička efektivního napětí, kde je použit místo  $k_\alpha$  součinitel  $k_\beta$ , který závisí na  $k_\alpha$  a navíc na vlastnostech materiálu. Tento vliv se zpravidla zahrnuje do dovoleného namáhání v ohybu  $\sigma_{Fdov}$ . Pevnostní podmínka má pak dle [28] tvar

$$m \geq \sqrt[3]{\frac{2 \cdot K_F \cdot M_k \cdot Y_F}{\sigma_{Fdov} \cdot \psi_m \cdot z}}. \quad (2.48)$$

Pevnostní výpočet na dotyk je porovnáván s dotykovým napětím  $\sigma_H$  dle Hertze, který je uveden v [28]. Dovolená hodnota Hertzova tlaku  $\sigma_{Hdov}$  je závislá především na tvrdosti pracovních povrchů zubů. Pevnostní podmínka pro dotyk je prováděna z již dříve specifikovaného důvodu. U ozubení je nejzásadnější životnost jeho povrchu.

Základním údajem pro hodnotu dovoleného napětí je mez únavy a příslušný počet cyklů, které má kolo za dobu předepsané životnosti absolvovat. Mez únavy je obecně dána Wöhlerovou křivkou. Pro proměnlivé zatížení a tudíž pro proměnlivé nominální napětí zubu je nutno z rozboru sestavit pravděpodobné spektrum namáhání zubu. Získané spektrum se dále zpracovává za použití hypotéz.[28]

### 2.3.2 Dostupný software pro navrhování ozubení

Návrh ozubení vychází z limitů určených v kapitole 2.2.2. Výstupem kontrolních a návrhových výpočtů je vždy modul ozubení (normálový). Jak je patrné ze zmíněné kapitoly, výpočet modulu je proveden na základě několika volitelných koeficientů se zásadním dopadem na výsledky. To znamená, že tyto postupy generují často předimenzování a nejsou úplně vhodné pro různé progresivní konstrukce, které musí reagovat na protékající zatížení. Částečné zvýšení kvality návrhu ozubení může být provedeno užitím vhodného softwaru.

Navrhnout ozubení je možno na základě analytických výpočtů. Moderním způsobem je užití některého ze softwaru pro návrh ozubení (KISSsoft, MITCalc a další). Současně lze výpočet doplnit kontrolou v MKP. Základním posunem ve využití (v zavedení) softwarů je například zhodnocení vlivu deformací hřídelí a skříně na ozubení (dle kapitoly 2.2).

Celá procedura testování pak není nic jiného než ověření správnosti těchto návrhů.

### 2.3.3 Související legislativa a normy

Obecně dnes platí, že to co nevyžaduje zákon, to plněno být nemusí. Veškerou odpovědnost za zařízení přitom nese výrobce potažmo prodejce. Správné posouzení shody výrobku s požadavky příslušnými nařízeními vlády daného regionu, dokladuje výrobce tzv. "Prohlášením o shodě".

Zmíněnou problematiku řeší zákony vedené pod čísly 102/2001 a 90/2016 a související nařízení vlády a prováděcí vyhlášky ministerstva. Zákon 102/2001 popisuje obecnou bezpečnost výrobků

a zákon 90/2016 uvádí posuzování shody stanovených výrobků při jejich dodávání na trh.

## 2.4 Testování kvality záběru, testovací a zobrazovací metody

Velmi ceněným údajem je vždy ověření správnosti návrhu dané součásti. V případě ozubených kol se jedná obecně o určení zatížení ozubení. Může se jednat o stanovení zatížení jednotlivých zubů, rozložení zatížení po šířce ozubení a případně o určení distribuce zatížení přenášené jednotlivými koly planetových převodových ústrojí. Určení těchto veličin je převážně experimentální. Jedná se o fotoelasticimetrii, test ozubení na barvu, měření vibrací a užití tenzometrických měření. Tyto metody lze rozdělit na metody k jednorázovému/okamžitému a průběžnému testování a na metody použitelné mimo a uvnitř převodovky.

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

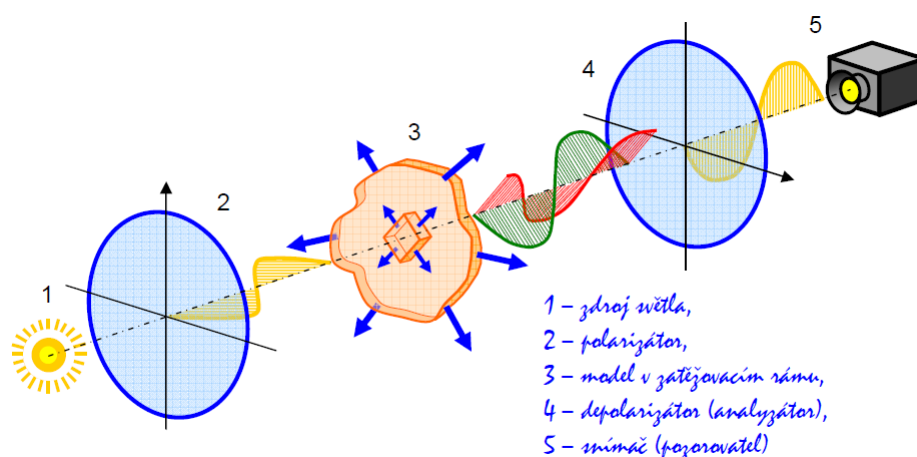
Metody použitelné uvnitř převodovky:

- Test ozubení na barvu
- Tenzometrická měření

### 2.4.1 Fotoelasticimetrie

Jedná se o metodu s dlouhou historií, která je založena na optickém efektu. Metoda vznikla při pokusech s polarizovaným světlem, které procházelo skrz zatížené sklo, čímž vznikaly různobarevné obrazce. Postupem času byla metoda vylepšována a ze stanovení hraničních napětí rovinných obrazců se modernizací došlo až k pozorování dějů pro prostorové úlohy (Obr. 2.21).

Principem fotoelasticimetrie je dočasný dvojlom, ke kterému dochází u opticky anizotropních materiálů v důsledku napjatosti. Dojde k rozložení paprsku na dva s různou rychlostí a orientací. Orientace odpovídá orientaci hlavních napětí.[23]



Obr. 2.21: Princip fotoelasticimetrie [23]

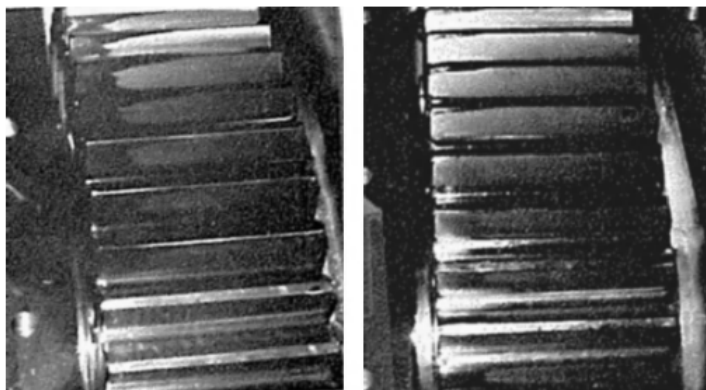


Obr. 2.22: Fotoelasticimetrie ozubení [4]

Fotoelasticimetrie je metoda, kterou lze využít při sledování zatížení ozubení jak je vidět na obr. 2.22. Jedná se však o poměrně složitou metodu náročnou na umístění měřící aparatury a pro využití v převodových ústrojí je tato metoda nepoužitelná.

### 2.4.2 Test ozubení na barvu

Test ozubení na barvu je metoda, která sleduje kvalitu záběru ozubených kol. Výsledkem není stanovení hodnoty zatížení ozubení, ale pouze geometrický prostor na zubech, kde dochází k záběru kol, tzv. otisk. Jejím účelem je tedy stanovení rozložení záběru zubů jednotlivých kol. Postup je takový, že dojde k nanesení určeného typu barvy na několik zubů. Převodové ústrojí je následně podrobena testovacímu provozu a výsledkem je setření barvy z částí zubů, kde dochází ke kontaktu spoluzabírajících kol. Z výsledného otisku na zubu je provedeno vyhodnocení správnosti záběru a následně případné modifikování tvaru zubu. Takový test a jeho výsledek je prezentován na obr. 2.23.



Obr. 2.23: Kontrola záběru ozubení na barvu. Na levém obrázku je výsledek ze záběru ozubení, kde je jeden z konců více než dvakrát přetížen. Na pravé straně je ideální stav záběru ozubení. [22]

Výhodou testu kvality záběru ozubení na barvu je jeho minimální náročnost po všech stránkách. Jedná se o velmi finančně nenákladnou metodu, při které není užívána žádná sofistikovanější měřicí aparatura. Současně také její způsob použití je velice jednoduchý, jde pouze o správné nanesení barvy a poté správná interpretace výsledných otisků.

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.

### 2.4.3 Měření vibrací a hluku

Zvýšená hladina vibrací a hluku je často první známkou vznikající poruchy převodovky. Mezi příčiny, které mohou nežádoucí vibrace a hluk způsobit, patří nevyváženost, nesouosost, uvolnění některé části, poškození ložiska, poškození ozubení a další.

Měření hluku je prováděno zvukoměrem (obr. 2.24) nebo akustickou kamerou (obr. 2.25) a je sledována určitá hladina, měřená v decibelech  $dB$ .



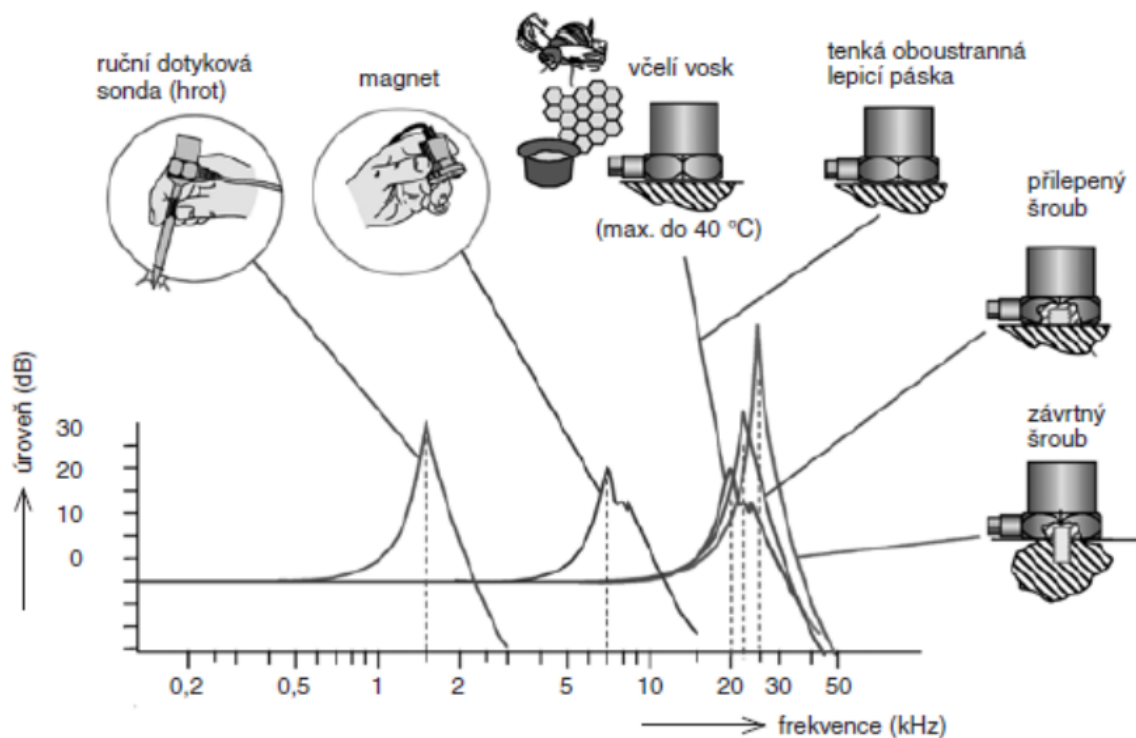
Obr. 2.24: Zvukoměr [24]



Obr. 2.25: Akustická kamera [29]

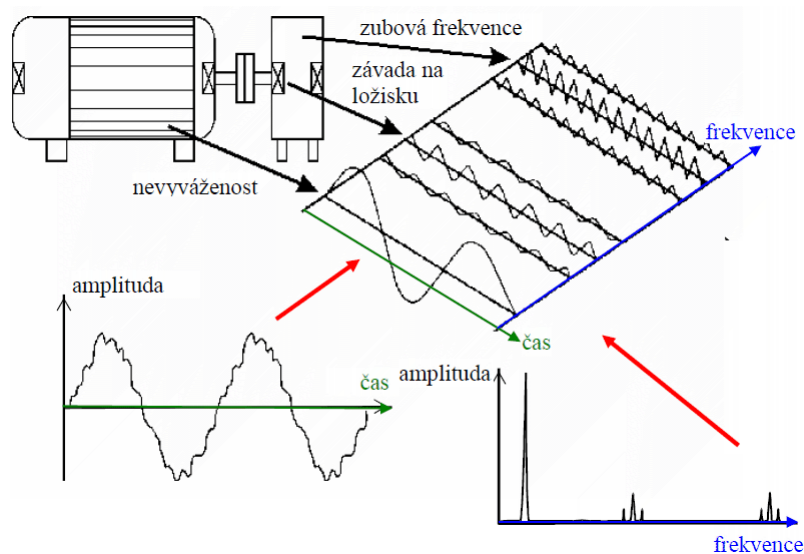
Pro měření vibrací se užívá snímačů rychlostí - akcelerometrů, které jsou na převodovce umístěny na specifikovaných lokalitách v různých směrech. Příklady užití a uchycení snímačů vibrací jsou

uvedeny na obr. 2.26.



Obr. 2.26: Snímače vibrací a jejich uchycení [24]

Vibracemi lze sledovat aktuální stav převodovky, jak je tomu uvedeno v [6], kdy je identifikována její porucha a obsluha je o ní okamžitě informována. Tento obor se nazývá vibrodiagnostika a je nezbytnou součástí systémů údržby a bezporuchového a bezpečného provozu strojů. Diagnostiku popisují normy ČSN ISO 13373-1 a ČSN ISO 13373-2. Signál od vibrací nese informace o příčině vibrací a jeho analýzou různými metodami lze zjistit vznikající nebo rozvíjející se závadu. Měření se provádí systematicky, cíleně, obvykle nejprve na stroji v bezvadném technickém stavu s dalšími opakovanými s časovou periodou danou konkrétním typem stroje a druhem jeho provozu. Jak se postupně mění (zhoršuje) technický stav stroje, mění se i charakteristické kmitočtové spektrum, resp. především jeho jednotlivé složky mající vztah k jeho jednotlivým částem (ozubená kola, soukolí, hřídele, ložiska, rotory, setrvačníky, klouby a jiné). Na základě sledování a analýzy těchto změn spekter lze bezdemontážním způsobem velmi účinně diagnostikovat, detekovat, identifikovat, lokalizovat a popř. predikovat vznikající poruchu a opotřebení. [3]



Obr. 2.27: Vibrace vzniklé na různě opotřebených nebo poškozených rotujících částech [3]

#### 2.4.4 Tenzometrická měření

V předešlých kapitolách byly popsány metody zjišťování zatížení ozubení. Výsledky z fotoelasticimetrie jsou sice přesné a dávají navíc mapu rozložení napětí, nicméně pro použití přímo v převodových ústrojích za provozu je metoda prakticky nepoužitelná. Test ozubení na barvu je metoda, která nepřináší informaci o zatížení zubu, ale stanovuje rozložení zatížení po šířce ozubení. Nicméně ani tato metoda není univerzálně použitelná a tedy obecně aplikovatelná, a to z důvodu ovlivnění tvaru otisku při rozběhu převodovky. Nejrobustnější metodou pro získání informace ohledně skutečného zatížení zubů je změření deformace daného místa. K tomuto se užívá tenzometrických čidel, které změří deformaci v daném místě a kterou lze dále převést na hodnotu mechanické napjatosti a určit tak zatížení zubu.

Se základním určování síly působící na zubu je možno setkat se například v práci K. Petra [21] nebo H. Ligata [13]. Jedná se o úlohu, kde jediným úskalím je správné umístění tenzometru.

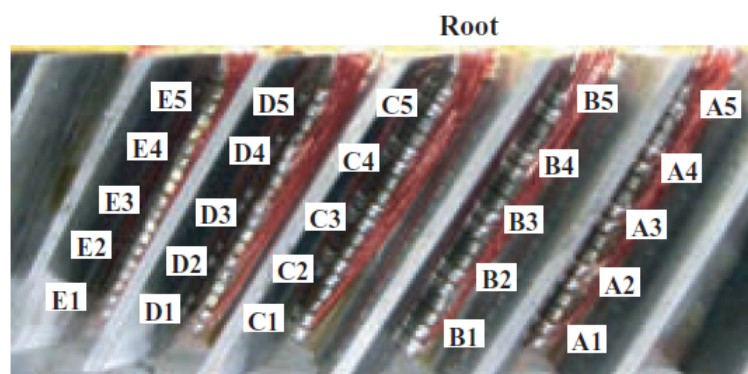


Obr. 2.28: Tenzometrické měření zubu [21]



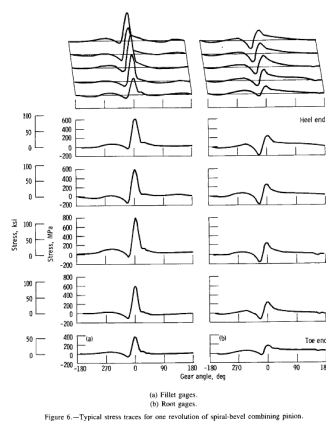
Obr. 2.29: Tenzometrické měření zubu [13]

Složitější aplikací je umístění řady tenzometrů po šířce zubu, kdy lze účelně sledovat kvalitu záběru ozubení. Nerovnoměrností zatížení se zabývá práce M. Zundela [32] a M. Hotaita [8]. V obou případech je umístění tenzometrů provedeno do paty zubu (obr. 2.29 a obr. 2.30). Tím je částečně snížena citlivost měření, jelikož se nejedná o místo s největší napjatostí.



Obr. 2.30: Rozmístění řad tenzometrů do pat zubů [8]

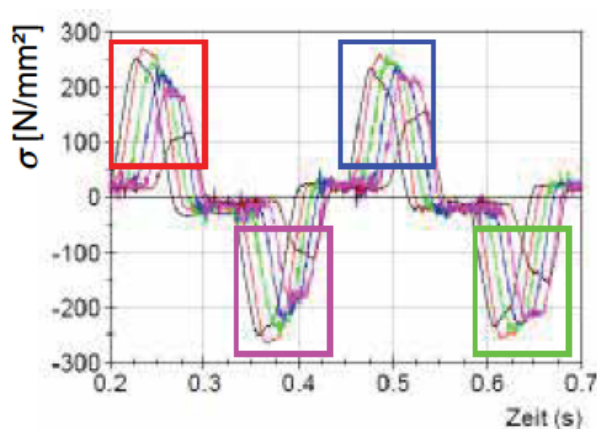
Z pohledu citlivosti je výhodnější umístění tenzometrů na přechodovou část zubu dle kapitoly 2.2.2.3. Jak je v této kapitole popsáno, jedná se o místo s největší mechanickou napjatostí zubu a navíc místo nebezpečného průřezu zubu. Porovnání křivek získaných z tenzometrů, které jsou umístěny v patě zubu a na boku zubu je provedeno v práci B. Oswalda [19] a je ilustračně znázorněno na obr. 2.31. Je zřejmé, že hodnoty získané na boku zubu mají větší absolutní hodnotu, čili jsou z pohledu citlivosti měření výhodnější.



Obr. 2.31: Naměřená hodnota napjatosti tenzometry v patě a na přechodové části boku zubu [19]

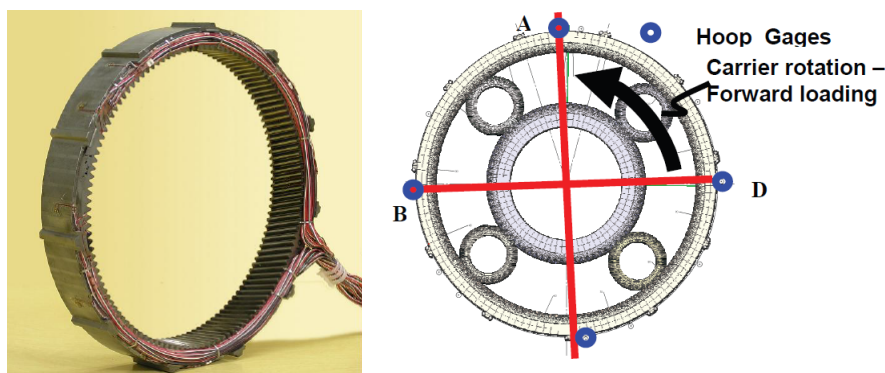
Typický průběh křivek záběrů při aplikaci tenzometrů je ukázán na obr. 2.32. Jsou zde zaznamenány hodnoty jednotlivých tenzometrů při záběru měřeného pastorku se satelity. Z článku B. Oswalda [19] však není zřejmé, zda byla provedena teplotní kompenzace tenzometrů, která je vzhledem k očekávaným velkým změnám teploty nutná. Dále není zcela jasný způsob zapojení

tenzometrů a jejich případné propojení mezi jednotlivými zuby.



Obr. 2.32: Průběh naměřených dat [32]

Jedna z aplikací tenzometrického měření na zubech je detailně řešena v článkách H. Ligaty [13] a A. Singha [26], tyto práce se zabývají experimentální určování kvality distribuce toku výkonu jednotlivými satelity planetových převodovek. Zde jsou tenzometry umístěny na zuby korunového kola, které přicházejí do záběru se satelity v jeden daný okamžik.



Obr. 2.33: Korunové kolo s nainstalovanými tenzometry [13],[26]

Pro úplnost přehledu je třeba doplnit, že tenzometrickému měření se věnuje např. firma Transmission Dynamics, která řeší problematiku sledování zatížení ozubení, ovšem bez uvedení podrobností.

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

kombinovat a doplnit například o měření vibrací a hluku, které se standardně provádějí.

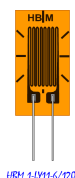
## 2.5 Tenzometrické měření

### 2.5.1 Principy měření

Jedním ze základních pilířů vytvoření experimentální metodiky měření je správný výběr vhodných typů měřicích snímačů, jejich zapojení, správné vyhodnocení výstupního signálu a určení možné chyby měření. Za tímto účelem je zapotřebí znát několik teoretických východisek. Veškerá východiska jsou opřena o knihu P. Janíčka [9].

Rozdělení tenzometrů lze provést podle různých kritérií. Jedná se například o dělení na tenzometry mechanické, strunové, pneumatické a elektrické. Je zřejmé, že pro tento druh měření je nutné použít elektrické tenzometry. Tato skupina snímačů se dále dělí na tenzometry odporové, polovodičové, indukčnostní a kapacitní. Nejrozšířenější jsou tenzometry odporové a polovodičové.

Odporové tenzometry (obr. 2.34) jsou snímače, u nichž změna délky snímače způsobuje změnu ohmického odporu. Jinými slovy řečeno je mechanická deformace převedena na ohmický odpor. Vzorce a jejich úpravy vycházejí z [9].



Obr. 2.34: odporový tenzometr [23]

Základní částí tenzometru je měřicí mřížka, její změna délky způsobuje změnu odporu  $R$ . Odpor  $R$  je dán vztahem

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}, \quad (2.49)$$

kde  $\rho$  je měrný odpor,  $l$  je délka vodiče a  $A$  je plocha průřezu.

Dojde-li k zatížení vodiče v podélném směru, dojde v tomto směru k prodloužení tenzometru a v příčném směru k jeho zkrácení a tím i ke změně výsledného odporu snímače  $dR$ . Tato změna je stanovena diferencováním vztahu 2.49, přičemž veličiny  $\rho$ ,  $l$ ,  $A$  považujeme za proměnné.

$$dR = d\left(\rho \cdot \frac{l}{A}\right) = d\rho \cdot \left(\frac{l}{A}\right) + \rho \cdot d\left(\frac{l}{A}\right) = d\rho \cdot \frac{l}{A} + \rho \cdot \frac{dl \cdot A - l \cdot dA}{A^2} \quad (2.50)$$

Je-li předpokládána nezávislost  $\rho$  na zatížení a nedojde-li ke změně teploty  $T$ , lze uvažovat  $d\rho = 0$  a pak tedy

$$dR = \rho \cdot \frac{dl \cdot A - l \cdot dA}{A^2}, \quad (2.51)$$

resp. psáno v diferencích

$$\Delta R = \rho \cdot \frac{\Delta l \cdot A - l \cdot \Delta A}{A^2}. \quad (2.52)$$

Pro  $A = a \cdot b$  (uvažován je obdélníkový průřez vodiče) platí

$$\Delta A = \Delta a \cdot b + a \cdot \Delta b + \Delta a \cdot \Delta b \quad (2.53)$$

a při zanedbání diferencí vyšších řádů ( $\Delta a \cdot \Delta b$ )



$$\Delta A = \Delta a \cdot b + a \cdot \Delta b. \quad (2.54)$$

Při využití Poissonova zákona bude změna průřezu rovna

$$\Delta A = -\mu \cdot \varepsilon_{pod} \cdot a \cdot b + a \cdot (-\mu \cdot \varepsilon_{pod} \cdot b) = -2 \cdot \mu \cdot \varepsilon_{pod} \cdot A. \quad (2.55)$$

Po dosazení 2.55 do rovnice pro změnu odporu 2.52 je získán vztah

$$\Delta R = \rho \cdot \frac{\varepsilon_{pod} \cdot l \cdot A - l \cdot (-2 \cdot \mu \cdot \varepsilon_{pod} \cdot A)}{A^2} = \rho \cdot \frac{l}{A} \cdot \varepsilon_{pod} \cdot (1 + 2 \cdot \mu). \quad (2.56)$$

Zavedením poměrné změny odporu jako poměr změny odporu  $\Delta R$  k původní hodnotě odporu  $R$  je získán vztah

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\rho \cdot \frac{l}{A} \cdot \varepsilon_{pod} \cdot (1 + 2 \cdot \mu)}{\rho \cdot \frac{l}{A}} = \varepsilon_{pod} \cdot (1 + 2 \cdot \mu). \quad (2.57)$$

Výraz uvedený v závorce rovnice 2.57 ( $1 + 2 \cdot \mu$ ) se označuje jako deformační součinitel tzv. *k-faktor*.

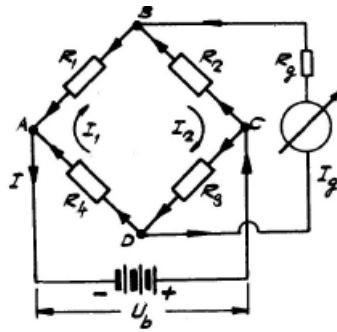
Velikost *k-faktoru* závisí zejména na typu snímače, materiálu vodiče a geometrii vnutití snímače.

Pro konečnou změnu odporu lze vztah 2.57 přepsat do tvaru

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon_{pod}. \quad (2.58)$$

## 2.5.2 Zapojení tenzometrů

Při měření deformace je změna odporu  $\Delta R$  velmi malá. Tyto velmi malé změny odporu se nejčastěji měří v můstkovém zapojení, nejobvykleji pak do tzv. **Wheatstonova můstku** (obr. 2.35).



Obr. 2.35: Wheatstonův můstek [9]

Při změně velikost odporu některého z tenzometrů  $R1$  až  $R4$  dojde ke změně velikosti protékajícího proudu  $Ig$  protékající diagonálou můstku na měřiči, který lze s využitím Ohmova a Krichhoffova zákona určit jako funkci odporů tenzometrů  $R1$  až  $R4$ , odporu měřiče  $Rg$  a napájecího napětí  $Ub$ .

První Kirchhoffův zákon říká, že algebraický součet proudů v kterémkoliv uzlu obvodu je nulový. V případě, že označíme proud přitékající do uzlu znaménkem +, můžeme pro uzly A, B, C, D psát následující rovnice:

$$I_1 + I_4 - I = 0 \quad (2.59)$$

$$I_g - I_1 + I_2 = 0 \quad (2.60)$$

$$I - I_3 - I_2 = 0 \quad (2.61)$$

$$I_3 - I_4 - I_g = 0 \quad (2.62)$$

V této soustavě rovnic existují jen tři vzájemně nezávislé rovnice.

Druhý Kirchhoffův zákon říká, že součet všech svorkových napětí v uzavřeném obvodu je nulový.

Pro tři uzavřené části můstku s využitím Ohmova zákona lze psát:

$$-R_1 \cdot I_1 - R_g \cdot I_g + R_4 \cdot I_4 = 0 \quad (2.63)$$

$$-R_2 \cdot I_2 + R_3 \cdot I_3 + R_g \cdot I_g = 0 \quad (2.64)$$

$$U_b - R_4 \cdot I_4 - R_3 \cdot I_3 = 0 \quad (2.65)$$

Řešení soustavy celkem šesti rovnic (její determinant označen  $D_s$ , konkrétně tří vzájemně nezávislých rovnic z prvního Kirchhoffova zákona a tří rovnic z druhého Kirchhoffova zákona, pro šest neznámých  $(I_1, I_2, I_3, I_4, I_g, I)$  vzhledem k proudu  $I_g$  je:

$$I_g = \frac{U_b}{D_s} \cdot (R_1 \cdot R_2 - R_2 \cdot R_4) \quad (2.66)$$

Změna odporu ve větvi můstku se určuje ze změny proudu  $I_g$ . Změní-li se odpor  $R_1$  o  $\Delta R_1$ , poté dojde ke změně protékajícího proudu dle vztahu

$$\begin{aligned} I_g + \Delta I_g &= \frac{U_b}{D'_s} \cdot [(R_1 + \Delta R_1) \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4] = \\ &= \frac{U_b}{D'_s} \cdot [R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4] + \frac{U_b}{D'_s} \cdot R_3 \cdot \Delta R_1, \end{aligned} \quad (2.67)$$

kde  $D'_s$  je determinant výše popsané soustavy rovnic ovšem s tím, že dojde ke změně odporu na  $R_1 + \Delta R_1$ . Vzhledem k tomu, že poměr  $R_1/\Delta R_1$  je obvykle menší než 1%, lze přibližně říci, že  $D'_s = D_s$ . Za tohoto předpokladu a za předpokladu, že je můstek vyvážen, neboli  $I_g = 0$  a tedy  $R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4$  lze psát

$$\Delta I_g = \frac{U_b}{D_s} \cdot R_3 \cdot \Delta R_1 \quad (2.68)$$

$$\Delta I_g = konst \cdot \Delta R_1, \quad (2.69)$$

čili změna odporu  $I_g$  je přímo úměrná změně odporu  $\Delta R_1$  tenzometrického snímače.

Jestliže v tomto můstku dojde ke změně odporu  $\Delta R_1$  u tenzometrického snímače 1, pak napětí mezi svorkami D a E je

$$U = U_2 - (U_1 + \Delta U_1). \quad (2.70)$$

Je-li můstek na začátku měření vyvážen, pak  $U_1 = U_2$ . Pak přibližně platí

$$U = -\Delta U_1 = U_b \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1} \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{(R_1 + R_2)^2}, \quad (2.71)$$

pro  $R_1 = R_2 = R$  platí

$$U = U_b \cdot \frac{\Delta R}{4 \cdot R}. \quad (2.72)$$

Při podmínce  $R_1 = R_2$  je změna  $\Delta U_1$  maximální. Tato podmínka bývá při tenzometrických měření splněna, protože jsou do jednoho můstku používány stejné snímače, čili mají i stejný ohmický odpor.

V případě, že dojde ke změně odporu ve dvou větvích můstku, je výstupní signál určen vztahem

$$U = \frac{U_b}{4} \cdot \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right). \quad (2.73)$$

Závěry z těchto výsledků jsou následující.

**Při změně odporu v jedné větvi můstku je změna proudu resp. změna napětí mezi svorkami úměrná této odporové změně.**

**Nastanou-li změny odporu v sousedních (protilehlých) větvích můstku, je výsledný**

signál úměrný rozdílu (součtu) těchto odporových změn.

**Věta 1**

Je-li změna odporů ve dvou sousedních větvích můstku souhlasná (nesouhlasná), je výsledný signál úměrný rozdílu (součtu) těchto odporových veličin.

**Věta 2**

Je-li změna odporů ve dvou sousedních větvích můstku stejně velká a souhlasná (nesouhlasná), je výsledný signál nulový, takže můstek zůstává vyvážen (výsledný signál dvojnásobný).

**Věta 3**

Je-li změna odporů ve dvou protilehlých větvích můstku souhlasná (nesouhlasná), je výsledný signál úměrný součtu (rozdílu) těchto odporových změn.

**Věta 4**

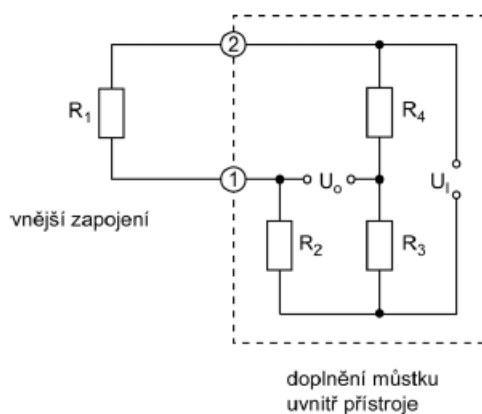
Je-li změna odporů ve dvou protilehlých větvích stejně velká a souhlasná (nesouhlasná), je výsledný signál dvojnásobný (nulový).

		Věta 1 – Věta 2		Věta 3 – Věta 4	
		$\Delta R_1 > 0, \Delta R_2 > 0$	$\Delta R_1 > 0, \Delta R_2 < 0$	$\Delta R_1 > 0, \Delta R_3 > 0$	$\Delta R_1 > 0, \Delta R_3 < 0$
		$\Delta R_1 < 0, \Delta R_2 < 0$	$\Delta R_1 < 0, \Delta R_2 > 0$	$\Delta R_1 < 0, \Delta R_3 < 0$	$\Delta R_1 < 0, \Delta R_3 > 0$
zapojení					
		$\Delta R_1 \neq \Delta R_2$		$\Delta R_1 \neq \Delta R_3$	
$\frac{\Delta R}{R}$		$\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2}$	$\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_2}{R_2}$	$\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_3}{R_3}$	$\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_3}{R_3}$
		$\Delta R_1 = \Delta R_2$		$\Delta R_1 = \Delta R_3$	
		0	$2 \frac{\Delta R_1}{R_1}$	$2 \frac{\Delta R_1}{R_1}$	0

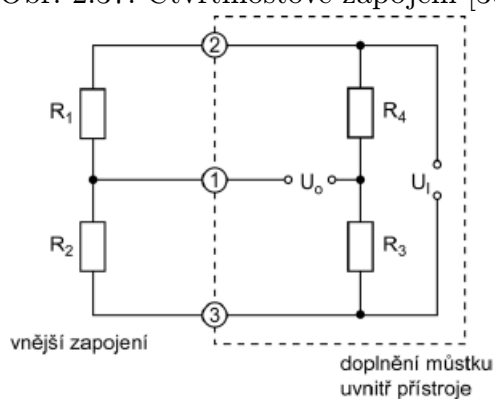
Obr. 2.36: Grafická a číselná interpretace uvedených vět [9]

Výstupní signál z můstku musí být obvykle pro další zpracování zesílen.

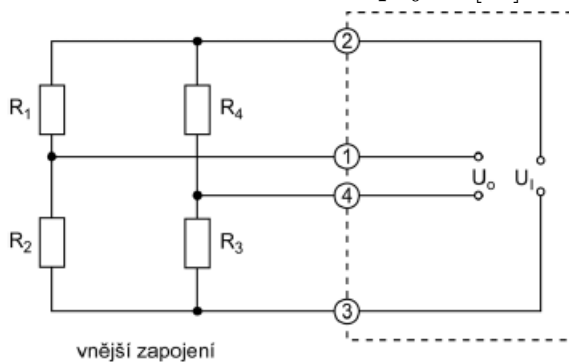
Wheatstonův můstek je možno zaplnit tenzometrickými snímači třemi způsoby. Může se jednat o zapojení čtvrtmostové (obr. 2.37) (1 tenzometr), půlmostové (obr. 2.38) (2 tenzometry nebo plnomostové (obr. 2.39) (4 tenzometry).



Obr. 2.37: Čtvrtmostové zapojení [30]

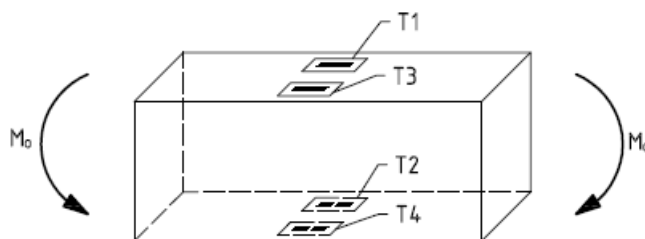


Obr. 2.38: Půlmostové zapojení [30]



Obr. 2.39: Plnomostové zapojení [30]

Jak již bylo zmíněno výše, zub ozubeného kola je namáhán na ohyb, proto je pro přehlednost žádoucí vybrat pouze možnosti umístění tenzometrů pro zatížení ohybem.



Obr. 2.40: Zatížení ohybem [7]

Složky poměrné deformace vyskytující se v tomto druhu zatížení jsou:

$\varepsilon_N$ ... deformace způsobená normálovou silou

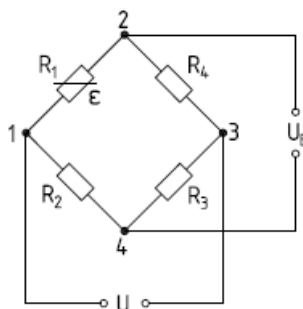
$\varepsilon_Z$ ... zdánlivá deformace (pouze u tenzometru, který není teplotně samokompenzován)

$\varepsilon_{M_0}$ ... deformace způsobená ohybem

### A) Čtvrtmostové zapojení - připojen tenzometr T1

Můstek není teplotně kompenzován a není eliminován případný tah.

$$\varepsilon = \varepsilon_N + \varepsilon_{M_0} = \frac{4}{k} \cdot \frac{U}{U_b} - \varepsilon_Z \quad (2.74)$$

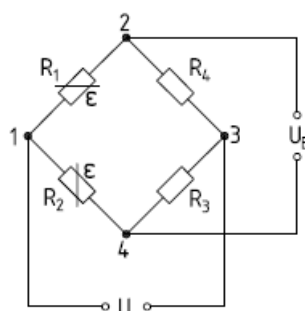


Obr. 2.41: Čtvrtmostové zapojení [7]

**B) Půlmostové zapojení - připojeny tenzometry T1 a T2**

Můstek je teplotně kompenzován a je eliminován případný tah.

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{k} \cdot \frac{U}{U_b} \quad (2.75)$$



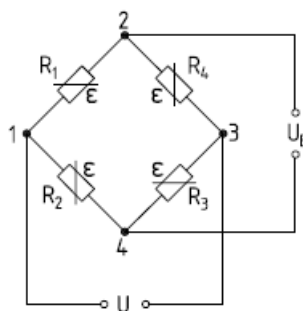
Obr. 2.42: Půlmostové zapojení [7]

**C) Plnomostové zapojení - připojeny tenzometry T1, T2, T3 a T4**

Můstek je teplotně kompenzován a je eliminován případný tah. U plnomostového zapojení je dosaženo dvojnásobné citlivosti ve srovnání s polovičním mostem.

$$\varepsilon = \frac{1}{4} \cdot \frac{4}{k} \cdot \frac{U}{U_b} \quad (2.76)$$

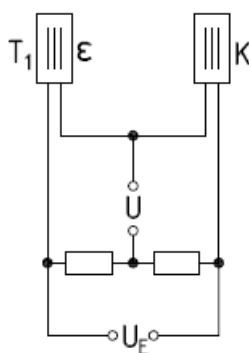




Obr. 2.43: Plnomostové zapojení [7]

### Kompenzační tenzometr

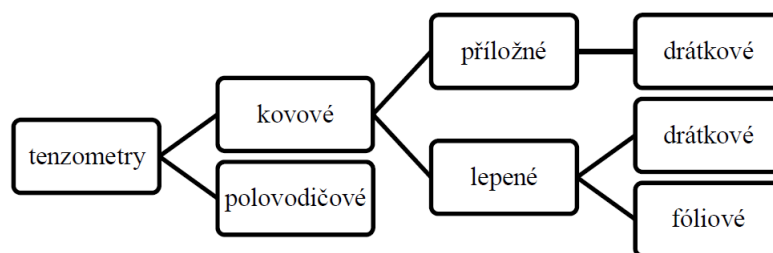
Kompenzační tenzometr lze využít v případě, že bude dosaženo ustálených teplotních poměrů. Jedná se o tenzometr totožný s měřicím. V můstku je zapojen v druhém rameni. Není však mechanicky deformován a změnu odporu vyvolává pouze změna teploty.



Obr. 2.44: Kompenzační tenzometr [7]

### 2.5.3 Dostupná provedení tenzometrů a jejich aplikace

Tenzometry lze jednoduše rozdělit podle schématu na obr. 2.45. Základní rozdělení snímačů je na tenzometry kovové a polovodičové, dále se pak dělí dle způsobu instalace. Kovové jsou pak ještě rozděleny na drátkové a foliové.



Obr. 2.45: Rozdělení tenzometrů [30]

Škála provedení tenzometrů je velice široká. Výrobci poskytují tenzometry různých velikostí, jmenovitých odporů a typů provedení. Tenzometry jsou prováděny pro různé způsoby napjatosti dílů, kdy obsahují více měřících mřížek, které mohou být různě orientovány a mohou se i překrývat. Na základě speciálních požadavků provádějí výrobci i výrobu speciálních snímačů tzv. "na klíč".

Instalací a připojením lze provést rozdělení tenzometrů na tenzometry s vodiči a tenzometry s přípojnými body. Tenzometry s vodiči jsou připojeny na měřící aparaturu v místě ukončení jejich vodičů, a to buď přímo nebo na pájecím poli nebo svorkovnici. Tenzometry s přípojnými body jsou připojeny k měřící aparatuře tak, že přímo na pájecí místa tenzometrů jsou připájeny přívodní vodiče.

## 2.6 Závěry z výsledků řešení

v této kapitole byl rozebrán přehled problematiky týkající se studování zatížení evolventního ozubení, parametrů, které mají na zatížení vliv, způsoby návrhu ozubení, moderní metody navrhování a způsoby určování aktuálního zatížení ozubení. Dílčími výsledky z provedené studie jsou následující body, které vedou ke stanovení dílčích cílů.

- Standardní analytické postupy začínají být nedostatečné a to vzhledem k potřebám průmyslu neustále zlepšovat kvalitu záběru ozubení. Využívají se tedy sofistikovanější postupy zabudované ve výpočetní softwarech a výpočty MKP.

- Existuje a je stále intenzivnější potřeba výrobních firem na ověření provedených návrhů a studium zatížení ozubení.

- V oblasti experimentálních měření je jedním z nejpodstatnějších vlivů sledování distribuce zatížení po šířce ozubení, která má majoritní vliv na hladký chod ozubení (distribuci kontaktních tlaků). Z rešeršní kapitoly vyplývá, že pro převodová ústrojí do těžkého průmyslu a energetiky, čili pro převodovky, které přenášejí velký výkon je z pohledu životnosti, vibrací a hluku ozubení nejdůležitějším parametrem nerovnoměrnosti rozložení zatížení zubu  $K_{H\beta}$ .

- Nepodařilo se 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.**

# Kapitola 3

## Cíle disertační práce

Cíl práce vyplývá z výsledků rešerše (kap.2.6), která je provedena na základě motivace (kap. 1.1) v kapitole 2. Z výsledků rešerše 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 měřící 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,

vzhledem k závěrům uvedených v kapitole 2.6.

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.

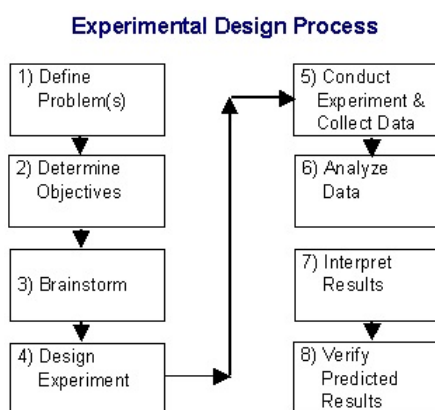
Z hlediska naplnění stanoveného cíle práce z pohledu interpretace získaných experimentálních dat a zobecnitelnosti použité metody je možné definovat potřebné kroky, které se budou opírat zejména o informace shromážděné a prezentované v kapitole 2:

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 planetovém 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.

# Kapitola 4

## Návrh experimentálního měření kvality záběru

Zásadním krokem celé práce je postup, který je nutno dodržet pro správný postup návrhu experimentu. K tomuto se používá pojem známý pod zkratkou DOE (Design of Experiments) [18], volně přeložitelný jako metoda návrhu experimentu (obr. 4.1). Jedná se o analytické vytyčení kroků pro správné otestování kvality produktu. Přínos využití metody je snížení nákladů a časové náročnosti a zvýšení kvality. Popis návrhu experimentu byl publikován v [A1] a [A6].

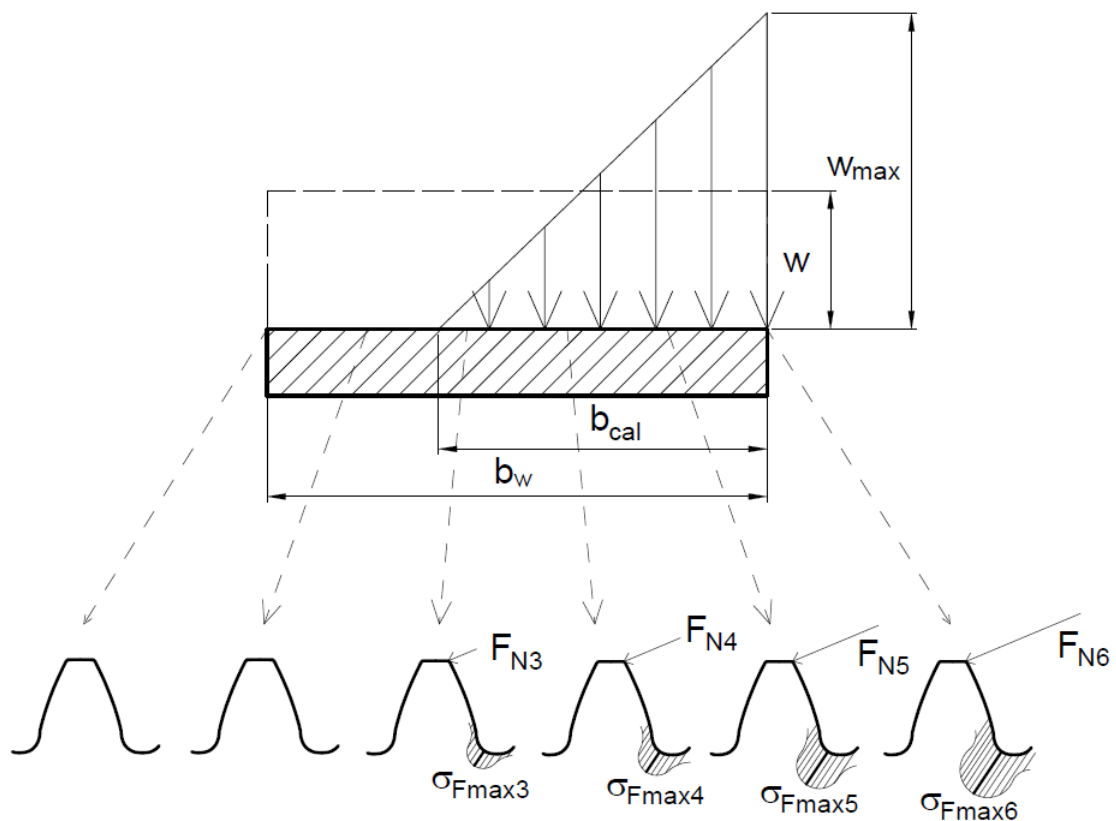


Obr. 4.1: Diagram postupu dle DOE [18]

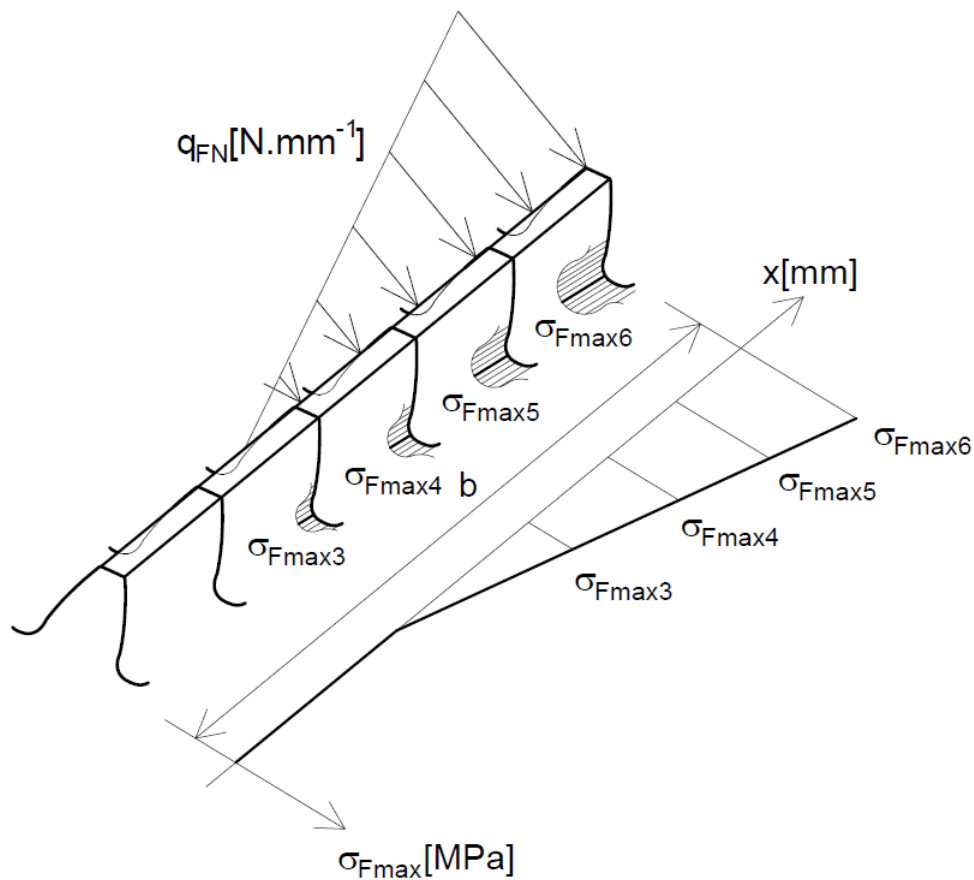
Na základě DOE jsou stanoveny jednotlivé kroky postupu. Návrh experimentálního měření začíná zadáním problému, které již bylo v tomto případě provedeno včetně úvahy nad problematikou a získání základních teoretických východisek pro možnost návrhu. Dále je zapotřebí

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 zuby, které budou sledovat aktuální velikost zatížení po šířce zuby. Rozložení napětí po šířce zuby je patrné z obr. 4.2 a obr. 4.3. Tento obrázek vychází z poznatků uvedených v kapitolách 2.2.2.2 (obr. 2.12) a 2.2.2.4 (obr. 2.20). Rozložení napětí je při nerovnoměrném zatížení v patě zuby v jednotlivých řezech rozdílné.



Obr. 4.2: Rozložení napětí v patě zuby v jednotlivých řezech jeho šířky



Obr. 4.3: 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.

## 4.1 Návrh tenzometrů

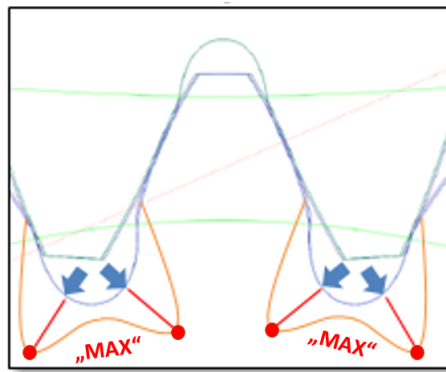
Vzhledem k vlastnostem snímačů, prostorovým možnostem a ekonomickému hledisku bylo přistoupeno k použití odporových tenzometrů, kterým bude dále věnována pozornost. Nicméně případné použití polovodičových tenzometrů není zcela vyloučeno. Výhodou použití polovodičových tenzometrů je získání až 80x větší citlivosti a dosažení menších rozměrů snímačů, nevýhodou je naopak velká teplotní závislost snímačů, která se obtížněji kompenzuje a je pro



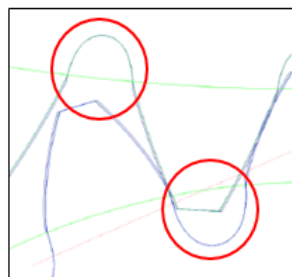
každý kus snímače odlišná.

#### 4.1.1 Volba snímačů

Volba snímače je ovlivněna předpokládanou velikostí napjatosti (resp. deformace) v měřeném místě (obr. 4.4) a prostorovými možnostmi v záběru ozubení (obr. 4.5). Velikost deformace je určena z návrhových výpočtů dle kapitoly 2.2.2. Přesnější metodou je použití výsledků z vhodného návrhového softwaru. Je nutno však uvažovat rozsah zatížení při měření. Běžnou praxí při testování převodovek je rozsah zatížení od 0% až třeba do 130%. I z toho důvodu je nutné volit vhodnou variantu tak, aby při nízkých hladinách zátěže byl tenzometr dostatečně citlivý a zachytil tak s dostatečnou přesností deformaci zubu a zároveň spolehlivě fungoval až do horní hranice zátěže.



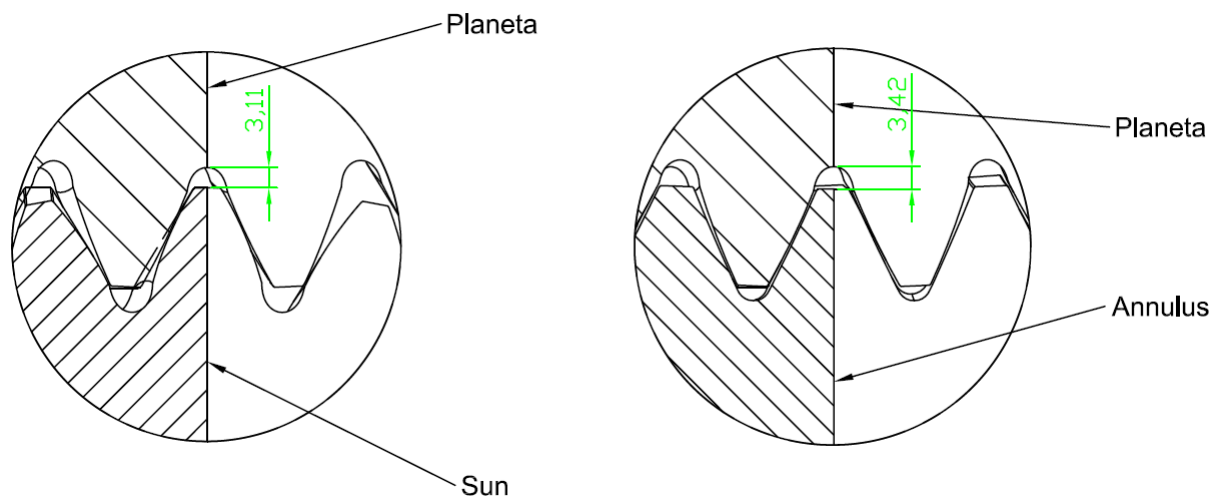
Obr. 4.4: Distribuce napětí v okolí paty zubu a místo instalace tenzometrů [A3]



Obr. 4.5: Příklad výstupu z programu KISSsoft [2]

Rozměry tenzometrů je nutno určit z velikosti zubové mezery dle kapitoly 2.2.1.2. Určení této

mezery je také možno provést na základě informací přímo z návrhového procesu ozubení. Většina softwarů umožňuje export skutečného geometrického stavu záběru kol. To znamená, že určení prostoru pro instalaci tenzometru je přesné a odpovídá reálnému stavu (obr. 4.6). S tím souvisí i určitý způsob utajení parametrů ozubení, které je vyráběno do převodových ústrojí. Výpočet hlavové vůle by bez takovýchto parametrů byl prakticky nemožný. [A4]



Obr. 4.6: Skutečný prostor v záběru ozubení (dodáno výrobcem ozubení) [A4]

Pro měření ohybové deformace zubu je vhodné používat tenzometry pro měření jednoosé napjatosti. Dnes běžně dodává tyto snímače firma HBM. Jedná se o typ tenzometru 1-LY11, které mají dvě možnosti výběru nominálního odporu  $350\Omega$  a  $120\Omega$ . Existuje pak celá řada rozměrů aktivní měřící mřížky od 0,6mm do 10mm.

## 4.2 Instalace tenzometrů

Instalace tenzometrů na bok zubu je z hlediska kvality měření klíčový problém. Následující odstavce popisují metodiku instalace, na které je zcela zásadním krokem použití **instalační folie**. Tento postup dosud nebyl publikován a její použití patří mezi přínosy této práce.

### 4.2.1 Postup lepení

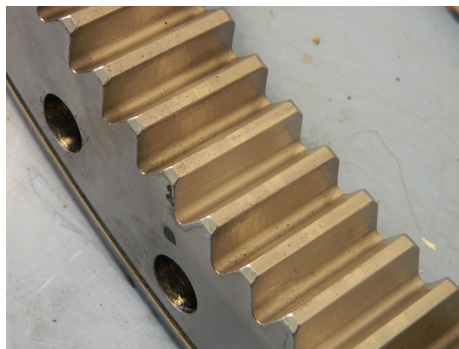
Tenzometr je třeba nainstalovat na sledované zařízení a ochránit před vnějšími vlivy. Samotné instalaci předchází několik operací, které je nutné provést pro správné fungování tenzometru. Velký důraz musí být kladen na sled jednotlivých kroků a zvýšenou pečlivost provádění.

#### 1) Vybavení

Jeden z důležitých úkonů, aby souslednost následujících úkonů probíhala plynule a tenzometr byl správně instalován. Zapotřebí jsou mimo jiné následující nástroje a pomůcky:

- jemný smirkový papír (zrnitost 100 dle doporučení výrobce)
- odmašťovací kapalina RMS1 (HBM), čisticí tampony
- nůžky, pinzeta, samolepicí folie
- tenzometry a lepidlo Z70 (HBM) na jejich nalepení, lepicí pásku, teflonovou a plastovou pásku

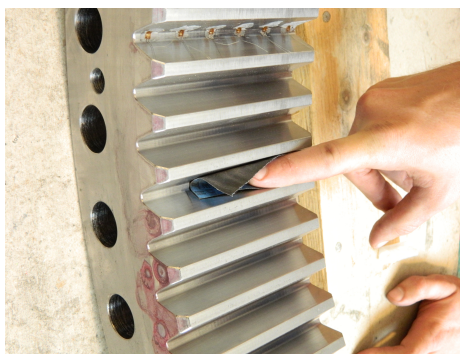
Všechny tyto pomůcky musejí být očištěny. Důležitá je odmaštění rukou, případně použití rukavic. Pomůcky nebezpečné pro zdraví musejí být doplněny o bezpečnostní listy.



Obr. 4.7: Připravené ozubené kolo

#### 2) Příprava kvality povrchu

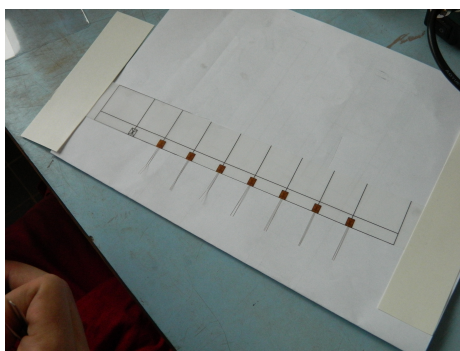
Předpokládá se, že ozubené kolo nebude nikterak znečištěné. Postačí jemným smirkovým papírem vyhladit povrch tak, aby byly odstraněny drobné nerovnosti popřípadě nečistoty. Drsnost je zpravidla udávána výrobcem lepidla a tenzometrů.



Obr. 4.8: Příprava povrchu smirkovým papírem

### 3) Určení místa pro instalaci

Určení místa instalace tenzometrů je provedeno s odvoláním na kapitolu 2.2.2.3. Jakékoliv zásahy do povrchu měřeného místa (rýsování atd.) může mít za následek ztrátu kvality tohoto povrchu. Proto je pro instalaci využita speciální předpřipravená folie.



Obr. 4.9: Umístění tenzometrů na instalační folii

### 4) Odmaštění povrchu

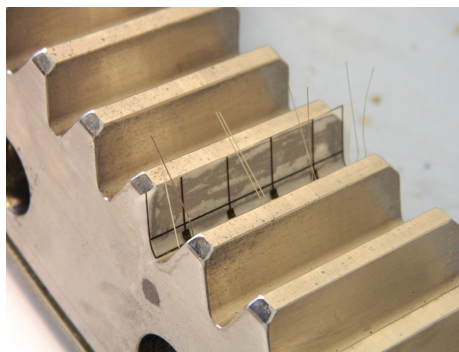
Pomocí čistícího tamponu, který je napuštěn odmašťovací kapalinou RMS1 (od firmy HBM), je odmaštěn povrch.



Obr. 4.10: Odmaštění povrchu

5) Umístění tenzometru na měřené místo

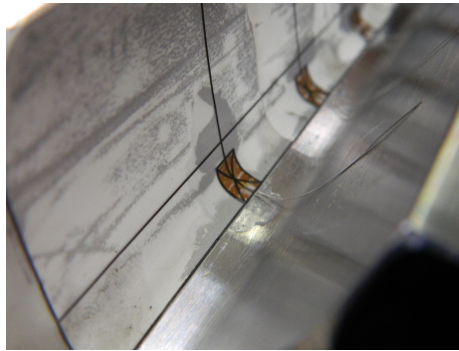
Tenzometr je přiložen horním povrchem (neaktivní částí) na samolepicí folii (detailně řešeno v kapitole 7.2). Pomocí folie jsou tenzometry umístěny do požadované polohy na objekt (obr. 4.11). Tenzometr by neměl přijít do kontaktu s rukou a neměly by na něm ulpívat žádné nečistoty.



Obr. 4.11: Umístění instalační folie na měřený zub

6) Nanesení lepidla

Na jedné části je mírně nadzvednuta folie (kapitola 7.2) s tenzometrem a na zub nanese lepidlo např. Z70 (od firmy HBM). Lepidlo musí být důkladně rozetřeno plastovou páskou na velmi tenkou vrstvu, která musí být pod celým tenzometrem. Při vytvoření silné vrstvy lepidla nedojde k dostatečnému přilepení tenzometru případně může dojít ke zkreslení měření v důsledku jiné deformace vrstvy lepidla.

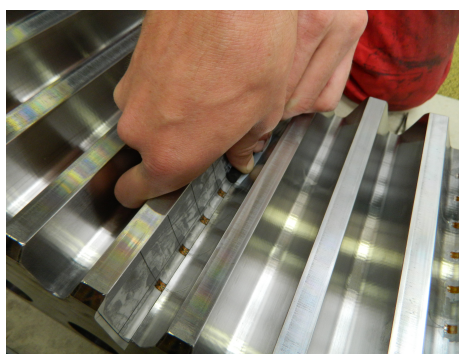


Obr. 4.12: Nanesení lepidla pod tenzometr

### 7) Lepení

Folie s tenzometrem je plynule přiložena na vrstvu lepidla. Poté je přiložena teflonová páska a definovaným tlakem po definovanou dobu podle doporučení výrobce je přitlačen tenzometr a je vymačkáno přebytečné lepidlo. Zároveň nesmějí být pod aktivní částí tenzometru bubliny, které by měly za následek znehodnocení měření. Tlak na tenzometr je vyvíjen potřebnou dobu pro přilepení tenzometru.

Pozn.: Při použití rychle schnoucího lepidla je doba potřebná pro vyvíjení tlaku na tenzometr v řádech desítek vteřin. Při použití epoxidového lepidla je tato doba v řádech hodin, přičemž v prvních minutách po přiložení tenzometru je možná ještě mírná korekce jeho polohy.



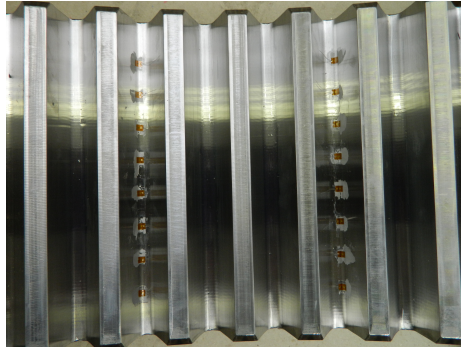
Obr. 4.13: Přitlačení tenzometru na vrstvu lepidla

### 8) Vytvrzení lepidla

Dle výrobce lepidla je stanovena doba pro jeho vytvrzení. U některých lepidel je zapotřebí fixace spoje po dobu vytvrzování.

9) Odstranění fixačních pomůcek

Po vytvrzení odstraníme veškeré fixační pomůcky včetně izolepy. Ta musí být stažena pomalým táhlým pohybem tak, aby nedošlo k poškození tenzometru a jeho drátků.



Obr. 4.14: Přilepené tenzometry na zubech [A4]

10) Připojení vodičů tenzometrů

V návaznosti na použitý typ tenzometrů se připojí signálové vodiče na příslušné pozice. Může se jednat o připojení přímo na tenzometry nebo na pájecí pole umístěné u tenzometrů.



Obr. 4.15: Připojení tenzometrů na pájecí pole

11) Kontrola tenzometru

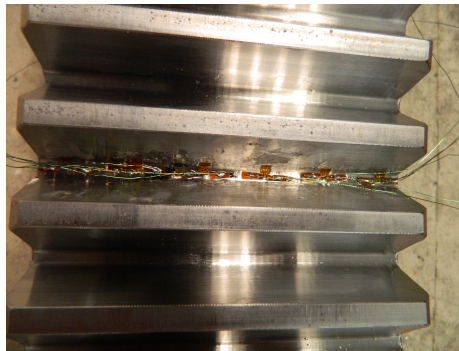
Po nalepení tenzometru, vytvrzení lepidla a případnému připojení jeho vodičů na svorkovnici je důležitá jeho kontrola. Ta se provádí změřením jmenovitého odporu tenzometru. Můžeme tedy odhalit případné poškození aktivní části tenzometru při manipulaci s ním, nebo nežádoucí



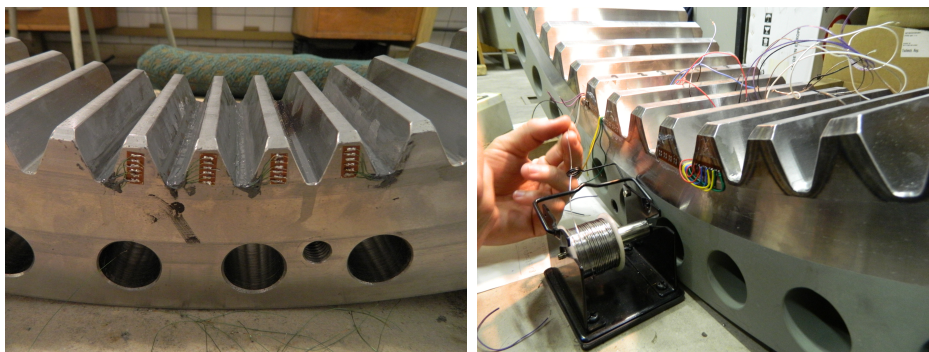
elektrický kontakt s povrchem kola.

### 12) Připojení tenzometru k aparatuře

Po kontrole elektrické funkčnosti tenzometru je možné připojit vodiče k aparatuře. Z důvodu malého prostoru v patě zubu nejsou u zubů s malými moduly použity standardní vodiče, ale pouze lakované vlasce. Pro větší zubové vůle lze použít standardní vodiče. Vodiče je vhodné dále zafixovat, jelikož by mohlo dojít při následné manipulaci k poškození tenzometru. Dále je zapotřebí dokonale vzájemně odizolovat vodivé části.



Obr. 4.16: Připojení přívodních vodičů

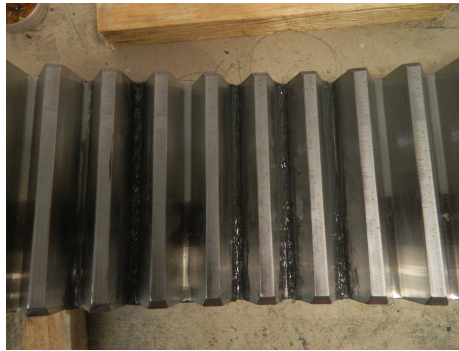


Obr. 4.17: Připojení přívodních vodičů na vnější svorkovnici

### 13) Nanesení ochranné vrstvy

Z důvodu ochrany tenzometru v průběhu provádění experimentu nanášíme vrstvu materiálu na tenzometr (případně i svorkovnici). Používá se lak PU140 (od firmy HBM) a speciální tmel. Důvodem je ochrana před vnějšími vlivy, které by mohli negativně působit při měření.





Obr. 4.18: Ochranná vrstva tenzometrů a vodičů [A3]

V průběhu instalace tenzometrů je účelné tvořit průběžnou fotodokumentaci, která musí obsahovat umístění tenzometrů a zejména jejich zapojení a připojení k ústředně

### 4.3 Zapojení tenzometrů

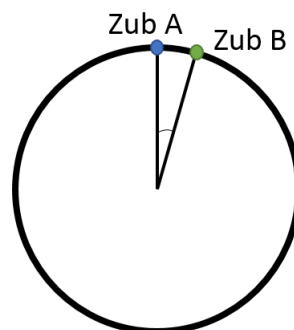
Dalším přínosem této práce je použití **optimalizovaného robustního zapojení tenzometrů**, které minimalizuje možnou ztrátu dat z jednotlivých tenzometrů. Postup jak bylo tohoto zapojení docíleno je popsán v následujících odstavcích.

Zapojení tenzometrů vychází z teoretických poznatků uvedených v kapitole 2.5. Pro měření deformace zubu, čili ohybového napětí je nejvhodnější použít zapojení do čtvrt mostu. Jednotlivé části byly publikovány v [A3], [A7] a [A8].

Otázkou zůstává způsob kompenzace teploty. Vzhledem k očekávaným velkým změnám teploty na zubu a prostoru převodovky je kompenzace teploty nutná. Jelikož je zapotřebí se vypořádat i s tím, že v místě záběru může být okamžitá teplota o desítky °C vyšší než v blízkém okolí. První možností je využití kompenzačních nezatížených kompenzačních tenzometrů umístěných co nejbližší měřenému místu, resp. místu se stejnou teplotou. To je ovšem v ozubení poměrně složitá věc co do prostoru v ozubení (kapitola 2.1.1).

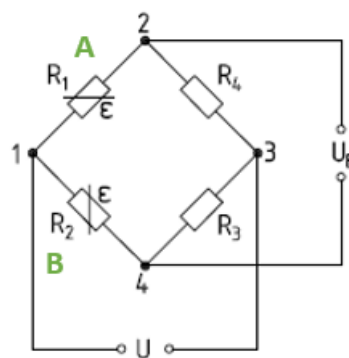
Pro kompenzaci teploty byl tedy stanoven jiný přístup. Ten vychází z použití kompenzačního

tenzometru, který bude umístěn přímo na zubu kola, který ale nebude v momentě zatížení měřeného zubu deformován silovým působením na ozubení. Důvodem je, že vyšší nárůst teploty při kontaktu zubů bude velmi krátkodobý (kapitola 2.2.1.5). Vzdálenost kompenzačního tenzometru udána v počtu zubů od měřeného zubu je závislá na parametrech převodovky a 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.4.19). Ve skutečnosti jsou tak měřeny dva zuby kola. Přičemž je v době záběru aktivní jeden tenzometr (na zubu A), pak tenzometr na zubu B slouží jako kompenzační, a naopak.

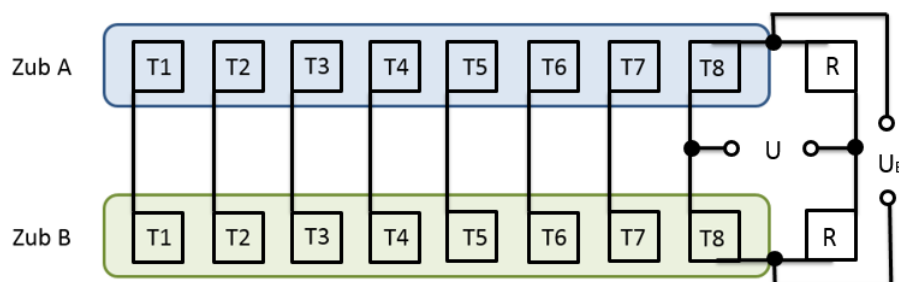


Obr. 4.19: Umístění tenzometrů na ozubené kolo [A3]

Tenzometry jsou pak zapojeny do půlmůstku dle schématu na obr. 4.20. Můstek tedy funguje jako čtvrtmůstek s kompenzačním tenzometrem, kdy dochází ke střídání aktivního měřícího tenzometru podle toho, který zub je aktuálně v záběru. Můstek je do plného mostu doplněn rezistory s odporem, který odpovídá nominálnímu odporu tenzometru. [A8]



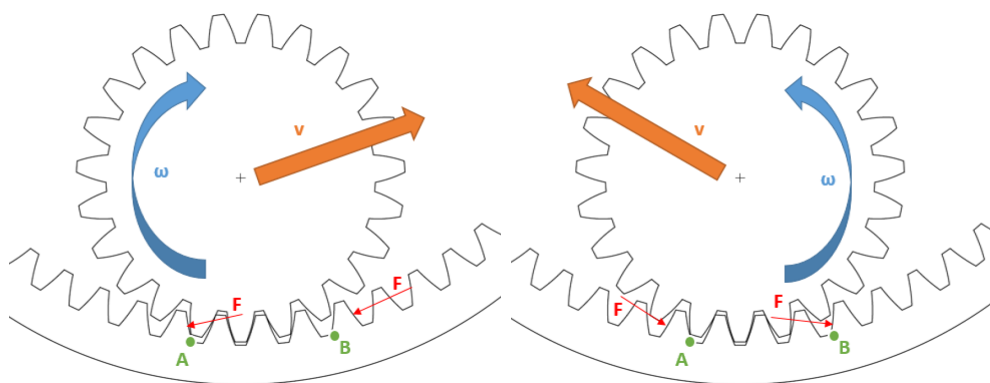
Obr. 4.20: Schéma zapojení do můstku



Obr. 4.21: Umístění tenzometrů na zuby s ukázkou zapojení

Na obr. 4.21 je uveden příklad, kdy na každém zubu je umístěno 8 tenzometrů. Každý pár tenzometrů na stejném místě zubu A a B představuje jeden měřený kanál. Pro toto schéma tedy platí, že je zapojeno 8 měřících kanálů (8 můstků).

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. 4.22. [A3]

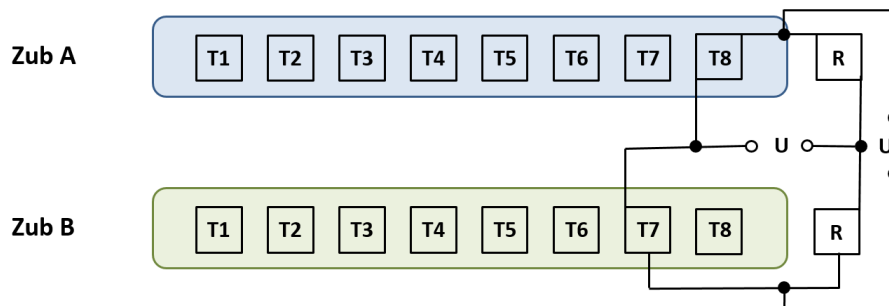


Obr. 4.22: Umístění tenzometrů na korunovém kole - způsob otáčení [A7]

### 4.3.1 Optimalizace zapojení tenzometrů

Na základě zkušeností z prvního měření byla provedena optimalizace zapojení (obr. 4.21) tenzometrů do můstku. Cílem je zvýšení celkové robustnosti zapojení a měřícího celku. Vzhledem k tomu, že může dojít v důsledku neočekávaných vlivů ke ztrátě signálu z některého z tenzometrů, byla provedena úprava zapojení mezi tenzometry na jednotlivých zubech. Toto zapojení

je definováno jako křížové, kdy jsou zapojeny tenzometry do jednotlivých kanálů křížem. Je spojen tenzometr číslo 8 na zubu A s tenzometrem 7 na zubu B a opačně. Tak je to provedeno pro všechny kanály. Tento způsob zapojení je funkční v případě, že je na zubu sudý počet tenzometrů (dále popsáno v kapitole 7.3)



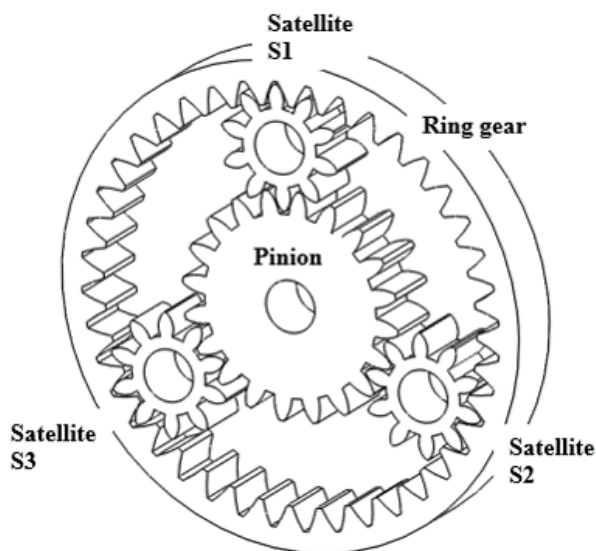
Obr. 4.23: Umístění tenzometrů na zubu s ukázkou optimalizovaného křížového zapojení

## 4.4 Měřicí aparatura

Komplikovanost měření v uzavřeném prostoru převodového ústrojí si vyžádala inovační přístup při návrhu měřicí aparatury. Dále popsáný **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.

### 4.4.1 Měřicí ústředny

Součástí každé měřicí aparatury je i měřicí ústředna. Na trhu je celá řada výrobců s velkou škálou těchto zařízení. Pro představu je možné uvést tři velmi rozšířené výrobce na světovém trhu, jedná se o firmy National Instruments, Kistler a Dewetron. Existuje velká škála typů ústředen, pro potřeby tohoto měření. Lze je rozdělit podle způsobu přenosu a záznamu dat na standardní ústředny s drátovým přenosem dat a ústředny s bezdrátovým přenosem dat (např. s WiFi modulem). Použití ústředen je závislé na kinematice planetové převodovky (obr. 4.24).

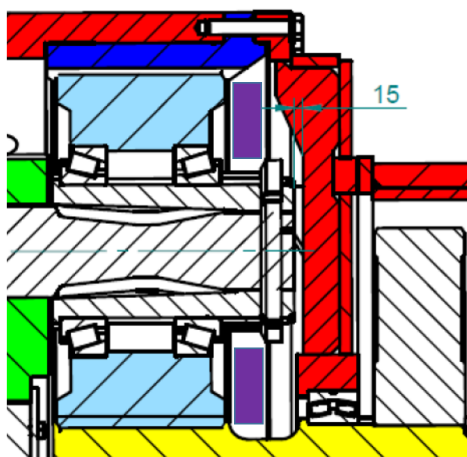


Obr. 4.24: Popis vybraného typu planetové převodky; Pinion=pastorek, Ring gear=korunové kolo, Satellite=satelit (někdy označováno jako planeta) [A5]

Vzhledem k typu měření je zřejmé, že měření s ústřednou se standardním drátovým přenosem je možné pouze na statických částech převodovky - statických ozubených kolech tak, aby bylo možné ústřednu napájet a propojit s vodiči z tenzometrů. Statická kola převodovek jsou nejčastěji korunová kola planetových převodovek a to pouze u některých typů. Případně lze užít sběrné kroužky, které však mají pro tento typ omezující podmínky.

Na rotující prvky je možné instalovat pouze měřící ústředny s vlastním zdrojem elektrické energie a bezdrátovým přenosem dat. Tento typ ústředny je vhodné použít tam, kde je dostatečný prostor pro jejich instalaci, což ovšem ve spojení s průmyslovou převodovkou a rozměry vyráběných ústředny velmi často nebývá možné. Proto vznikl požadavek na vývoj vlastní autonomní měřící ústředny.

Protože měření v ozubení má být připraveno univerzálně a zejména pak pro planetové převodovky, jsou průmyslově vyráběné ústředny uvnitř nepoužitelné, zejména co do jejich rozměrů. Planetové převodovky jsou konstruovány s velmi malým prostorem pro instalaci jakýchkoliv dalších objektů (obr. 4.25).



Obr. 4.25: Prostor pro umístění aparatury (značen fialově)

Navíc kinematika jednotlivých kol, nejčastěji satelitů, neumožňuje jiný přístup, než užití autonomní ústředny. Proto byla na základě stanovené specifikace vyvinuta autonomní ústředna uváděná jako ”**datalogger**” (popsáno v následující kapitole).

V případě potřeby je měřicí ústředna ještě doplňována o zesilovače. Pro každý kanál je použit zesilovač např. typ 9236 pro tenzometrické snímače od firmy Burster (obr. 4.26) s krytím IP67, který je vhodný svými rozměry a odolností. Nicméně, každý takovýto prvek v okruhu aparatury může vnášet chybu, **potřebuje určitou energii**, proto, pokud je to možné, je snaha se užití zesilovače vyhnout.



Obr. 4.26: Zesilovač typ 9236 od firmy Burster (převzato od výrobce)

#### 4.4.2 Autonomní datalogger

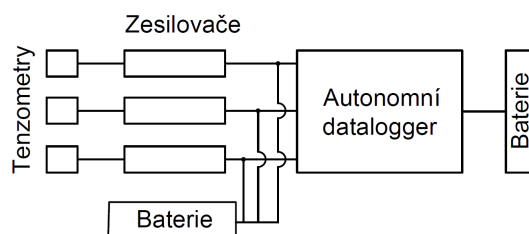
Ve spolupráci s firmou CleverTech s.r.o. byla vyvinuta již zmíněná autonomní ústředna. Jedná se o zařízení, které obsahuje vlastní zdroj energie (baterie) a vlastní záznamové médium pro ukládání dat, případně ještě modul pro příjem a vysílání dat. Jedná se o 8-kanálový datalogger pracující s nastavitelnou vzorkovací frekvencí maximálně 6000 Hz/kanál v návaznosti na

kapitolu 2.2.1.5. Jedná se kompaktní zařízení o rozměrech 56 x 44 x 10 mm, které ke své činnosti potřebuje pouze Li-ion akumulátor s JST konektorem. Datalogger zaznamenává signály v rozmezí  $\pm 3$  V, které převádí pomocí integrovaného obvodu ADS1294 od Texas Instruments. Srdcem je mikrokontrolér LPC1759 od firmy NXP, který navzorkované signály ukládá na  $\mu$ SD kartu v binárním kódu, z důvodu úspornosti místa. Data jsou rozdělena po cca 3MB souborech, aby byla zajištěna minimální ztráta dat při odpojení napájení i v průběhu měření.

**Autonomní datalogger je jedním ze zásadních přínosů této práce.** Datalogger byl vytvořen firmou CleverTech na základě daného impulzu potřeby tohoto typu ústředny a specifikaci parametrů, které byly vytyčeny.

### Datalogger s 12 bitovým převodníkem

Datalogger s 12 bitovým převodníkem byl první vyvinutým nástrojem pro tento druh experimentu. Při využití toho zařízení je nutné v měřící aparatuře použít zesilovače. Schéma měřící ústředny je znázorněné na obr. 4.27.

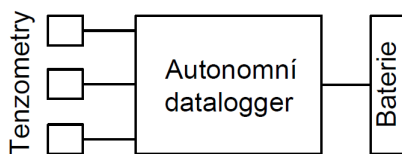


Obr. 4.27: Blokové schéma se zesilovači

Pro datalogger s 12 bitovým převodníkem platí, že má  $2^{12} = 4096$  kvantovacích úrovní. Referenční napětí je 3V. Jeden kvantovací krok je tedy  $3000mV/4096 = 0,7324mV$ .

### Datalogger s 24 bitovým převodníkem

Datalogger s 24 bitovým převodníkem byl další verzí tohoto zařízení. Při využití toho zařízení není nutné v měřící aparatuře použít zesilovače, zejména u polovodičových tenzometrů. Schéma měřící ústředny je znázorněné na obr. 4.28.



Obr. 4.28: Blokové schéma bez zesilovačů

Pro datalogger s 24 bitovým převodníkem platí, že má  $2^{24} = 16777216$  kvantovacích úrovní. Referenční napětí je 3V. Jeden kvantovací krok je tedy  $3000mV/16777216 = 0,1788\mu V$ , což je o tři řády lepší hodnota než u datalogger s 12 bitovým převodníkem. Je tedy zřejmé, že tento datalogger má daleko menší kvantovací krok a nepotřebuje navíc doplnění o externí zesilovače.

Datalogger může být bezdrátově ovládán a vysílat a přijímat data pomocí RF modulu pracujícího na frekvenci 868 MHz. Připojení tohoto bezdrátového modulu zvyšuje spotřebu loggeru na 160 mA. Pomocí vzdáleného ovládání je možné datalogger vypnout a zapnout, respektive jej převést do režimu spánku, ve kterém je spotřeba cca 6 mA. Všechny hlavní parametry jsou uspořádány v následující tabulce. Veškeré parametry jsou přímo úměrné potřebnému a využitému počtu kanálů.

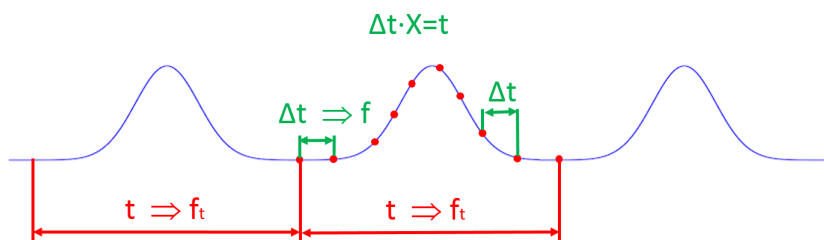
Parametr	Hodnota
Rozměry	56 x 44 x 10 mm
Hmotnost	50 g (bez baterií)
Vzorkovací frekvence	max 6000Hz/kanál
Počet kanálů	8
Rozlišení převodníku	12 bit / 24 bit
Napájení můstku $U_E$	+3V
Rozsah převodníku	$-U_E$ až $+U_E$
Datový formát	csv
Maximální velikost jednoho souboru	2,7 MB
Maximální počet souborů	255
Kapacita paměťového média	4 GB
Kapacita záznamu	cca 30 hod
Spotřeba	160mA
Výdrž	až 120 hod (akumulátor 10 x 2000mAh)

Tabulka 4.1: Parametry dataloggeru



### 4.4.3 Nastavení parametrů aparatury

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. 4.29: Vzorkovací frekvence

Stanovení vzorkovací frekvence vychází z výše vypočtené doby záběru určené v kapitole 2.2.1.5. Doba záběru  $t$  je doba po kterou dochází teoreticky k zatížení zubu. Tento záběr zubu se v naměřených datech objevuje s přesně danou frekvencí  $f_t$ , což je graficky zobrazeno na obr. 4.29 a dáno jednoduchým vztahem

$$f_t = \frac{1}{t}. \quad (4.1)$$

Vzorkovací frekvence je dále určena počtem vzorků - bodů, kterými je měřený signál popsán. Počet těchto bodů je označen proměnou  $X$ . Pro dostatečný popis této křivky je minimální počet bodů  $X = 50$ , což vyplynulo ze zkušeností z provedených měření (dále popsáných). Výsledná vzorkovací frekvence  $f$  je tedy dána vztahem

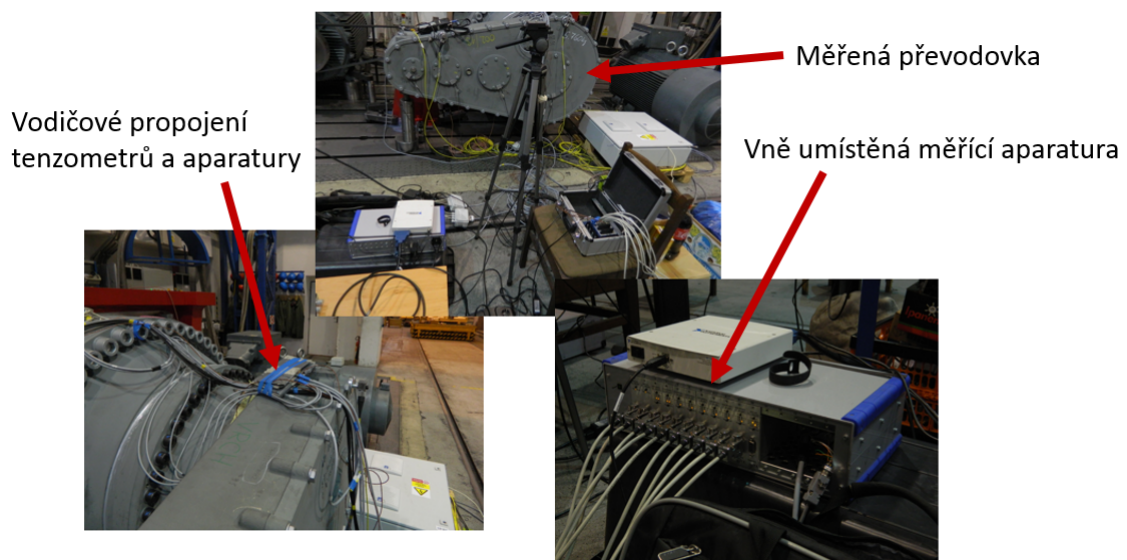
$$f = f_t \cdot X \quad (4.2)$$

a po dosazení vztahu 4.1 je

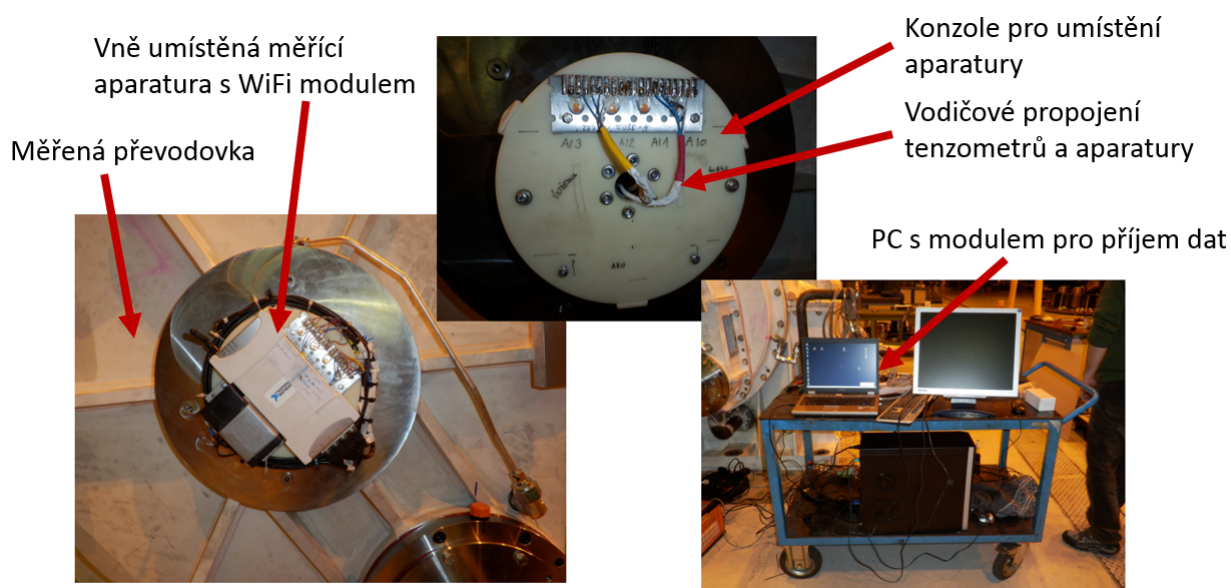
$$f = \frac{1}{t} \cdot X. \quad (4.3)$$

#### 4.4.4 Zástavba aparatury

Umístění aparatury je vždy závislé na dané aplikaci s odkazem na kapitolu 4.4.1. Záleží na zástavbovém prostoru kolem měřeného místa a na tom, zda je měřené místo statické nebo se pohybuje. V případě statických aplikací je možno provést drátové propojení mezi měřeným místem a statickou měřicí aparaturou umístěnou vně převodovky (obr. 4.30). V případě, že se jedná o pohyblivé kolo, je nutno posoudit zástavbový prostor pro možnosti umístění ústředny. Jedna z možností je uvedena na obr. 4.31. Zde je měřeno ozubení pastorku, kde lze po menší úpravě a výrobě držáku provést instalaci ústředny s WiFi modulem přímo na pastorek. Ústředna tak rotuje s pastorkem a přes WiFi vysílá naměřená data přes přijímač do počítače. [A6]



Obr. 4.30: Měření statického kola s vně umístěnou ústřednou (měřená převodovka, instalace vodičů, měřicí ústředna Devetron a National Instruments)

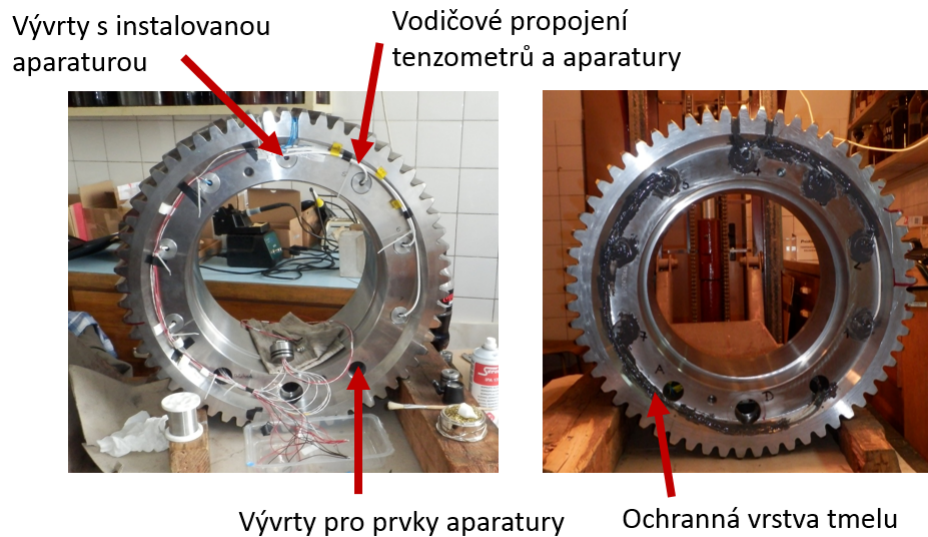


Obr. 4.31: Měření ústředny na měřeném rotujícím pastorku vně převodové skříně (měřená převodovka, instalace vodičů a pájecích polí, měřící ústředna National Instruments s Wi-Fi modulem, počítač pro záznam dat

Většina ozubených kol je ovšem v převodové skříně zabudována tak, že není možnost na ně umístit standardní ústřednu, pro tyto případy byl vytvořen datalogger popsáný v kapitole 4.4.2. Jelikož datalogger umožňuje vlastní záznam dat, případně vysílání dat přes rozměrově malou anténu, může být umístěn do daleko menšího zástavbového prostoru. Umístění lze rozdělit na dva případy, invazivní způsob zabudování a umístění vně kola uvnitř převodové skříně.

#### 4.4.4.1 Invazivní způsob umístění aparatury

Případ, kdy je ústředna spolu s bateriemi s zesilovači umístěna invazivně je zobrazen na obr. 4.32. Do ozubeného kola (v tomto případě satelitu) jsou provedeny vývrty. Do těchto vývrvtů je umístěna izolační hmota do které jsou jednotlivé komponenty zasunuty. Jedná se o datalogger, zesilovače a baterie. Vývrty jsou zakryty zátkami, které jsou následně utěsněny tmelem. Vodiče propojující tenzometry s aparaturou ve vývrtech jsou vedeny otvory v zátkách, které jsou také utěsněny tmelem. Vodiče jsou z paty zubu taženy po obvodu čela kola. Veškeré komponenty umístěny vně vývrvtů (jedná se především o vodiče) jsou následně přetřeny ochrannou vrstvou tmelu.

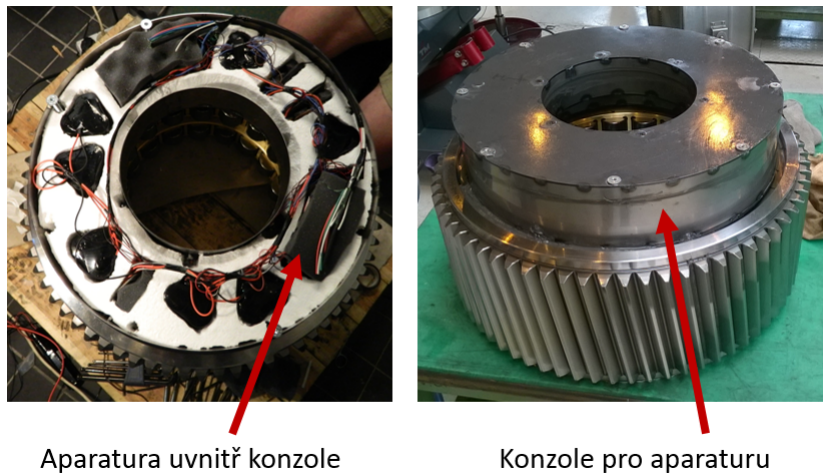


Obr. 4.32: Umístění ústředny do vývrtů ozubeného kola (na levé straně propojení vodiči, na pravé straně již s ochrannou vrstvou tmelu)

#### 4.4.4.2 Vnější umístění aparatury

Další možností, a to v případě dostatečného zástavbového prostoru, je umístění komponent aparatury do speciální na míru vyrobené konzole, která je umístěna na bok kola. Zpravidla se jedná o svařenec přizpůsobený rozměrům zástavbového prostoru a montážním prvkům na kole.

Do vyrobené konzole je umístěna vrstva izolačního materiálu. Pomocí 3D tiskárny na plast jsou vyrobeny jednotlivé pomocné konzole pro jednotlivé komponentami, které se spolu s těmito komponenty (datalogger, zesilovače a baterie) umisťují do izolačního materiálu. Následně je provedeno propojení mezi tenzometry a komponenty aparatury v konzole. Nakonec je provedeno uzavření konzoly a její zatěsnění tmelem, stejně tak jako nanesení ochranné vrstvy tmelu na další komponenty, zejména vodiče.



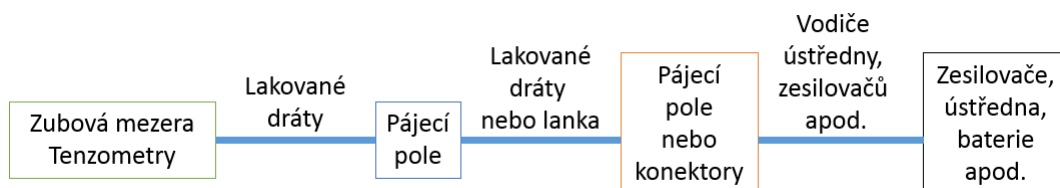
Obr. 4.33: Umístění ústředny do konzole na ozubeném kole

Ve všech případech je však třeba zajistit vhodný prostor pro umístění antén apod.

Veškeré prvky určené pro umístění aparatury uvnitř převodové skříně musí být chráněny vůči agresivnímu prostředí uvnitř skříně, jedná se o mazací médium, které je navíc značně zahřáté.

#### 4.4.5 Vodiče a jejich instalace

Propojení tenzometrů s měřicí aparaturou musí být zejména v zubové mezeře provedeno vhodnými vodiči. První hledisko je prostor v patě zubu pro instalaci vodičů, druhé hledisko je teplota a agresivita prostředí v převodové skříně. Z těchto pohledů lze volit tři typy vodičů, klasické vodiče s PVC izolací, lankové vodiče s teflonovou izolací a lakované drátové vodiče. Rozhodujícím parametrem je i způsob instalace vodičů z důvodu jejich poddajnosti. Způsoby užití drátkových a lankových vodičů jsou prezentovány na obr. 4.34.



Obr. 4.34: Schéma použití vodičů

Pro aplikace do ozubení s malou patní vůlí je nejvhodnější užití lakovaného měděného drátku, které mají celkový průměr dle vybraného typu v řádu desetin milimetru. Klasické vodiče s PVC izolací lze vhodně využít do míst, kde je pro ně dostatečný prostor a není velký nárok na teplotní vlivy a agresivitu prostředí. Vodiče s teflonovou izolací jsou vhodné pro místa se zvýšenou teplotou.

Pro ochranu vodičů před agresivním mazacím médiem uvnitř převodové skříně a jeho teplotou je používán speciální druh epoxidu odolný právě těmito vlivům. Na vodiče je nanášena ochranná vrstva tohoto epoxidu a to i do paty zubu, opět s ohledem na patní vůli.

#### 4.4.6 Napájení

Standardní způsob napájení měřicí aparatury je prováděn ze zdroje elektrické energie přes transformátor, který změní velikost napětí na požadovanou hodnotu. Napětí je tak přivedeno z elektrické rozvodné sítě pomocí vodičů. V případě měření na stupních planetové převodovky je nutno zajistit jiný zdroj napětí. Tím jsou v tomto případě baterie. Důležitým krokem při návrhu kapacity baterií je striktní dodržení stálé hladiny hodnoty elektrického napětí. To vychází ze samotné rovnice pro můstkové zapojení, kdy je nutno pracovat s konstantou napájecího napětí. V případě, že by nebyla dodržena konstantní hodnota napájecího napětí, došlo by ke ztrátě citlivosti můstku a ke zkreslení následně vypočtených hodnot.

Potřebná kapacita baterií závisí na počtu kanálů a jejich vzorkovací frekvenci příslušného dataloggeru. Datalogger má spotřebu, která se skládá ze spotřeby mikroprocesoru 100mAh, bezdrátového vysílacího modulu 75mAh a zbylých komponent 20mAh. Celkem je tedy na hodinu provozu dataloggeru s určitou bezpečností nutnou požit baterii s kapacitou 200mAh.

# Kapitola 5

## Provedení experimentů

Za účelem verifikace navržené metodiky v kapitole 4 a dalšího zpřesnění teoretických výcho-  
disk, 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 zábehových zkoušek převdovek na měřících  
stendech ve zkušební laboratoři výrobce. Experimenty jsou v této kapitole řazeny chronologicky.  
Detailní popis procesu zpracování dat a jejich interpretace je z důvodu lepší přehlednosti textu  
řazen v samostatné kapitole. Konkrétní výsledky chování ozubených kol v záběru jsou uvedeny  
samostatně v přílohách této práce.

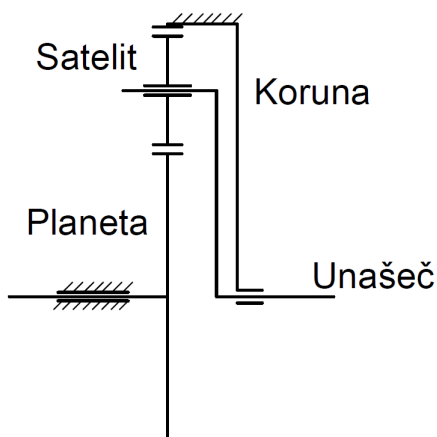
### 5.1 Měření I

První měření bylo provedeno na planetové převodovce s centrálním hnacím kolem, se zabrzdě-  
ným korunovým kolem a trojicí satelitů dle schématu obr. 5.1 s přímým ozubením.

#### 5.1.1 Účel měření

Cílem bylo ověřit kvalitu konstrukce, která dokáže flexibilně reagovat na zatížení převodovky  
a tím udržovat ideální rovnoměrnost záběru ozubení.





Obr. 5.1: Schéma planetové převodovky

### 5.1.2 Vstupní informace

Výběr typu tenzometrů, způsob a pozice jejich instalace, nastavení vzorkovací frekvence, volba počtu kanálů a způsob umístění měřicí aparatury byl proveden v návaznosti na teoretická východiska uvedená v kapitole 2 a na podklady od výrobce převodovek ohledně geometrie ozubení, otáčček, převodových poměrů a zatížení ozubení.

### 5.1.3 Instalace

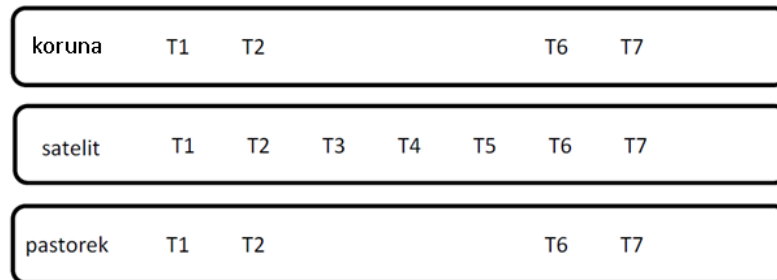
Sady drátkových tenzometrů od firmy HBM byly umístěné na zuby korunového kola, pastorku a jednoho satelitu dle obr. 5.2 a schématu na obr. 5.3. Na korunovém kole a pastorku byl vždy měřen pouze jeden zub. Zapojení tenzometru tak bylo provedeno do čtvrt mostu s kompenzačním tenzometrem na samostatné destičce. Na satelit byly tenzometry umístěny na dva zuby, zapojení těchto tenzometrů bylo provedeno do půl mostu tak, že deformaci aktivně snímal vždy jeden tenzometr a druhý byl v tu chvíli jako kompenzační. Tenzometry nebyly zapojeny křížově, ale spojeny byly vždy tenzometry na stejném místě zubů dle schématu v kapitole 4.3. Měřicí místa jsou záměrně na jednotlivých kolech v zákrytu, aby bylo možné vzájemným porovnáním validovat jednotlivě naměřené hodnoty.





Obr. 5.2: Pastorek, satelit a korunové kolo s instalovanými tenzometry

Tenzometry i kabeláž byly před vlivy okolního prostředí chráněny vrstvou epoxidové pryskyřice.



Obr. 5.3: Schéma rozmístění tenzometrů na zuby kol [A3]

#### 5.1.4 Instrumentace

Pro bezpečné zajištění relevantních použitelných dat bylo měření prováděno synchronně na koruně, satelitu a pastorku třemi autonomními systémy (obr. 5.4). K měření na koruně byla využita čtyřkanálová stabilní měřicí stanice National Instruments. Pro měření na satelitu byl použit vyvinutý datalogger 1. generace se zesilovači Burster. Data z pastorku byla zaznamenávána čtyřkanálovou ústřednou National Instruments s Wi-Fi modulem pro in-time přenos dat do počítače.

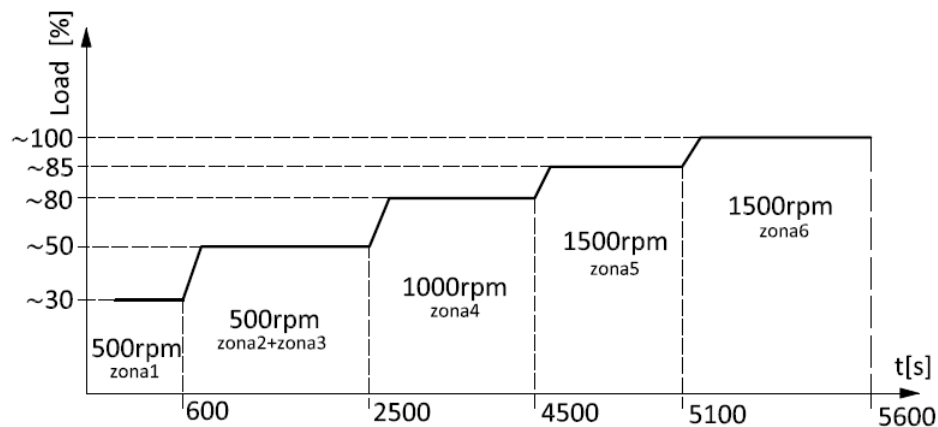


Obr. 5.4: Datalogger a systém měřicího zařízení pro ústředny National Instruments

S ohledem na předpokládanou dobu trvání záběru ozubení, byla snímací frekvence záznamu nastavena na 2000 Hz. Společně s tenzometrickým měřením probíhalo sledování teploty v ozubení na koruně a satelitu se vzorkovací frekvencí 10 Hz.

### 5.1.5 Protokol měření

Měření bylo realizováno v několika fázích (zónách) dle obr. 5.5, které na sebe plynule navazovaly. Záznam dat probíhal nepřetržitě.



Obr. 5.5: Fáze měření [A1]

### 5.1.6 Metodika zpracování a vyhodnocení dat

Program pro záznam a zpracování dat byl vytvořen v prostředí softwaru LabView. K finálnímu vyhodnocení byl využit software Matlab.

### 5.1.7 Závěr

V průběhu měření došlo k poškození aparatury na koruně a satelitu, které způsobilo ztrátu signálu nebo nestabilní odezvu tenzometrů. Právě tento fakt byl impulsem pro návrh zapojení dle obr. 4.23 v kapitole 4.3.1. Je tedy nutno brát větší zřetel na zubovou mezeru. Použitá data z pastorku poskytla relevantní údaje. Z výsledků tohoto měření byly patrné některé neočekávané jevy, jako například oscilace dat, které jsou popsány v kapitole 6. Dílčí výsledky byly publikovány v [A1].

Detailní výsledky jsou uvedeny v příloze A.

## 5.2 Měření II

Druhé měření bylo provedeno na planetové převodovce s centrálním hnacím kolem, se zabrzděným korunovým kolem a trojicí satelitů dle stejného schématu jako na obr. 5.1 s přímým ozubením, se třemi stupni s moduly 5mm; 8mm a 15mm.

### 5.2.1 Účel měření

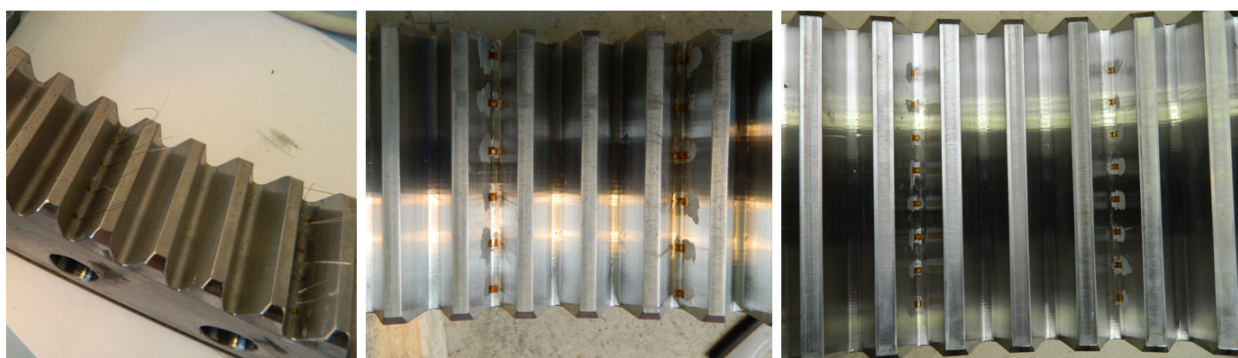
Cílem bylo monitorování rovnoměrnosti rozložení zatížení po šířce ozubení v průběhu záběru s okolními koly převodovky.

### 5.2.2 Vstupní informace

Stejně jako tomu bylo u předchozího měření byl výběr typu tenzometrů, způsob a pozice jejich instalace nastavení vzorkovací frekvence, volba počtu kanálů a způsob umístění měřicí aparatury proveden v návaznosti na teoretická východiska uvedená v kapitole 2 a na podklady od výrobce převodovek ohledně geometrie ozubení, otáček, převodových poměrů a zatížení ozubení. Pro každý převodový stupeň se jednalo o různý modul, tudíž byl každý stupeň řešen zvlášť. Nastavení měřicí ústředny bylo provedeno na základě informací o frekvenci záběrů měřených zubů korun s jednotlivými satelity.

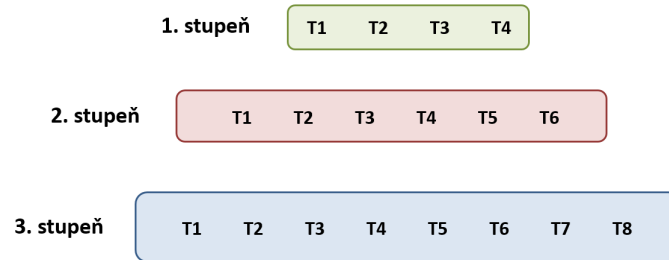
### 5.2.3 Instalace

Sady drátkových tenzometrů od firmy HBM typ LY11/120 velikostí 0.3, 0.6 a 1.5 pro jednotlivé stupně byly umístěné na zuby třech korunových kol (obr. 5.6) dle schématu na obr. 5.7. Na všechna korunová kola byly tenzometry umístěny na dva zuby, zapojení těchto tenzometrů bylo provedeno do půl mostu tak, že deformaci aktivně snímal vždy jeden tenzometr a druhý byl v tu chvíli jako kompenzační. Tenzometry nebyly zapojeny křížově, ale spojeny byly vždy tenzometry na stejném místě zubů dle schématu v kapitole 4.3.



Obr. 5.6: Tenzometry na jednotlivých korunových kolech

Tenzometry i kabeláž byly před vlivy okolního prostředí chráněny vrstvou epoxidové pryskyřice.



Obr. 5.7: Schéma rozmístění tenzometrů na zuby kol

### 5.2.4 Instrumentace

Střídavě bylo zkoumáno tahové a tlakové napětí ve dvou patách zubů na každém korunovém kole. K měření na koruně byla využita čtyřkanálová stabilní měřicí stanice National Instruments a stanice firmy Dewetron, obě bez nastavených hardwarových filtrací signálu (obr. 5.8).

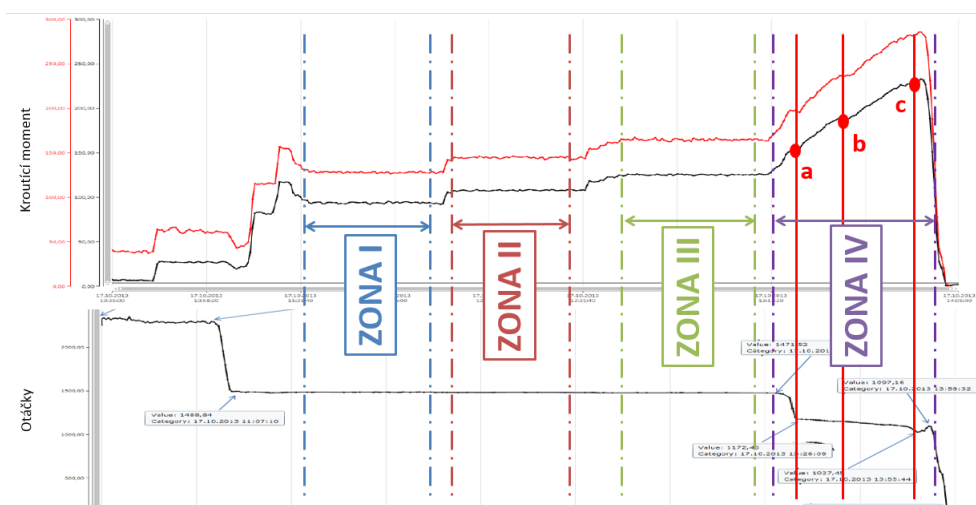


Obr. 5.8: Systém měřícího zařízení pro ústředny National Instruments

S ohledem na předpokládanou dobu trvání záběru ozubení, byla snímací frekvence záznamu nastavena na 1000 Hz. Byly použity následující velikosti tenzometrů: 0,3 mm – Koruna 1; 0,6 mm – Koruna 2; 1,5 mm – Koruna 3.

### 5.2.5 Protokol měření

Měření bylo realizováno v několika fázích (zónách) dle obr. 5.9, které na sebe plynule navazovaly. Záznam dat probíhal nepřetržitě.



Obr. 5.9: Fáze měření

### 5.2.6 Metodika zpracování a vyhodnocení dat

Program pro záznam a zpracování dat byl vytvořen v prostředí softwaru LabView. K finálnímu vyhodnocení byl využit software Matlab.

### 5.2.7 Závěr

Tenzometry byly zapojeny tak, aby byla sledována hodnota tahového a tlakového napětí v patě zubů a zároveň bylo dosaženo teplotní kompenzace. Výsledný průběh zatížení byl rozdělen na tlakovou a tahovou část.

Rovnoměrnost zatížení je monitorována sledováním signálů z jednotlivých tenzometrů. Kromě korunového kola č.1, kde byl bez odezvy tenzometr T2, a korunového kola č. 2, kde byl bez odezvy tenzometr T4, byla funkční všechna měřící místa.

Vyhodnocení bylo provedeno pro 4 zóny (Zona I, Zona II, Zona III a Zona IV). V zónách I, II a III byly zprůměrovány hodnoty průběhů záběrů v delším čase (v ustáleném provozním stavu zóny). V další zóně (Zona 4) byla vybrána tři místa (a, b, c). V těchto bodech byl použit pouze

jeden záběr v daném čase. Pro všechna tři korunová kola byl v každé zóně stanoven koeficient  $K_{h,\beta}$ .

Tímto měřením proběhlo opětovné ověření navržené metodiky, použité při prvním měření. Na základě měření na různých stupních s různými moduly, bylo dále zjištěno, že limitním modulem pro užití klasických foliových tenzometrů je modul 5mm, pro tento modul lze ještě provést v celku kvalitní instalaci. Pro menší moduly by muselo být přistoupeno k užití jiných druhů tenzometrů, kterým by zároveň vyhovovala patní vůle při záběru. Dílčí výsledky byly publikovány v [A7].

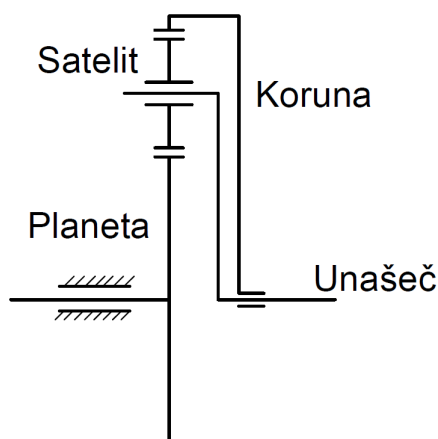
Detailní výsledky jsou uvedeny v příloze B.

## 5.3 Měření III

Měření bylo provedeno na planetové převodovce s centrálním hnacím kolem, se s rotujícím korunovým kolem a trojicí satelitů dle schématu obr. 5.10 se šikmým ozubením na druhém planetovém stupni s modulem 7,8mm.

### 5.3.1 Účel měření

Cílem bylo ověřit kvalitu záběru - rozložení zatížení zubu po provedených modifikacích ozubení.



Obr. 5.10: Schéma planetové převodovky

### 5.3.2 Vstupní informace

Totožně s předchozími měřeními byl výběr typu tenzometrů, způsob a pozice jejich instalace nastavení vzorkovací frekvence, volba počtu kanálů a způsob umístění měřící aparatury proveden v návaznosti na teoretická východiska uvedená v kapitole 2 a na podklady od výrobce převodovek ohledně geometrie ozubení, otáček, převodových poměrů a zatížení ozubení. Jednalo se o záběr měřeného satelitu s korunovým kolem a s pastorkem. Nastavení měřící ústředny bylo provedeno na základě informací o frekvenci záběrů měřeného satelitu s ostatními koly.

### 5.3.3 Instalace

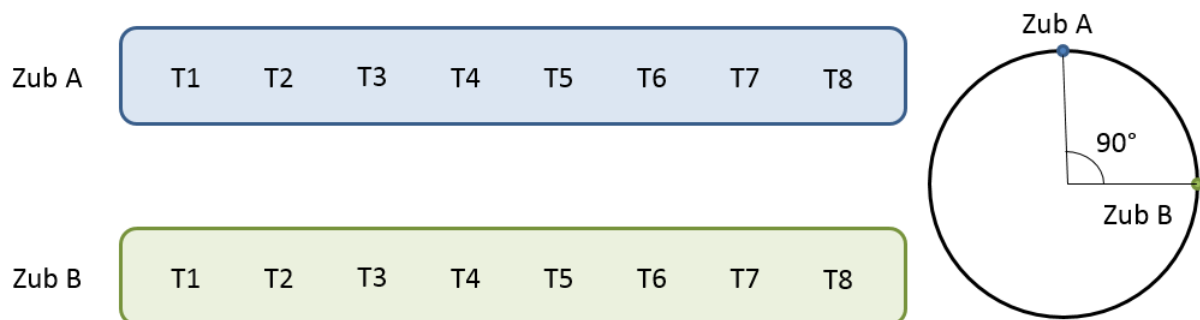
Sady tenzometrů od firmy HBM typu LY11/350 velikosti 1.5 byly umístěné na zuby jednoho satelitu (obr. 5.11) dle schématu na obr. 5.12. Na satelitu byl vždy měřen pouze jeden zub a to vždy střídavě v záběru s korunovým kolem a pastorkem. Zapojení tenzometrů bylo provedeno do půl mostu tak, že deformaci aktivně snímal vždy jeden tenzometr a druhý byl v tu chvíli jako kompenzační. Tenzometry byly zapojeny křížově tak, jak je popsáno v kapitole 4.3.1.





Obr. 5.11: Tenzometry na satelitu

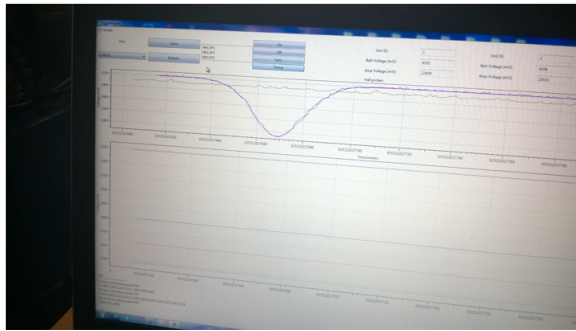
Tenzometry i kabeláž byly před vlivy okolního prostředí chráněny vrstvou epoxidové pryskyřice.



Obr. 5.12: Schéma rozmístění tenzometrů na zuby kol

### 5.3.4 Instrumentace

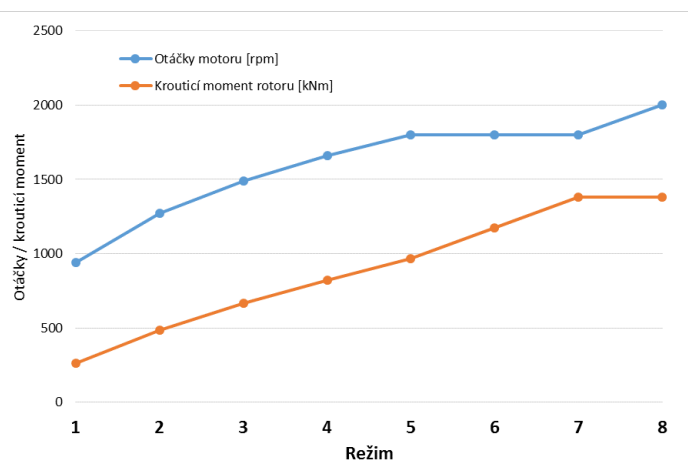
Pro měření byl použit dataloggerem. S ohledem na předpokládanou dobu trvání záběru ozubení, byla snímací frekvence záznamu nastavena na 2500 Hz. Zároveň aparatura přenášela data pro on-line zobrazení s frekvencí 10Hz pro kontrolu průběhu měření (obr. 5.13).



Obr. 5.13: Kontrola průběhu měření

### 5.3.5 Protokol měření

Měření bylo realizováno v několika režimech dle obr. 5.14, které na sebe plynule navazovaly.



Obr. 5.14: Fáze měření

Pro jednoznačnou identifikaci aktuální polohy satelitu vůči pevnému souřadnému systému byla použita dvojice průjezdových čidel na hřídeli planetového kola a hřídeli unašeče a Hallova sonda na plášti převodovky.

### 5.3.6 Metodika zpracování a vyhodnocení dat

Záznam dat probíhal nepřetržitě na paměťové médium dataloggeru a s menší vzorkovací frekvencí na externím počítači. K záznamu dat byl použit vnitřní software dataloggeru. K vyhod-

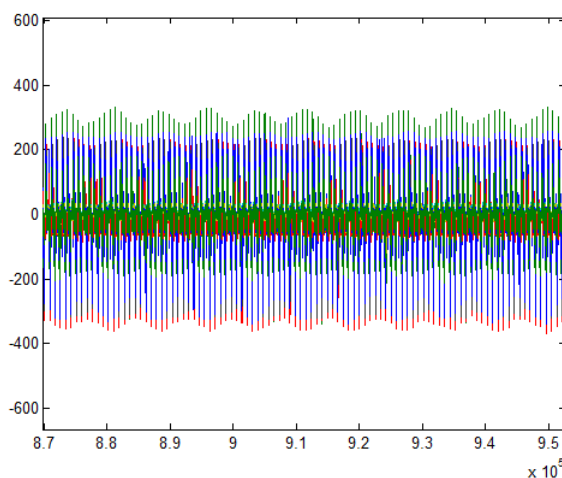
nocení byl využit software Matlab.

### 5.3.7 Závěr

Tenzometry byly zapojeny tak, aby byly sledovány hodnoty 16 kanálů a to bez ohledu na smysl otáčení. Pro získání komplexní informace byly tenzometry umístovány do míst očekávaných maxim napětí tak, aby byly spolehlivě měřeny tlaková i tahová složka. Touto cestou bylo zároveň dosaženo teplotní kompenzace.

Oproti předchozím měřením bylo v tomto měření využito **optimalizované křížové měření, které poskytuje robustnější nástroj a tím vylepšuje celkovou metodiku**. Díky využití křížového porovnáním lokálně si odpovídajících signálů byla možná verifikace, či korekce naměřených hodnot. Výsledný průběh zatížení byl rozdělen na tlakovou a tahovou část.

Při uspořádání jednotlivých identifikovaných záběrů příslušných měřících kanálů do chronologicky navazujících řad byla zjištěna proměnlivá velikost napětí v patách zubů na všech 16 kanálech (obr. 5.15). Vodorovná osa je v tomto případě tvořena počtem samplů od počátku dané fáze měření, která neodpovídá reálnému času v s. Po přepočtení vykazuje zaznamenaný průběh špičkových hodnot sinusový charakter, jehož frekvence je shodná s otáčkami unašeče. Tento zjištěný jev poskytuje cenné informace pro výrobce převodovky a jeho rozbor je proveden v následující kapitole.



Obr. 5.15: Fáze měření

Dílní výsledky byly publikovány v [A5].

Detailní výsledky jsou uvedeny v příloze C.

## 5.4 Shrnutí

Byla provedena série měření za účelem verifikace navržené metody. 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.

# Kapitola 6

## Zpracování, vyhodnocení a interpretace dat

V návaznosti na předchozí kapitolu 5 je v této kapitole 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. V tomto programu se pro jednotlivé druhy měření mění pouze základní parametry, přičemž algoritmus zůstává stejný. Popis jednotlivých kroků byl publikován v [A1], [A6], [A8], [A5],[A3].

V této kapitole není kladen důraz na detailní sdělení závěrů měření z kapitoly 5, ale na popis zpracování dat a možností, jakých výsledků lze na základě dat dosáhnout. Podrobnější informace o konkrétních výsledcích měření jsou uvedeny v přílohách.

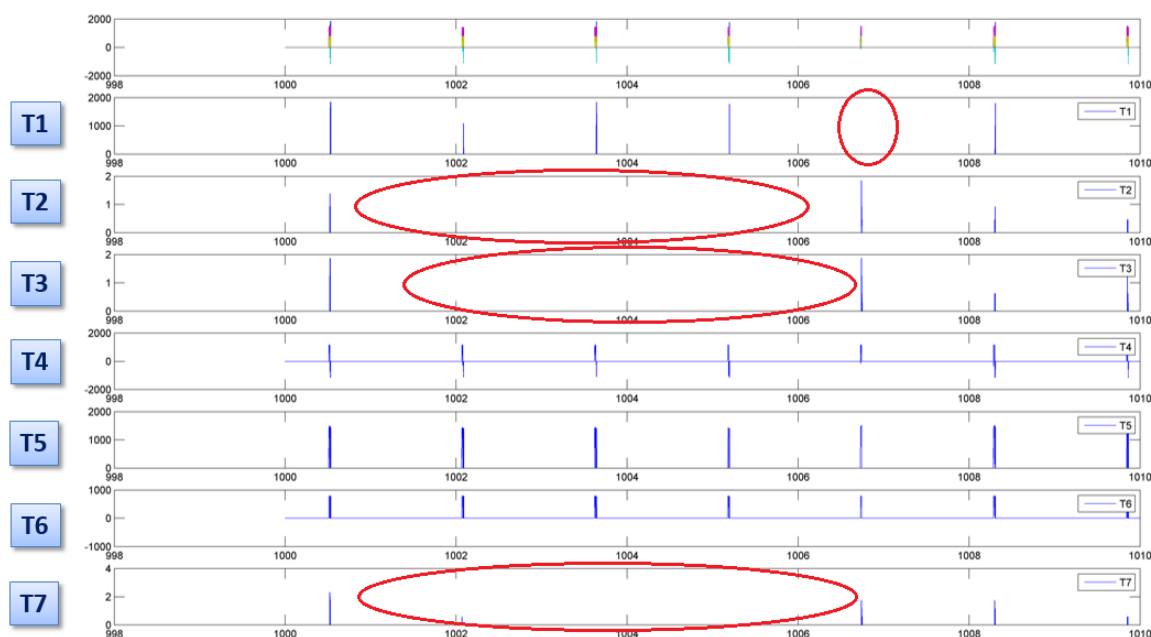
### 6.1 Vizuální zhodnocení a kvantifikace dat

Během měření probíhá kontrola jeho stavu pomocí on-line zobrazování naměřených hodnot. Přenos dat je zprostředkován pomocí X-Bee nebo Wi-Fi technologie přes anténu do počítače, kde je graficky, případně číselně prezentován aktuální naměřený signál. Pro tuto kontrolu není využívána plná frekvenční kapacita vzorkování, data jsou procesorem převzorkována na frekvenci nižší, obvykle 10 Hz, což je pro kontrolu dostačující. Díky in-time zobrazování měřeného signálu, dochází k první vizuální kontrole měřených dat. Další kontrola je poté provedena až

po dokončení měření.

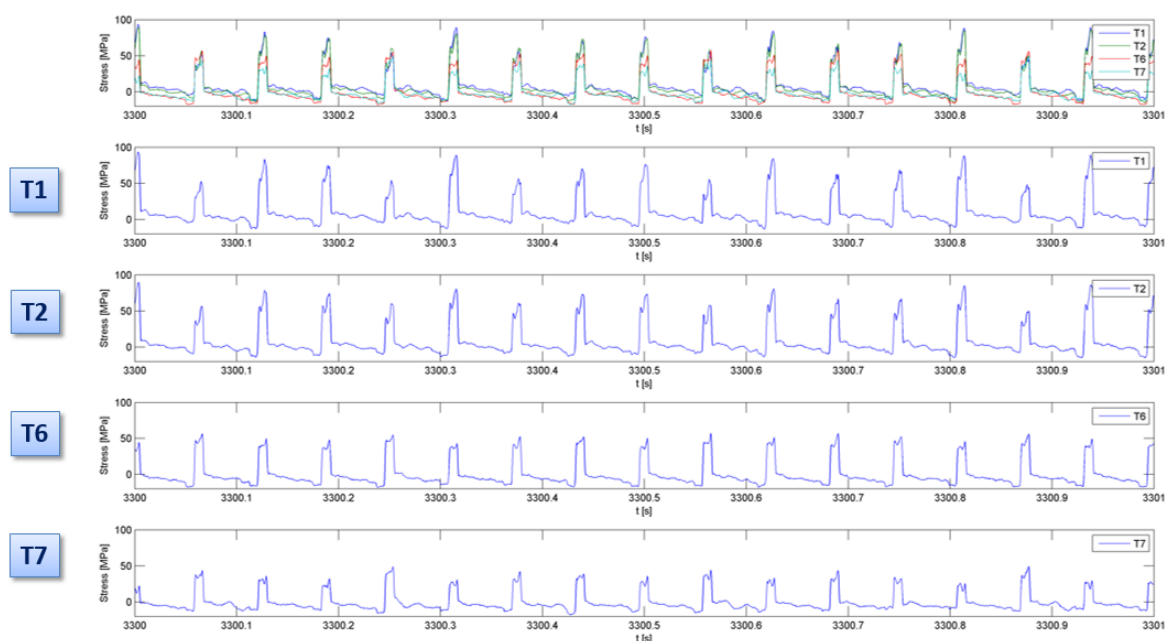
Prvním krokem při vyhodnocování dat je úvodní vizuální globální kontrola. V tomto kroku je provedeno grafické zobrazení celkového naměřeného signálu a vizuálně je posouzeno, zda jsou data naměřená na jednotlivých kanálech relevantní a mohou být dále zpracovávána. Díky vizuální kontrole lze zejména odhalit poškození snímačů a jejich vodičů nebo některé části elektronického vybavení ústředny. Signál je pak na první pohled mimo relaci očekávaných hodnot. [A6]

Na obr. 6.1 je ukázka z měření z kapitoly 5.1, kdy došlo k poškození snímačů a vodičů. Je zde patrné, že získaný signál na jednotlivých snímačích (T1 až T7) na satelitu je nepravidelný a neodpovídá očekávanému průběhu zatížení zubu. Na rozdíl od záznamu ze snímačů z pastorku na obr. 6.2, kde je již zobrazen kvalitní průběh zatížení.



Obr. 6.1: Signál z tenzometrů T1 až T7 na satelitu s několika výpadky - označeno červeně

Současně jsou odhalovány zjevné artefakty (nežádoucí hodnoty dat, které nemají z pohledu očekávaného záběru opodstatnění), a to jednak z pohledu signálu a jednak z pohledu průběhu záběru a chování převodovky, které je názorně uvedeno na obr. 5.15 v předchozí kapitole.



Obr. 6.2: Signál z tenzometrů T1, T2, T6 a T7 na pastorku

Kvantifikace dat je prováděna na základě jednotlivých režimů měření. Pod pojmem kvantifikace dat je myšleno přiřazení naměřených hodnot k velikosti zátěže převodovky. Je tedy provedeno rozdělení naměřeného signálu na jednotlivé fáze - hladiny, ve kterých bude prováděno vyhodnocení - identifikace dat.

## 6.2 Identifikace dat

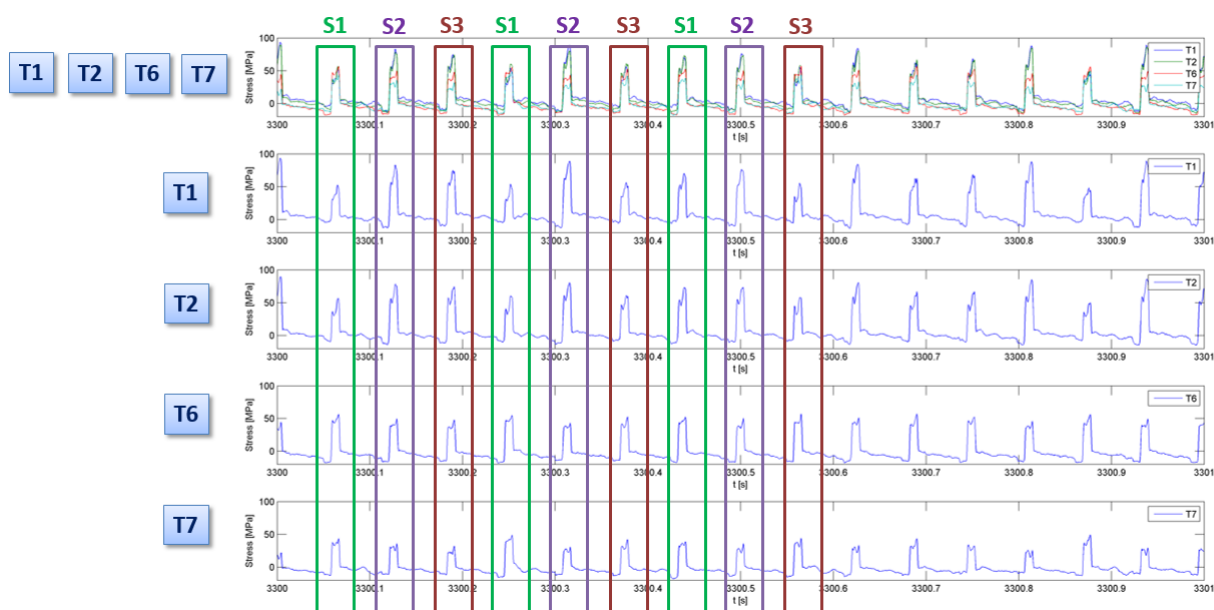
Identifikace signálů přichází jako další krok vyhodnocení dat. Jedná se již o práci se samotným naměřeným signálem a přímo souvisí se způsobem zapojení tenzometrů do můstku. Signál je v tomto kroku rozdělen na jednotlivé části a to jednak pro jednotlivé snímače na zubech kola a jednak pro jednotlivé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

Rozdělení signálu je provedeno v závislosti na tom, na jakém kole se měřený zub nachází. V případě, že je měřený zub na pastorku nebo na korunovém kole, je záznam rozdělován podle kontaktů s jednotlivými satelity. V případě, že je měřený zub na jednom ze satelitů, je signál rozdělován na kontakt s pastorkem a na kontakt s korunovým kolem.

Veškeré níže popsané kroky jsou prováděny automaticky za užití naprogramovaného softwaru v prostředí Matlab, kde pro identifikaci dat jsou směrodatné zejména otáčky jednotlivých kol.

### 6.2.1 Měření na pastorku a korunovém kole

Při měření na korunovém kole nebo pastorku je signál rozdáván na kontakt s jednotlivými satelity. Rozhodujícím faktorem je použitý princip měření, a to zda je měřen pouze jeden zub nebo jsou tenzometry instalovány na dva zuby kola. V případě měření jednoho zubu je identifikace poměrně jednoduchá. Jsou vybrány jednotlivé záběry dle počtu tenzometrů, jak je ilustračně uvedeno na obr. 6.3, kde jsou data z pastorku rozdělena pro tři satelity S1, S2 a S3 měřeného planetového stupně. [A2]

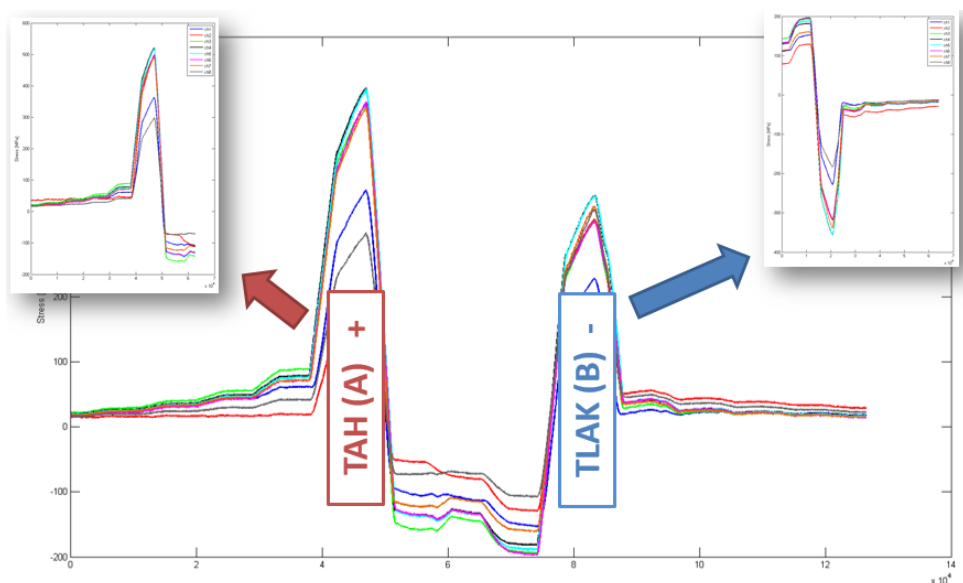


Obr. 6.3: Identifikace signálů z tenzometrů T1, T2, T6 a T7 na pastorku [A5]

Identifikace dat pro záběry s jednotlivými koly při instalaci tenzometrů na dva zuby, kdy je aktivní vždy pouze jeden, je závislá na způsobu zapojení, které bylo po teoretické stránce rozebráno v kapitole 2.5 a představeno v kapitole 4.3. Z tenzometrů je získán signál, jehož detail je zobrazen na obr. 6.4. Jak již bylo zmíněno v kapitole 4.3 metoda je invariantní vůči smyslu



otáčení kol. Je vždy zaznamenáno tahové i tlakové zatížení ozubení. To znamená, že na časové ose se pro záběr s každým satelitem objeví dva signály pro jedno kolo, na rozdíl od signálu uvedeného na obr. 6.3. Zaznamenaný signál je tedy bohatší o hodnoty druhého smyslu zatížení. Vlivem zapojení, které je uvedeno na obr. 4.20, je získaný signál vždy ve stejné polaritě. V korespondenci s tím, je z obr. 6.4 patrné rozdělení signálu. První část signálu patří tenzometrům, které jsou umístěny na zubu a které zaznamenávají pro daný způsob otáčení tahové zatížení boku zubu. Následuje zaznamenaný signál z dalšího zubu, kde jsou tenzometry umístěny na opačné straně zubu, a které zaznamenávají tlakové zatížení boku zubu. Protože jsou tenzometry zapojeny dle schématu na obr. 4.20, je získanému signálu v můstku změněna polarita a i přes to, že se jedná o tlak, je zaznamenáván kladný signál. Ten je v dalších krocích matematicky v postprocesu upraven na signál záporný. [A8]



Obr. 6.4: Identifikace signálů z tenzometrů na dvou zubech [A8]

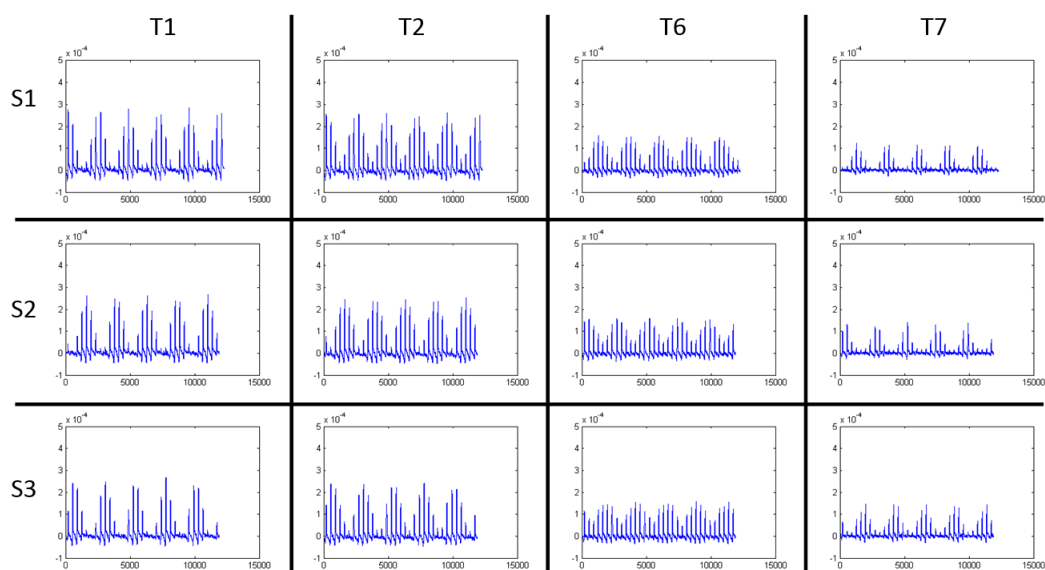
### 6.2.2 Měření na satelitu

Identifikace záběrů instalovaných tenzometrů na satelitu s korunovým kolem a pastorkem je identická s kroky popsanými v předešlé kapitole. Jediná odlišnost spočívá ve formálním pojmenování jednotlivých křivek, a to na křivky ze záběru s pastorkem a na křivky ze záběru s korunovým kolem. Stejně jako v předchozím případě opět závisí na počtu měřených zubů, zda

je měřen pouze jeden zub nebo zuby dva.

### 6.2.3 Kompilace dat

Po identifikaci dat pro jednotlivé záběry je provedena jejich kompilace. Kompilací dat jsou k sobě dány záběry z časové osy. Na základě identifikace jsou vyříznuty křivky záběrů s daným kolem, mezi které je možné doplnit nulový signál. Tím je pak zachována časová osa průběhu postupného přicházení zvoleného kola do záběru a je tak možno provádět další rozbor zátížení. Názorná ukázka kompilace identifikovaných záběrů je provedena na obr. 6.5. Časová posloupnost záběrů se projevuje zejména u šikmého ozubení a je důležitá pro posuzování chování převodovky jako celku. Pro určení rovnoměrnosti záběru se výběr hodnot zaměřuje na jeden časový okamžik, kde souslednost nehraje roli. [A5]



Obr. 6.5: Kompilace identifikovaných záběrů jednotlivých satelitů [A5]

## 6.3 Přepočet získaných hodnot

Procedury provedené v kapitole 6.2 přinášejí úpravu dat, která jsou brána jako výchozí pro přepočet a vyřčení závěrů z provedeného měření. Prozatím byla používána data v jednotkách

elektrického napětí. Pro přepočet na mechanickou napjatost jsou použity vzorce 2.74 nebo 2.75 z kapitoly 2.5.2 v závislosti na můstkovém zapojení. Poté je mechanické napětí pro čtvrt most dáno vztahem

$$\sigma = \frac{4}{k} \cdot \frac{U}{U_b} \cdot E \quad (6.1)$$

Výhodou metody tenzometrického měření je získání absolutních hodnot mechanické napjatosti v měřeném místě zubu, což některé metody neumožňují.

### 6.3.1 Srovnání nuly

Zpracování experimentálních dat provází srovnání naměřených dat na "nulovou" hladinu, jedná se o tzv. vyrovnání offsetu. To je provedeno na základě naměření nulové hladiny zatížení. Tato hladina je stanovena před započítáním chodu převodovky. Jedná se o číselnou hodnotu, která je následně odečtena od měřeného signálu.

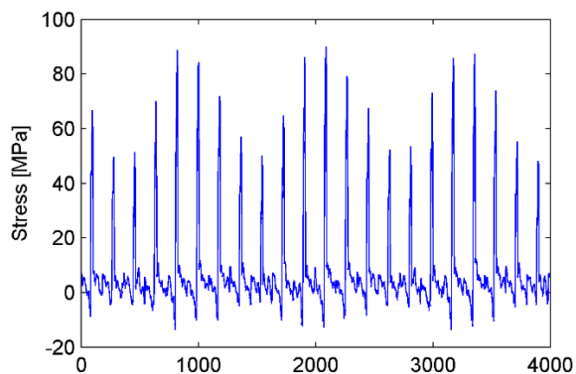
## 6.4 Rozbor naměřených dat a interpretace výsledků

K určení kvality záběru je zapotřebí znát pro daný okamžik hodnoty z tenzometrů. Otázkou je, jak tyto hodnoty vybrat. Vše totiž vyplývá z průběhu křivek, které jsou měřením získávány. Vzhledem ke značné proměnlivosti získaných dat je nutno provést jejich rozbor a zaměřit se tak na důležité pasáže.

### 6.4.1 Posouzení kvality záběru

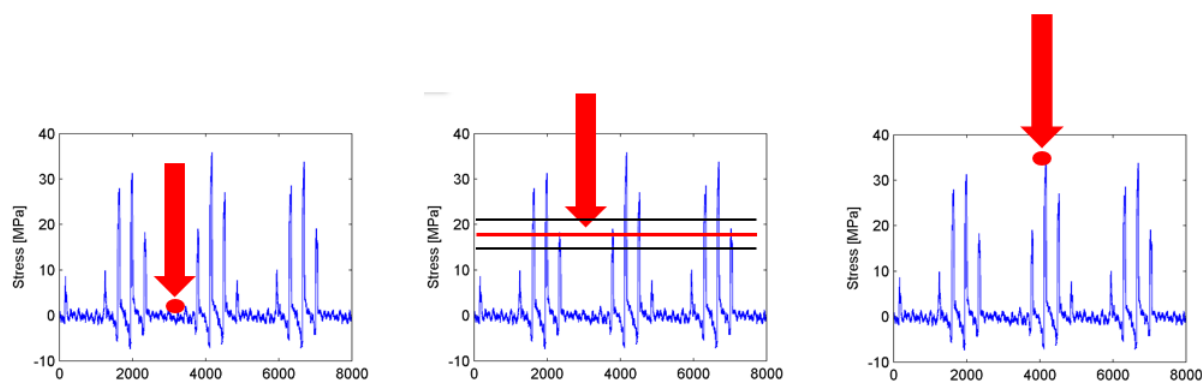
Důvodem rozboru naměřených dat je zjištění, že velice často dochází u planetových převodů ke kolísání zatížení ozubení zobrazeného na obr. 6.6, což bylo pozorováno u všech doposud provedených měření. Bez ohledu na možnou příčinu tohoto kolísání je nutno přikročit ke stanovení

postupu, jakým budou tato data vyhodnocována. [A3]



Obr. 6.6: Proměnná maximální hodnota zatížení zubu [A5]

Při kolísání je možno na jednom tenzometru nalézt tři zajímavé hladiny pro vyhodnocování prezentované na obr. 6.7. Jedná se o minimální a maximální naměřenou hodnotu anebo průměrnou hodnotu.

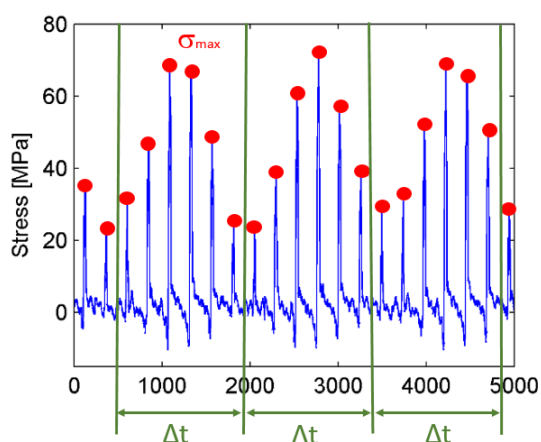


Obr. 6.7: Minimální, průměrná a maximální naměřená hodnota [A5]

Nejdříve je nutné určit maxima jednotlivých křivek záběru, ze kterých bude poté určováno globální minimum, maximum a průměrná hodnota. Maximum je v softwaru Matlab určeno dle algoritmu

$$\sigma_{max} = Max \{ \sigma_i \}_a^b, \quad (6.2)$$

kdy velikost uvažovaného intervalu  $\langle a, b \rangle$  je závislá na počtu snímků, kterými je popsána křivka. Tato proměnná byla označena v kapitole 4.4.3 jako  $X$ . Pro vyhledání maxima a minima v daném záběru je i z pohledu rychlosti algoritmu optimální interval  $\langle -X/4, X/4 \rangle$ , kdy střed je určen jako  $X/2$  z celkového počtu  $X$  snímků dané křivky záběru. Přičemž v této fázi není zcela důležité dodržovat při určení intervalu přesnost na jeden vzorek (jedné se pouze o stanovení velikosti intervalu). Výběr maxim záběrů je graficky zobrazen na obr. 6.8.



Obr. 6.8: Maxima záběrových křivek [A1]

Stanovení maximální a minimální dosažené hodnoty z maxim postupně přicházejících záběrů v delším časovém úseku je s využitím softwarového nástroje Matlab velice jednoduché a jednoznačné a je provedeno dle algoritmu

$$\sigma_{MIN} = Max \{ \sigma_{max} \} \quad (6.3)$$

$$\sigma_{MAX} = Min \{ \sigma_{max} \}, \quad (6.4)$$

přičemž úsek pro určení těchto hodnot je vždy dán časovým krokem  $\Delta t$ , který se periodicky opakuje.

Určit střední hodnotu lze několika způsoby, vzhledem k tomu, že nejsou očekávány žádné extrémní hodnoty byl nakonec vybrán aritmetický průměr, který je určen dle vzorce

$$\sigma_{AVG} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{max}}{n}, \quad (6.5)$$

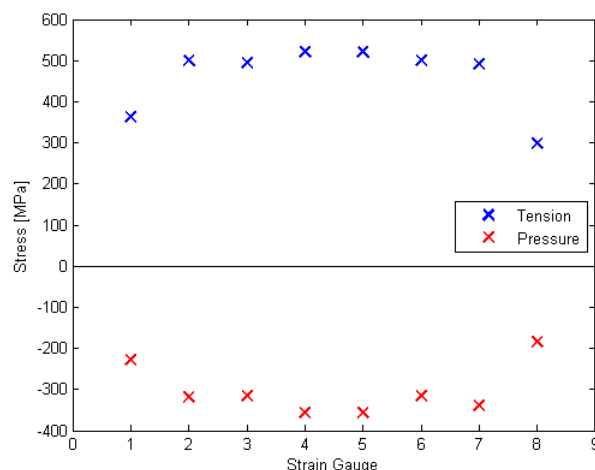
kde  $n$  je počet záběrů měřeného zubu.

#### 6.4.1.1 Výpočet koeficientu nerovnoměrnosti zatížení

Určení koeficientu nerovnoměrnosti zatížení vychází z teoretických předpokladů představených v kapitole 2.2.2.4. Pro naměřené hodnoty je koeficient  $K_{H\beta}$  určen dle vztahu [A1]

$$K_{H\beta} = \frac{\text{maximální hodnota na šířce zubu}}{\text{průměrná hodnota na šířce zubu}} = \frac{MAX \{ \sigma_{AVGj} \}}{\overline{\sigma_{AVGj}}}. \quad (6.6)$$

Uvedený vzorec je představen pro výpočet koeficientu  $K_{H\beta}$  s průměrnými hodnotami špiček záběrových křivek. Index  $j$  je pořadové označení tenzometru na měřeném zubu. Při užití 8 tenzometrů, nabývá  $j$  hodnot 1 až 8. Hodnoty pro výpočet koeficientu lze graficky zobrazit dle obr. 6.9. Kde vodorovná osa reprezentuje šířku zubu, respektive jednotlivé tenzometry na zubu. Tímto je graficky prezentováno rozložení napětí naměřené na jednotlivých tenzometrech. Všechny hodnoty pro daný typ zatížení jsou naměřeny v jednom okamžiku. Z těchto hodnot je už jednoduše dle uvedeného vzorce (6.6) vypočítán koeficient nerovnoměrného zatížení zubu. [A1]



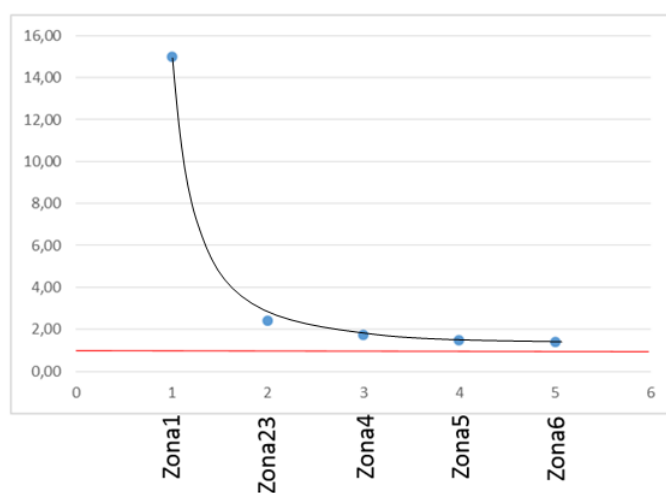
Obr. 6.9: Maxima záběrových křivek po šířce zubu

Koeficient se pohybuje v intervalu  $K_{H\beta} \in (1; \infty)$ , kdy optimální hodnota je  $K_{H\beta}^{opt} = 1$ .

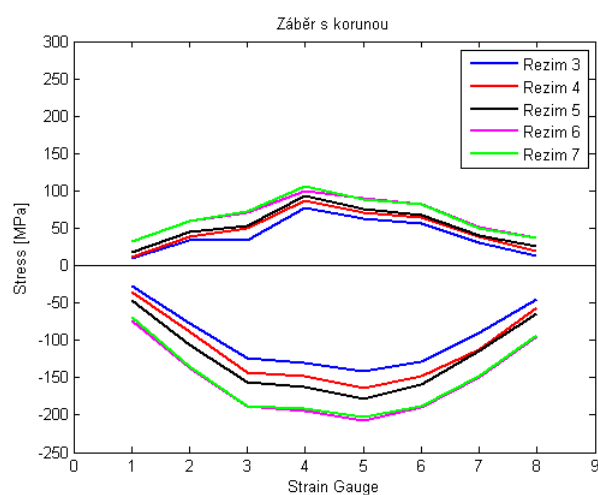
#### 6.4.1.2 Průběh kvality záběru

Stanovení rozložení napětí je předchozí v kapitole popsáno pro průměrné hodnoty, jedná se tedy o celkový vzhled do jedné fáze měření. Stejnou metodou lze stanovovat i dílčí hodnoty rozložení napětí pro další okamžiky, které jsou svými hodnotami přínosné.

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. Tento trend by měl být výsledovatelný a směřovat k optimální hodnotě. Vývoj koeficientu  $K_{H\beta}$  byl pozorován na jednom z provedených měření, které je prezentováno dále na obr. 6.10. Zde je názorně vidět velmi pozitivní trend a je tak prokázána vhodnost použité konstrukce, kdy se kvalita záběru zlepšuje směrem ke jmenovitému zatížení zařízení. Druhou možností je interpretace vývoje distribuce zatížení, kdy je zobrazeno maximum zatížení po šířce zubu na obr. 6.11. Tato interpretace slouží pro názornou představu průběhu maximálních hodnot napětí po šířce zubu.



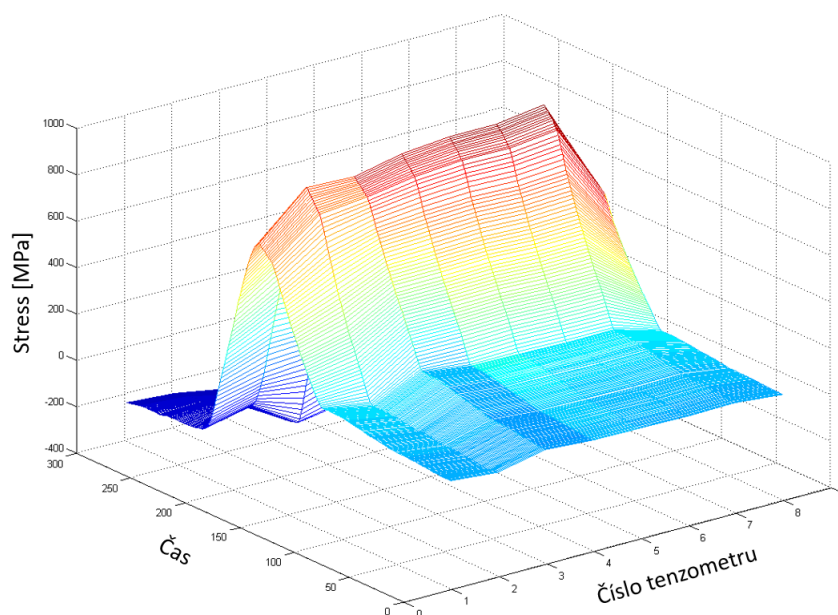
Obr. 6.10: Průběh koeficientu  $K_{H\beta}$  v závislosti na měřených fázích



Obr. 6.11: Vývoj maxim záběrových křivek po šířce zubu při změně zatížení

Graficky lze interpretaci naměřeného záběru názorně ukázat na 3D grafu na obr. 6.12.

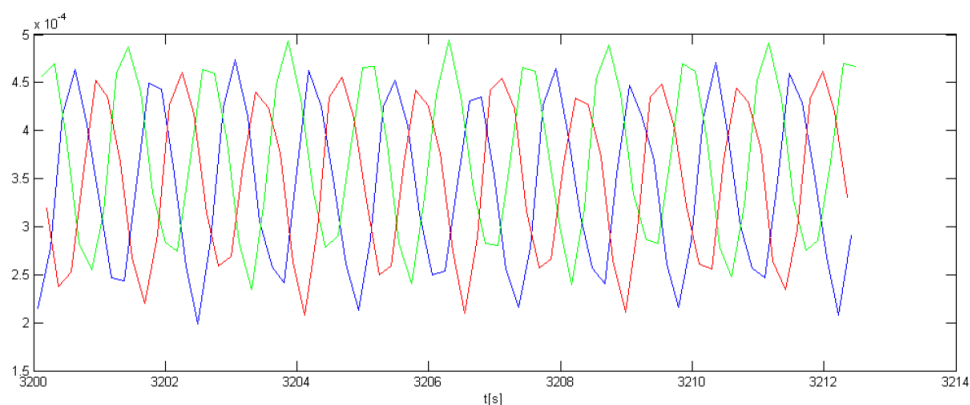




Obr. 6.12: Zatížení zubu naměřené osmi tenzometry [A3]

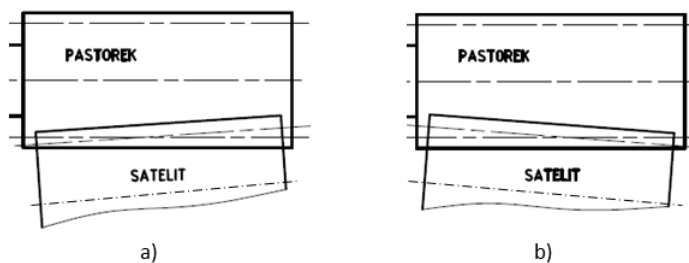
### 6.4.2 Oscilace hodnot záběru

Z naměřených dat a již výše uvedených grafů je zřejmé, že dochází k oscilaci špičkových hodnot křivek záběru  $\sigma_{max}$ . Tento jev je prezentován na obr. 6.6, 6.7, 6.8, 6.5 a 5.15. Nejedná se však o jev žádoucí. Jednoduše ho lze prezentovat křivkou, která vznikne proložením hodnot  $\sigma_{max}$  naměřených na koruně, jak je tomu uvedeno na obr. 6.13. Na tomto grafu jsou zobrazeny tři průběhy. Každá křivka odpovídá maximálním hodnotám ze záběru se satelity. Zde je patrná oscilace zatížení zubů na jednotlivých satelitech, mezi kterými je příslušný fázový posun. Publikováno v [A2] a [A5].



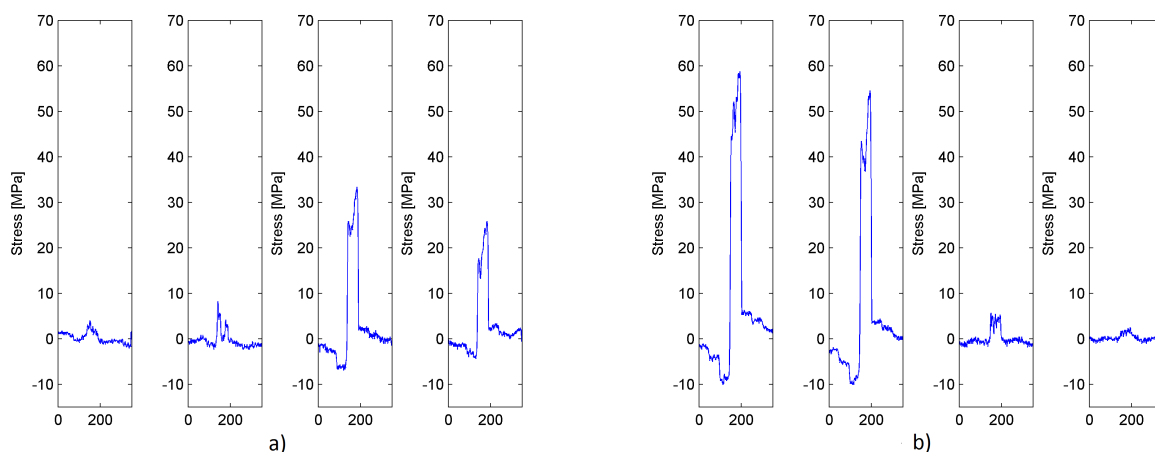
Obr. 6.13: Frekvence změn velikosti zatížení satelitů [A5]

V praxi existují dva typy oscilace případně jejich superpozice. První typ je způsoben nesouosostí kol planetového stupně případně zvýšenou ovalitou některého z kol. Tento typ oscilace zatížení se projevuje stejně na všech měřících místech a díky tomu jsou maxima této oscilační křivky zachycena ve stejnou dobu. 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. 6.14.



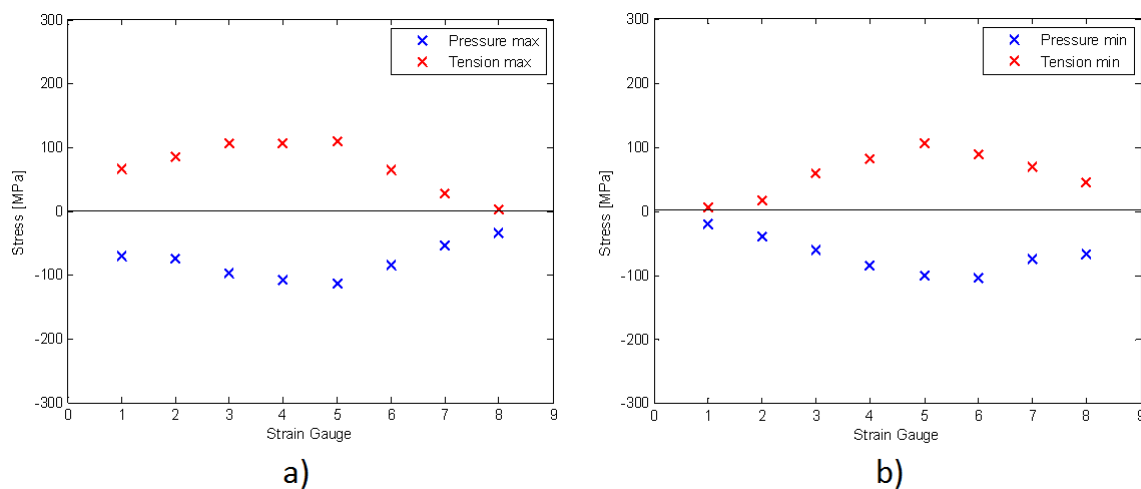
Obr. 6.14: Vzájemné vychýlení satelitu s pastorkem (resp. korunovým kolem)

Vychýlení osy satelitu vůči osám ostatních kol je prezentováno naměřenými grafy na obr. 6.15. Na levé čtveřici křivek (a) je patrné, že na prvním tenzometru zleva je naměřena minimální hodnota  $\sigma_{MIN}$  a ve stejném čase je na stejném zubu ale na opačné straně naměřena hodnota maximální  $\sigma_{MAX}$ . Naopak na pravé čtveřici záběrových křivek (b) je hodnota  $\sigma_{MIN}$  naměřena na prvním tenzometru zprava a hodnota  $\sigma_{MAX}$  na prvním tenzometru zleva. K přechodu mezi maximální a minimální hodnotou na tenzometru dochází plynule.



Obr. 6.15: Naměřená data při vzájemné vychýlení satelitu s pastorkem (resp. korunovým kolem); a) minimum naměřeno na levé straně zubu, b) minimum naměřeno na pravé straně zubu

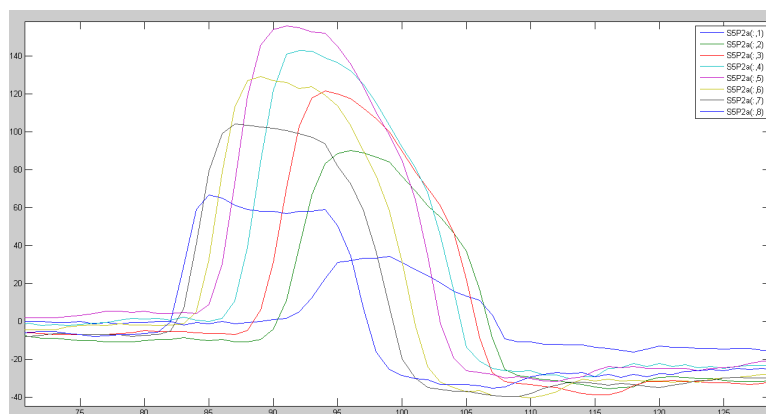
Oscilaci hodnot lze rovněž prezentovat na grafu který zobrazuje maximální hodnotu záběrových křivek po šířce zubu (obr. 6.16).



Obr. 6.16: Oscilace maxim záběrových křivek - minimum naměřeno na levé straně zubu a minimum naměřeno na pravé straně zubu

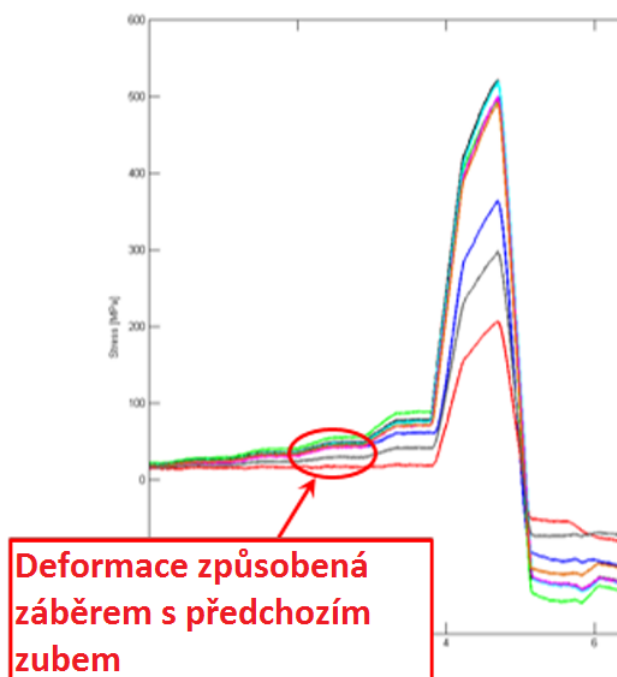
### 6.4.3 Průběh křivky záběru

Kvalita křivky záběru je tím přesněji popsáné, čím více bodů bylo naměřeno. Ukázka křivky záběru pro jeden zub šikmého ozubení, která je měřena osmi tenzometry je na obr. 6.17.



Obr. 6.17: Křivka záběru zubu šikmého ozubení

Dalším zkoumáním lze sledovat i další deformace, zejména pak deformace způsobené záběrem jiného než měřeného zubu. To je názorně ukázáno na obr. 6.18.

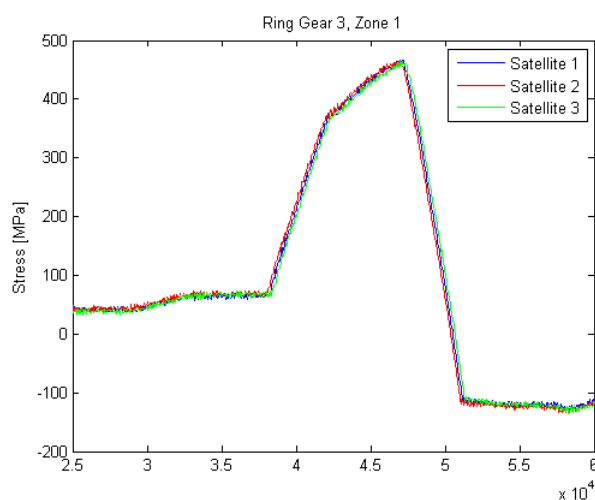


Obr. 6.18: Deformace ozubeného kola vlivem záběru se zuby přicházející do záběru před měřeným místem [A3]

#### 6.4.4 Rovnoměrnost toku výkonu

Jedním z možných výstupů z toho typu měření je distribuce toku výkonu mezi satelity při měření na pastorku nebo korunovém kole. Díky naměřeným hodnotám zatížení zubu na ko-

runovém kole nebo pastorku při záběru s jednotlivými satelity lze přibližně odhadnout jaká poměrová část výkonu je přes jednotlivé satelity přenášena (obr. 6.19). V případě, že je měřeno zatížení vždy pouze jednoho zubu, tak jak je tomu v tomto případě, je metoda velmi přibližná. Pro přesné určení přenášeného výkonu by bylo zapotřebí měřit zatížení na takovém počtu zubů, který odpovídá počtu satelitů a navíc by tenzometry musely být umístěné tak, aby byly s příslušnými satelity v záběru v jeden okamžik.



Obr. 6.19: Zatížení zubu korunového kola při kontaktu s jednotlivými satelity [A5]

### 6.4.5 Nejistoty měření

Žádným měřením nemůže být s jistotou zjištěna pravá hodnota měřené veličiny. Výsledek je vždy ovlivněn řadou skutečností, které přesnost měření omezují. Je to omezená přesnost měřících prostředků a metod, vlivy různých nepostižitelných podmínek i vlastní osoba pozorovatele. Souhrn všech vlivů způsobí, že se naměřená hodnota pouze více či méně skutečné hodnotě přiblíží. Rozdíl mezi výsledkem měření a skutečnou hodnotou se nazývá chyba měření. Buď je chyba měření vyjadřována v jednotkách měřené veličiny, a pak se jedná o absolutní chybu, nebo je chyba vyjadřována v procentech a pak se nazývá chybou relativní. Způsob určování a popis jednotlivých chyb uvádí ve své práci P. Janíček [9] a M. Vlk s kol. [30], na základě těchto prací je proveden níže uvedený rozbor nejistot měření.

Výsledná chyba měření se skládá ze dvou složek. Jedná se jednak o chyby systematické, tím jsou myšleny chyby opakující se a působící stále stejně, dále pak o chyby náhodné, a to jsou chyby související s náhodnými změnami měřicích podmínek při opakovaných měřeních.

Základním zdrojem systematických chyb je omezená přesnost měřicích přístrojů, což souvisí s omezenými možnostmi jejich konstrukce, rozlišovacími schopnostmi, závislostí na vnějších podmínkách (teplota, stabilita elektronických obvodů) apod. Tyto systematické chyby lze snížit za použití dokonalejších měřicích přístrojů, pokud jsou dostupné. Jednou ze složek ještě může být volba nevhodné měřicí metody, která souvisí s nepřesností či nevhodností použitého způsobu měření.

Provede-li se jedno měření veličiny, je získán výsledek ovlivněný všemi zdroji systematických chyb. V případě opakování měření beze změn měřicích podmínek by byly teoreticky očekávány stejné výsledky. Ve skutečnosti se však budou výsledky lišit, což způsobují náhodné změny a vznikají tak náhodné chyby. Zkoumání těchto náhodných výsledků již spadá do oboru matematické statistiky a jejích nástrojů.

Chyba měření vyjadřující o kolik se naměřená hodnota liší od hodnoty pravé, je sice statisticky předpověditelná, nicméně vychází z předpokladu znalosti pravé hodnoty, ta je však obecně neurčitá. Zobecněním přístupu k hodnocení přesnosti měření je zaveden pojem nejistota měření. Nejistota měření charakterizuje interval hodnot okolo výsledku měření, který lze s předem stanovenou mírou pravděpodobnosti odůvodněně přiřadit k hodnotě měřené veličiny. Tím je nutnost znalosti pravé hodnoty zcela eliminována. Obecnost pohledu umožňuje nejistotu přiřadit nejen výsledkům měření, ale i všem pomocným veličinám, tedy např. použitým konstantám pro výpočty, korekcím experimentálních podmínek, cejchování přístrojů apod. Nejistoty jsou děleny podle [30] na:

- Standardní nejistota typu A
- Standardní nejistota typu B

- Kombinovaná nejistota

Nejistota typu A (označení  $u_A$ )

Tento příspěvek do celkové nejistoty vychází z náhodných vlivů. Pro přímé měření veličiny je nejistota typu A určena výběrovou směrodatnou odchylkou aritmetického průměru  $u_{xA} = s_{\bar{x}}$ . Při menších počtech měření je nutné určit kvalifikovaný odhad na základě zkušenosti. Při jednom měření se tato nejistota neurčuje.

Nejistota typu B (označení  $u_B$ )

Její hodnota nezávisí na počtu opakování měření, ale na použitém měřicím řetězci, čili zahrnuje odhadnutelné vlivy. Je tedy nutno určit všechny zdroje nejistot a u každého z nich určit maximální rozsah změn  $\pm\Delta z_{max}$  a dále statistické rozdělení pravděpodobnosti koeficientem  $\chi$ . Poté

$$u_{zB} = \frac{\Delta z_{max}}{\chi}, \quad (6.7)$$

kde  $\chi = 3$  pro statistické rozdělení a  $\chi = \sqrt{3}$  pro normální rozdělení. Patří sem tedy chyby měřicích přístrojů, použitých metod měření, podmínek měření atd. V našem případě se bude jednat o nejistotu tenzometrického snímače, geometrické polohy umístění snímače, nejistotu měřicího zesilovače a nejistotu kabelu propojující měřicí zesilovač s PC. Nejistota hardwaru a softwaru se neuvažuje vzhledem k tomu že signál je v digitální podobě a bylo použito pouze ověřený software. Výsledná nejistota typu B se stanoví sloučením dílčích nejistot různého původu použitím zákona šíření nejistot.

Výslednou, celkovou nejistotu výsledků měření  $y$  nazýváme standardní kombinovanou nejistotou veličiny  $y$ , která je dána vztahem

$$u_y = \sqrt{u_{yA}^2 + u_{yB}^2}. \quad (6.8)$$

Při určování velikosti chyb při tenzometrických měřeních je vycházeno z výše uvedené obecné teorie chyb. Užitím tenzometrických snímačů pro jednoosou napjatost, je vycházeno z předpokladu, že je napjatost určena jedním hlavním napětím působícím v hlavním směru. Je-li tento směr znám, pak stačí měřit deformaci v tomto směru. V případě měření zatížení zubu je určen ohyb tohoto zubu, je tedy možno použít tenzometrické snímače pro jednoosou napjatost. Deformace je tedy dána vztahem, který vychází z rovnice 2.58

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{R \cdot k}. \quad (6.9)$$

Je tedy zřejmé, že chyba v určování napětí bude záviset na přesnosti materiálových konstant  $E$  a  $\mu$  měřeného tělesa, deformačního součinitele  $k$  a určení veličiny  $\frac{\Delta R}{R}$ , které závisí na kvalitě celého měřicího řetězce (měřicí přístroje, teplotní kompenzace atp.).

Hlavní metrologické charakteristiky tenzometrických snímačů zatížení a sil se popisují takto definovanými chybami dle [5]:

$d_L$ : chyba linearity – největší odchylka skutečného měřicího signálu od uvažovaného lineárního průběhu závislosti měřicího signálu na zatížení,

$d_H$ : chyba hystereze – největší rozdíl mezi průběhem měřicího signálu při růstu zatížení z nulové do jmenovité hodnoty a průběhem měřicího signálu při klesání zatížení z jeho jmenovité hodnoty k nule,

$d_R$ : chyba reprodukovatelnosti – největší rozdíl mezi hodnotami měřicího signálu při opakovaném působení konstantní zátěže za stejných podmínek,

$d_t$ : chyba tečení (dopružování) – změna měřicího signálu při konstantním zatížení snímače a konstantních podmínkách měření během stanoveného časového intervalu (např. 30 min) od zavedení zatížení,



$d_{T0}$ : chyba nulové hodnoty měřicího signálu nezatíženého snímače – v určeném rozmezí teploty zjištěná největší odchylka měřicího signálu od jeho hodnoty naměřené při referenční teplotě,

$d_{TJ}$ : chyba jmenovité hodnoty měřicího signálu vlivem teploty – v určeném rozmezí teploty zjištěná největší odchylka měřicího signálu snímače zatíženého jmenovitým zatížením od téhož měřicího signálu při referenční teplotě,

$d_S$ : chyba sloučená zahrnující  $d_L$ ,  $d_H$  a  $d_R$ .

Nejistota odporu a deformačního faktoru tenzometrického snímače se stanoví na základě hodnot uvedených výrobcem na obalu snímače (firmou HBM udáno 1%). Přesnost tenzometrů je dle firmy HBM 2%. Nepřesnost umístění snímače je minimalizována užitím lepící předtisknuté folie, díky které je dodržena přesnost nalepení tenzometrů. Nejistotu v tomto případě je velice obtížné stanovit. Navazující nejistoty měřících zesilovačů a dalších zařízeních jsou určovány na základě znalosti vlastností těchto komponent. Nejistota zesilovače typu 9236 je 0,1%. Nejistota datalogeru se skládá z několika složek. Jedná se o nejistotu zesílení 0,2 %, nejistotu referenčního napětí také 0,2 % a dále nejistoty způsobené nelinearitou AD převodníku a nejistotu způsobenou vstupním šumem, ty jsou však řádově nižší a nemají tak zásadnější vliv.

Celková nejistota naměřených dat je dána vztahem

$$u_y = \sqrt{u_{kA}^2 + u_{vA}^2 + u_{zA}^2 + u_{dzA}^2 + u_{duA}^2} = \sqrt{1^2 + 2^2 + 0,1^2 + 0,2^2 + 0,2^2} = 2,25\%. \quad (6.10)$$

## 6.5 Shrnutí

V této kapitole bylo prezentováno množství možných výstupů z experimentálně naměřených dat. Pro sledování kvality záběru ozubení je nejprůkaznější koeficient nerovnoměrnosti rozložení zatížení zubu  $K_{H\beta}$ . Jedná se o hodnotu, která není měřena přímo, ale je určována z naměřených dat ze skupiny tenzometrů na sledovaném zubu. Stanovený koeficient určuje kvalitu záběru a je dobrým ukazatelem správnosti návrhu tvaru zubu a celkové konstrukce.

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.

Z naměřených dat lze zároveň určovat i další poznatky. Jedná se o případnou chybu geometrie převodu - špatná souosost, nebo chybu ovality některého z kol. Určitým typem měření lze u planetových převodů určit tok výkonu přes jednotlivé satelity.

Jednou z dalších možností při práci s daty je v tomto případě provést frekvenční analýzu. Nej-používanějším nástrojem je Fourierovu transformaci, která převede signál z časové závislosti na závislost frekvenční. Pomocí frekvenčního rozboru získaného signálu lze provést identifikaci jednotlivých frekvencí zejména s přihlédnutím na frekvence v ozubení a případně na rezonanční frekvence celého soustrojí, které jsou při měření nežádoucí. Zároveň lze provést vyhodnocení oscilace hodnot popsaných výše.

# Kapitola 7

## Výstupy práce

Zásadním přínosem této práce je metodika pro zjišťování kvality záběru ozubených kol. Dalším přínosem je instalační folie pro přesnou aplikaci tenzometrů na zubech kola. Významným přínosem je i efektivní způsob zapojení tenzometrů a vyvinutí autonomního dataloggeru.

### 7.1 Metodika pro průběžné testování kvality záběru

V následujících bodech je shrnuta navržená metodika pro průběžné sledování kvality záběru.

#### 7.1.1 Východiska, zadání

Praktická aplikace metodiky předpokládá průmyslového objednatele. Na úvod každého měření přichází od objednavatele informace o požadovaných výstupech a zjišťovaných informacích. Spolu s tím přichází popis měřené převodovky včetně geometrie ozubení, kinematiky převodů a silových poměrů v ozubení.

#### 7.1.2 Měřicí standy

Testování a záběhové zkoušky převodovek se provádějí zpravidla v laboratořích výrobců zařízení případně na specializovaných pracovištích. Testování je prováděno na sestavených standech.

Samotný stand nemá na měření kvality záběru velký vliv, je však nutné, aby byl sestaven správně a nedocházelo tak k nežádoucím jevům, mezi které mohou patřit například vibrace.

Výhodou navrženého měření je bezesporu fakt, že jej lze aplikovat i na sledování zařízení u koncového zákazníka. Je tedy možné monitorovat zatížení ozubení a určovat tak kvalitu záběru v reálném provozu stroje.

### **7.1.3 Měřicí protokol**

Každý prováděný experiment podléhá měřicímu protokolu. Protokol obsahuje jednotlivé kroky testování včetně informací o jednotlivých zátěžných stavech, tak jak je uvedeno v kapitole 5 pro jednotlivá měření.

Informace o jednotlivých stupních (režimech) zátěže jsou předem známy.

Jednotlivé stupně zatížení jsou charakterizované otáčkami na vstupu nebo výstupu, krouticím momentem (případně přiváděným výkonem) a dobou, po kterou měření v dané fázi probíhá. Hodnota zatížení je udávána buď v absolutních hodnotách nebo v procentuální zátěži vztahené ke jmenovitému výkonu zařízení. Jak již bylo několikrát zmíněno, znalost velikosti zátěže a otáček je důležitá pro výběr komponent aparatury a její nastavení.

Pro zpracování naměřených dat je užíváno vždy rozdělení pro jednotlivé fáze měření. To je provedeno, buď na základě měřicího protokolu, nebo na základě hodnot zaznamenaných například frekvenčním měničem motoru.

### **7.1.4 Instalace a instrumentace**

Instalace tenzometrů je provedena na základě teoreticky zjištěného místa maximální hodnoty napjatosti dle kapitoly 2. Postup je proveden na základě bodů stanovených v kapitole 4.1. Kdy

zjevně největším přínosem pro vysokou míru přesnosti je užití **předtisknuté instalační folie**, která umožní instalaci tenzometrů přesně na předem určené místo.

Možnosti instrumentace jsou souhrnně uvedeny v kapitole 4.4. Nejsložitějším místem pro měření je satelit, který vykonává takový, pohyb, že jej není možné jakýmkoliv způsobem vodiči spojit se statickou aparaturou. Z tohoto důvodu byl vytvořen **autonomní datalogger**, který je možno velice jednoduše instalovat do převodového stupně na satelit.

V případě užití většího množství různých měřících aparatur, případně sledování více veličin při testování je nutná časová synchronizace měřících ústředen.

### 7.1.5 Záznam a zpracování dat

Jak již bylo výše popsáno, každé měření probíhá na připraveném standu, případně v reálném provozu na dané převodovce. Jednotlivé kroky měření podléhají měřicímu protokolu, který je možné při splnění určitých podmínek měnit. Zejména pak musí být každá odlišnost od měřícího protokolu řádně zaznamenána.

Kontrola měření probíhá vždy a je liší se dle použité měřící aparatury. Při užití standardní statické měřící aparatury nebo měřící aparatury s wifi modulem pro přenos dat, je možné vytvořit na počítači, který zapisuje naměřená data z těchto ústředen, grafické rozhraní, které bude zobrazovat aktuálně získaná data. Vyvinutý datalogger umožňuje přenášení dat se zvolenou frekvencí přes Wi-Fi nebo X-Bee modul do počítače, na kterém se měřený signál zobrazuje. Takto velmi jednoduše dochází ke kontrole prováděného experimentu, kdy je možno okamžitě odhalit případné poruchy měřícího okruhu.

Současně s kontrolou průběhu měření zatížení ozubení lze prováděn například měření vibrací, které odhalí případné potíže při prováděném testování.

Závěr tedy je takový, že měření probíhá dle předepsaného postupu a je po celou dobu kontro-

lováno.

Zpracování dat probíhá dle postupu uvedeného v kapitole 6. 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.

### 7.1.6 Vyhodnocení dat

Na základě provedených měření a vytvořeného zpracovatelského softwaru je provedeno vyhodnocení dat. Vyhodnocení vychází požadavků zadavatele měření a je doplněno o zjištěné poznatky, které se zpravidla při zpracování dat objeví.

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.

Kvalita záběru ukazuje v provedených měření správnost provedených tvarových modifikací zubu a správnost a vhodnost návrhu konstrukce, která se dokáže díky poddajnosti přizpůsobit přenašnému výkonu.

### 7.1.7 Chyby metody

Nejistoty experimentálního měření jsou popsány v kapitole 6.4.5. Velikost těchto **nejistot byla značně snížena způsobem instalace tenzometrů použitím předtisknuté instalační folie**.

Chyby kterých se lze dopustit při instalaci tenzometrů (nekvalitní nalepení, nekvalitní připojení vodičů atd.), musejí být eliminovány důkladnou kontrolou a vyzkoušením odezvy jednotlivých

tenzometrů před instalací celé aparatury do převodovky.

Chyby vzniklé kolizí ozubení s tenzometry nebo jejich vodiči vlivem špatné konstrukce převodovky zcela odstranit nelze, nicméně je vždy nutné instalovat tenzometry na zub s určitou vůlí vůči záběru s ostatními koly. I přesto **bylo docíleno díky optimalizovanému křížovému zapojení větší robustnosti metody**, a je tedy **eliminována ztráta dat**.

Poslední možná chyba může nastat při zpracování dat, nicméně díky provedeným měřením a tudíž několikanásobnému vyzkoušení softwaru, je tato chyba prakticky vyloučena.

### 7.1.8 Interpretace výsledků

Veškeré výsledky jsou interpretovány v číselné nebo grafické podobě. Obsah těchto výsledků je založen na získaných zkušenost a opírá se o teorii týkající se ozubených převodů.

Nejdůležitější informací z naměřených dat je kvalita záběru ozubení, ta poskytuje informace o správnosti návrhu celého převodového ústrojí.

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.

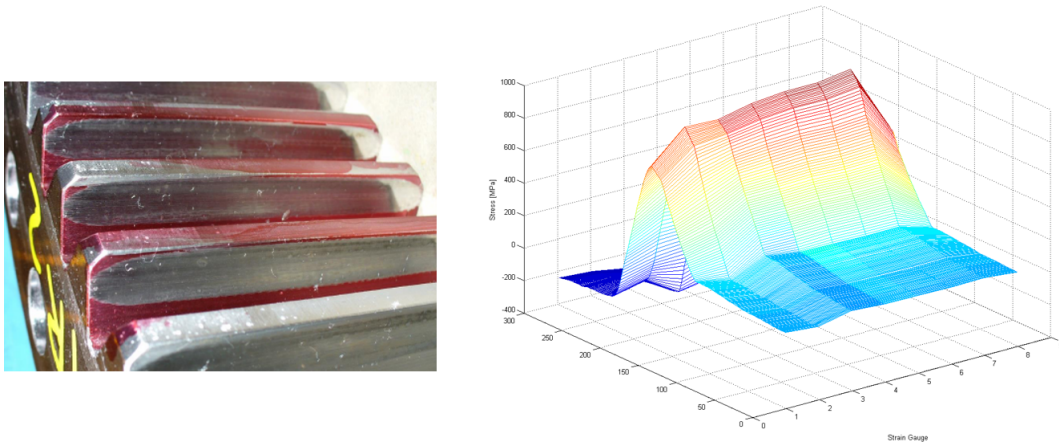
Z naměřených dat lze dále stanovit několik další jevů, ke kterým v převodovce dochází. Zejména u planetových převodovek se jedná o tok výkonu jednotlivými satelity.

### 7.1.9 Validace výsledků

Validace výsledků může probíhat na základě porovnání s několika zdroji. Prvním možným způsobem je porovnání naměřených absolutních hodnot napjatosti na daném zubu s hodnotami z návrhového softwaru, včetně srovnání předpokládaného a naměřeného koeficientu nerovnoměr-

nosti zatížení ozubení.

Druhou možností je porovnání naměřených a vykreslených křivek zatížení zubu s otiskem na zubu při testu na barvu. Validace tohoto typu je zobrazena na obr. 7.1.



Obr. 7.1: Porovnání otisku při testu na barvu s průběhem zatížení zubu [A6]

Jedná se o porovnání dvou experimentálních metod, které jako jediné ukazují skutečný stav kvality záběru ozubení. Velkou nevýhodou tohoto porovnání a všeobecně testu ozubení na barvu je výsledný tvar otisku. V případě, že dochází k proměnlivému střídání zatížení ozubení tak, jak bylo prezentováno na výsledcích v kapitole 6.4.2, je výsledný tvar otisku tvořen superpozicí těchto poloh kol vůči sobě. To znamená, že **výsledný otisk neposkytuje relevantní informace o skutečné kvalitě záběru ozubení.**

### 7.1.10 Zobecnění metodiky

Na základě teoretických poznatků a provedené rešerše byla vypracována metodika na určování kvality záběru ozubených kol. Metodika je založena na experimentálním tenzometrickém měření zatížení ozubení přímo na zubu kola. Jedná se o princip, který sleduje deformaci zubu na několika místech jeho šířky. **Měření lze aplikovat na všechny druhy převodovek s přímým a šikmým evolventním ozubením.**



**Univerzálnost metodiky podporuje vyvinutá autonomní měřící stanice** (autonomní datalogger), která dokáže pracovat s vlastním zdrojem energie a naměřená data zapisovat na vnitřní záznamové médium, případně data vysílat do výpočetního zařízení mimo převodové ústrojí. Tím odpadá nutnost jakéhokoli drátového spojení se statickými periferiemi případně zdrojem energie. Ta je použitelná obecně pro tenzometrické měření tam, kde nelze aplikovat drátové spojení.

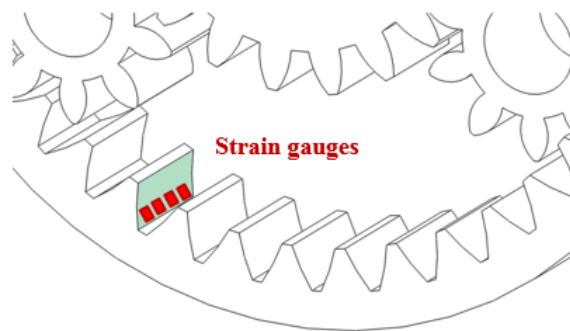
Měření probíhá dle měřícího protokolu a je zároveň kontrolováno na základě vysílaných dat do externího počítače, kde se zobrazují průběhy měřených hodnot deformace. Zpracování naměřených hodnot je prováděno univerzálně připraveným programem v softwaru Matlab. Na základě naměřených hodnot je provedena vhodná interpretace, vztahující se na daný typ měření a propojující specifikace konstrukce s naměřenými daty.

Přesnost metodiky je zaručena použitím v rámci této práce navržené instalační folie. Vysoká efektivita metodiky je garantována tzv. robustním zapojením tenzometrů.

## 7.2 Instalační folie

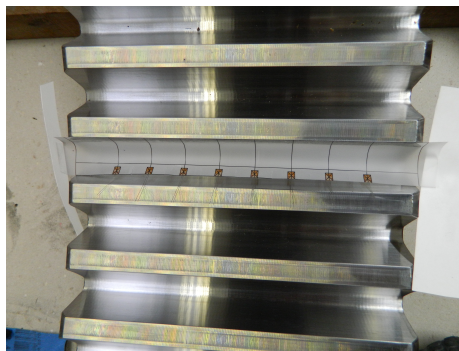
Za účelem dosažení co nejvyšší přesnosti a citlivosti aplikovaných tenzometrů je v bodech 3 a 5 až 10 v kapitole 4.2.1 použita instalační folie.

Ke zjištění kvality záběru je nutno po šířce zubu rovnoměrně umístit několik tenzometrů (ilustračně na obr. 7.2).



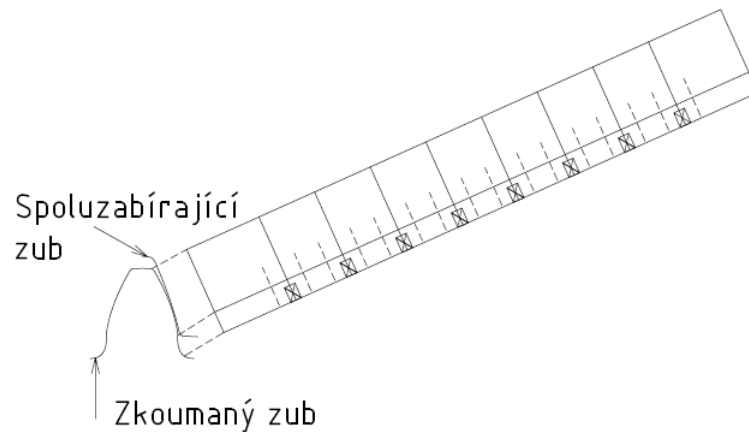
Obr. 7.2: Rozložení tenzometrů po šířce kola [A2]

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 vodících úsečků pro správné zapojování folie na zubu (obr. 7.3).



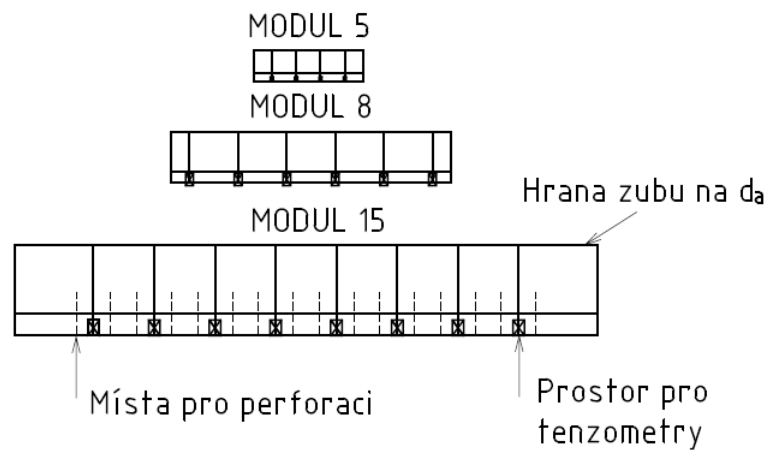
Obr. 7.3: Tenzometrická instalační folie s tenzometry

Výška folie je dána rozvinutím křivky zubu ve 2D řezu (obr. 7.4 ). Místo pro umístění tenzometrů je na folii určeno dle odpovídajícího místa na boku zubu.



Obr. 7.4: Rozvinutí křivky zubu

Tenzometrická instalační folie zajišťuje rovnoměrné rozmístění tenzometrů po šířce kola, velkou přesností nalepení tenzometrů na stejnou úroveň zubu a velmi snadnou instalaci tenzometrů na zub, minimalizuje tak chybu při nalepení tenzometrů. Je možno jí jednoduše parametricky měnit na základě vstupních rozměrů (obr. 7.5).



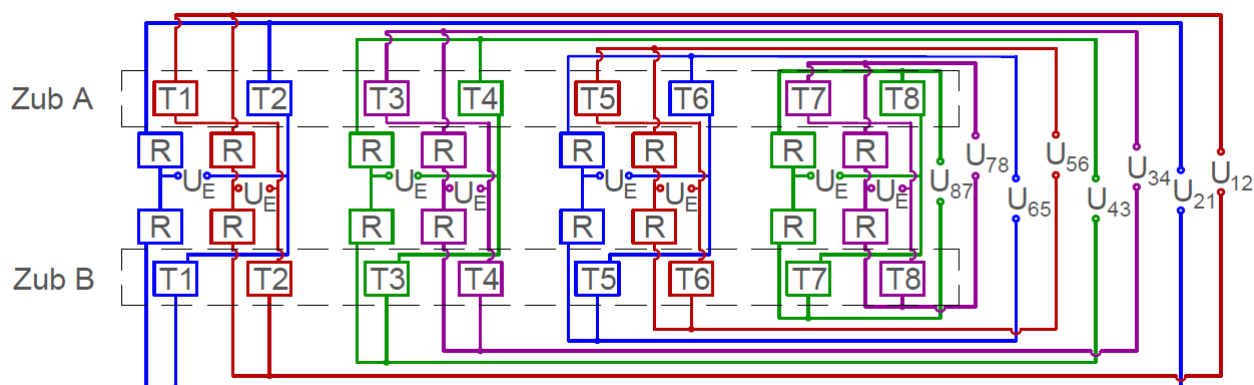
Obr. 7.5: Tenzometrická instalační folie pro různé moduly

Využití folie při aplikaci tenzometrů je patrné z obr. 4.9, 4.11, 4.12 a 4.13 v kapitole 4.2.1.

### 7.3 Robustní zapojení tenzometrů v zubových mezerách

Na základě prvních zkušebních měření, kde došlo k poškození některých tenzometrů, bylo přistoupeno k úpravě zapojení jednotlivých tenzometrů do můstků. Původní způsob zapojení je popsán v kapitole 4.3.

Optimalizované zapojení, které bylo představeno v kapitole 4.3.1, umožňuje kompenzaci teploty, měření nezávislé na směru otáčení (resp. směru působící síly na zub) 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. 7.6.



Obr. 7.6: Kompletní optimalizované křížové zapojení pro 8 tenzometrů

Pro přehlednost lze jednotlivé můstky zapsat pod čísla kanálů dle tab. 7.1.

Kanál	Zub A	Zub B	Kanál	Zub A	Zub B
12	T1	T2	21	T2	T1
34	T3	T4	43	T4	T3
56	T5	T6	65	T6	T5
78	T7	T8	87	T8	T7

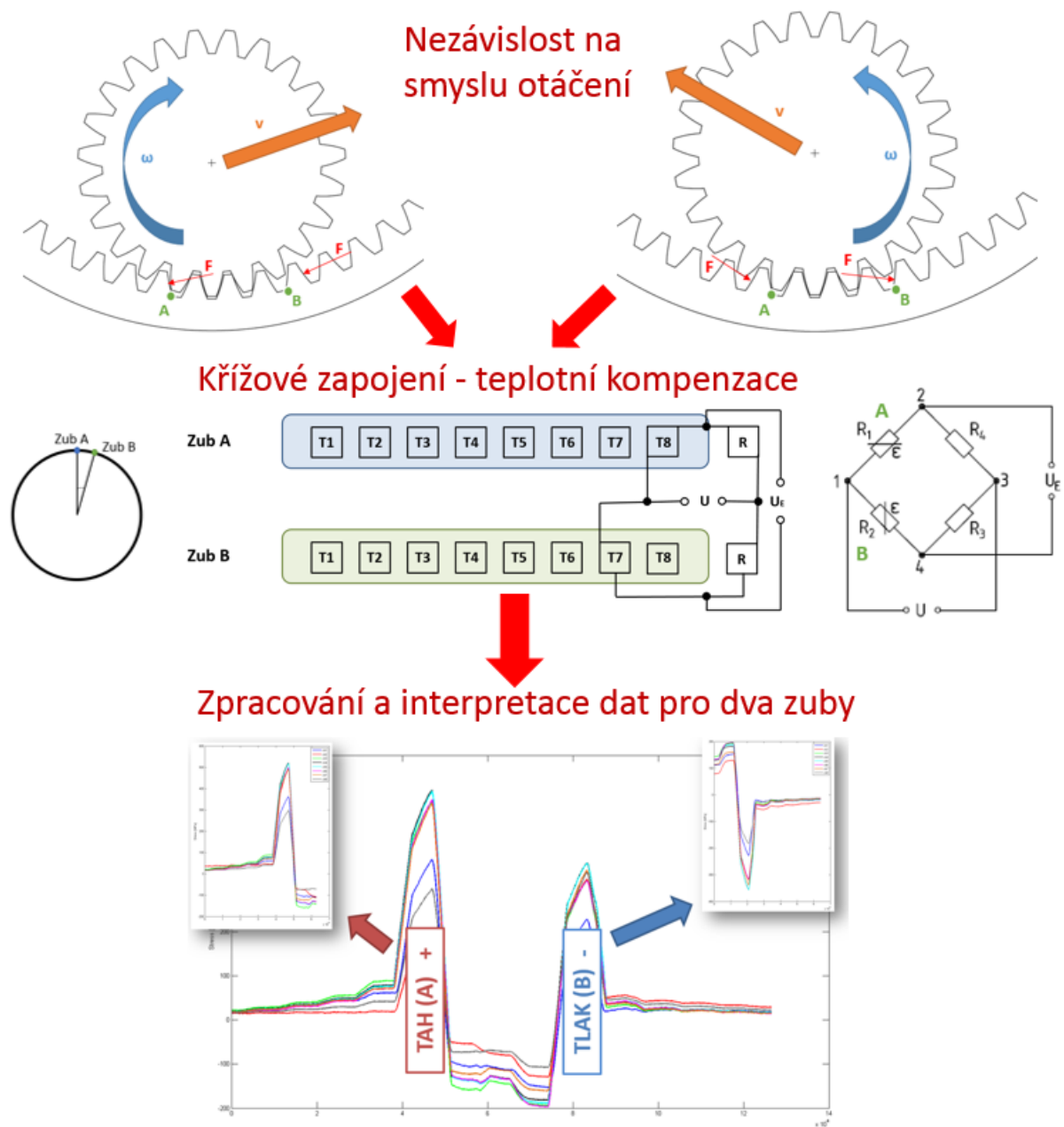
Tabulka 7.1: Přehled kanálů pro 8 tenzometrů na zubu

Na základě zapojení, způsobu instalace tenzometrů na zuby dle obr. 4.22 v kapitole 4.3.1 a v porovnání s ostatními tenzometry, je znám předpokládaný průběh zatížení tenzometru. V pří-

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

V případě tohoto zapojení je nutno provést složitější rozřídění dat, kdy jsou z jednoho kanálu separovány hodnoty pro měřený zub A a B. Detailněji byl tento postup popsán v kapitole 6.2.

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 (obr. 7.7).



Obr. 7.7: Způsob instalace tenzometrů a jejich zapojení

# Kapitola 8

## Závěry práce

### 8.1 Závěr

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 propracovaným a odzkoušeným křížovým zapojením tenzometrů, kdy je navíc kompenzována teplota. Chyba při nepřesnosti nalepení tenzometrů je minimalizována použitím instalační předtisknuté folie.

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.

## 8.2 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.

Cíl práce definovaný v kapitole 3 na základě kapitoly 1.1 a následného zdůvodnění v kapitole 2 byl v této práci splněn.

V návaznosti na definovaný cíl v kapitole 3, byly stanoveny požadované vlastnosti měřící aparatury. Jejich splnění je shrnuto v tabulce 8.1.

Požadavek	Výsledek
Univerzální použitelnost na ozubená kola	Splněno v kap. 4 a ověřeno experimenty
Dostatečná odolnost proti prostředí a změnám podmínek (mazací médium, teplota)	Splněno a ověřeno experimenty
Instalace s minimálními nebo žádnými zásahy do konstrukce převodovky	Splněno v kap. 4.4.4 a ověřeno experimenty
Nezávislost na vnějších zdrojích energie a výpočetní technice	Splněno v kap. 4.4.2 a ověřeno experimenty
Měření v nejcitlivější oblasti	Splněno v kap. 4.1.1

Tabulka 8.1: Požadované vlastnosti měřící aparatury

Na základě těchto požadavků bylo vytvořeno zadání a firmou Clevertch s.r.o. návrh a vytvoření nejdříve první verze autonomního datalogger s následnou aktualizací parametrů a výrobou druhé verze. Vlastnosti aparatury jsou popsány v kapitole 4.4. Potřebné vlastnosti, návrh a popis aparatury byly prezentovány v článku [A6].



Stejně lze komentovat i v kapitole 3 definované dílčí kroky k dosažení cílů:

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.*

**Návrh metody byl proveden v kapitole 4, která obsahuje dílčí kroky. Jedná se o výběr tenzometrů, jejich instalace a zapojení v části 4.1. Publikováno v článcích [A1], [A6] a [A7]. Nově bylo použito křížové zapojení tenzometrů na dvojici zubů a instalční folie.**

2. *Návrh měřicí aparatury s ohledem na požadované výstupy, počet měřících kanálů, snímkovací frekvence, parametry testování a požadovanou autonomii v planetovém soukolí.*

**Návrh nové měřicí aparatury je popsán v kapitole 4.4, včetně nastavení parametrů aparatury v části 4.4.3 a vlastností dataloggeru v kapitole 4.4.2. Publikováno v článku [A4].**

3. *Stanovení postupu zpracování dat včetně vytvoření zpracovatelského softwaru.*

**Provedeno a popsáno v kapitole 6. Publikováno v článku [A3].**

4. *Ověření a optimalizace stanovené metodiky měření na základě provedení série testovacích měření.*

**Ověření metodiky bylo provedeno na základě získaných a zpracovaných experimentálních dat uvedených v kapitole 6.4. Publikováno v článku [A2].**

**Optimalizace původně stanovené metodiky byla provedena zejména v oblasti vytvoření druhé verze nové autonomní aparatury popsané v kapitole 4.4 a také v novém principu zapojení tenzometrů uvedené v kapitole 4.3.1. Publikováno**

v člancích [A8] a [A5].

5. *Interpretace výsledků, definice nejistot, diskuze.*

Interpretace výsledků a stanovení nejistoty bylo provedeno v kapitole 6.4. Závěry z výsledků včetně diskuze jsou uvedené v kapitole 6.5. Publikováno v člancích [A3] a [A6]

6. *Zobecnění výsledků práce pro další využití.*

Zobecnění výsledků práce - vytvoření nové komplexní metodiky pro stanovení kvality záběru je prováděno v závěru této práce v části 7.1.10.

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 univerzality, 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.

### 8.3 Otevřenost problematiky

Otevřenost problematiky lze rozdělit do dvou částí. Jedná se o možnou optimalizaci představené metodiky a o rozšíření užití dat.

Optimalizaci nastavené metodiky je možno provést vytvořením nových autonomních měřících aparatur, které budou sledovat nejnovější trendy v oboru elektroniky. Už nyní je ovšem vytvořen velice výkonný datalogger, který nemusí být doplňován o zesilovače, je tedy možnost

dalšího rozšíření počtu kanálů a zvyšování vzorkovací frekvence. Metodu lze dále rozšiřovat o užití polovodičových tenzometrů, které mají větší citlivost a obecně, lze instalovat užít těchto snímačů o menších rozměrech. Zde je ovšem nutné vyřešit teplotní kompenzaci.

Využití dat lze velice účinně rozšířit o statistické využití. Díky časově delšímu měření a následnému zpracování naměřených hodnot je možné provést stanovení životnosti vytvořeného převodového ústrojí, což bude skýtat velice cenné informace pro výrobce převodovek, v případě, že bude měření prováděno např. na prototypch zařízení, použitelné nejen pro ozubení.

## 8.4 Přínos pro vědu a výzkum

- Stanovení kvality záběru a rozložení zatížení ozubení na základě experimentálního tenzometrického měření deformace zubu ozubeného kola.
- Potvrzení správnosti návrhů ozubení na základě teorie a za požití softwarů zahrnující modifikace tvaru zubu.
- Získání dat pro možné další použití v oblasti statistického rozboru a aplikace za účelem stanovení životnosti s možností optimalizace návrhu únosnosti zubu.

## 8.5 Přínos pro průmysl - praktické využití

- Porovnání návrhu ozubení - dimenzování a tvarové modifikace zubu s experimentálně naměřenými daty za účelem optimalizace návrhových parametrů.
- Robustní metodika pro posouzení celkového návrhu převodového ústrojí prostřednictvím určení kvality záběru.

- Neinvazivní způsob použití univerzální měřící aparatury pro velkou škálu různých převodových ústrojí.
- Stanovení závěrů z naměřených hodnot. Určení případných vad konstrukce nebo neočekávaného chování některého z převodových stupňů převodovky.

# Použitá literatura

- [1] Calculation of load capacity of spur and helical gears ISO 6336-1:1996. Technická zpráva, British Standard, 1997.
- [2] AG, K.: Contact Analysis in the Cylindrical Gear Calculation. *Sharing Knowledge*, 2015.
- [3] Automatizace.hw.cz: Mereni vibraci. 2015, [Online], [cit. 2016-08-25].  
URL  [<http://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/mereni-vibraci-pro-diagnostiku-opotrebeni-stroju.html>](http://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/mereni-vibraci-pro-diagnostiku-opotrebeni-stroju.html)
- [4] Budynas, R.; Nisbett, J.: *Shigley's Mechanical Engineering Design*. 2012.
- [5] Černohorský, J.: AUTONOMA. 2003, [Online], [cit. 2016-08-02].  
URL  [<http://automa.cz/index.php?id\\_document=28815>](http://automa.cz/index.php?id_document=28815)
- [6] ESOS: Monitoring. 2008, [Online], [cit. 2016-08-25].  
URL  [<http://www.diagnostikastroju.cz/pdf/lanovadraha.pdf>](http://www.diagnostikastroju.cz/pdf/lanovadraha.pdf)
- [7] Hoffmann, K.: *An Introduction to Stress Analysis and Transducer Design using Strain Gauge*. 2012.
- [8] Hotait, M.; Talbot, D.; Kahraman, A.: An Investigation of the Influence of Shaft Misalignment on Bending Stress of Helical Gears with Lead Crown. *Gear Technology*, 2008: s. 54–62.
- [9] Janíček, P.: *Technický experiment*. VUT Brno, 1989.
- [10] Kissling, U.: Application and Improvement of Face Load Factor Determination Based AGMA 927. *Gear Technology*, 2014: s. 50–59.

- 
- [11] Kissling, U.; Dinner, H.: Determination of the optimum flank line modifications for gear pairs and for planetary stages. *Sharing Knowledge*, 2015.
- [12] Kopecký, M.: Pevnostní výpočet čelního soukolí s přímými evolventními symetrickými zuby pomocí MKP. *Diplomová práce*, 2005.
- [13] Ligata, H.: PImpact of System-level Factors on Planetary Gear Set Behavior. *Disertační práce*, 2007.
- [14] Mahr, B.: Kontaktanalyse mit KISSsoft. *KISSsoft*, 2015.
- [15] Mitcalc: Mitcalc. 2009, [Online], [cit. 2016-06-10].  
URL <<http://www.mitcalc.com/doc/gear1/help/cz/gear1txt.htm>>
- [16] Moravec, V.: *Konstrukce strojů a zařízení II*. Monatex a.s., 2001.
- [17] Moravec, V.; Dejl, Z.; Němeček, M.; aj.: *Čelní ozubená kola v převodovkách automobilů*. VŠB-TU Ostrava, 2009.
- [18] Moresteam: Design of Experiments. 2011, [Online], [cit. 2016-05-10].  
URL <<https://www.moresteam.com/toolbox/design-of-experiments.cfm>>
- [19] Oswald, B.: Gear Tooth Stress Measurement on the UH-60A Helicopter Transmission. *NASA Technical Paper 2698*, 1987.
- [20] Palat: Ozubeni. 2012, [Online], [cit. 2016-06-25].  
URL <[http://www.strojka.opava.cz/UserFiles/File/\\_sabloný/SPS\\_III/VY\\_32\\_INOVACE\\_C-08-06.pdf](http://www.strojka.opava.cz/UserFiles/File/_sabloný/SPS_III/VY_32_INOVACE_C-08-06.pdf)>
- [21] Petr, K.: Příspěvek k rozvoji metod navrhování vysoce únosných zubů čelního soukolí. *Disertační práce*, 2015.
- [22] Radzevich, P.: *DudlyÁ's Hanbook of Practical Gear Design and Manufacture*. 2012.
- [23] Řezníček, J.: *Experimentální metody certifikace strojů*. 2015.
- [24] Ryant, V.: Možnosti diagnostického měření hluku a vibrací u automobilových převodovek. *Bakalářská práce*, 2014.

- 
- [25] Šalamoun, Č.; Suchý, M.: *Čelní a šroubová soukolí s evolventním ozubením*. Nakladatelství techn. lit., 1990.
- [26] Singh, A.; Ahmet, K.; Ligata, H.: Internal Gears Strains and Load Sharing in Planetary Transmission - Model and Experiments. *IDETC/CIE 2007*, 2007.
- [27] Sritr: Ozubeni. 2011, [Online], [cit. 2016-06-25].  
URL <<http://www.dum.spsnome.cz/2011/tp/sr/sr-tp-sps-03-02-0zubene-prevody.pdf>>
- [28] Švec, V.: *Části a mechanismy strojů, Ozubené převody*. ČVUT v Praze, 2003.
- [29] tech, G.: Acoustic Camera. 2016, [Online], [cit. 2016-07-20].  
URL <<http://www.acoustic-camera.com/en/products/microphone-arrays/sphere-120-60-ac-pro.html>>
- [30] Vlk, M.; Houfek, L.; Hlavoň, P.; aj.: *Experimentální mechanika*. Brno, 2003.
- [31] Žák, P.: Příspěvek k navrhování modifikací geometrie ozubených válcových kol. *Disertační práce*, 2009.
- [32] Zundel, M.: Comparison of Test Rig and Field Measurement Results on Gearboxes for Wind Turbines. *Gear Technology*, 2011: s. 80–84.

# Publikace autora

## Publikace prezentující výsledky disertace

- [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 evolventn teeth in gear-boxes 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.



## Další publikace

- [D1] Berka, O.; Dub, M.; Lopot, F.; aj.: Determination of Transmission Mechanical Efficiency by Strain Gauges Measurement. In *EAN 2016 - 54rd Conference on Experimental Stress Analysis*, 2016, s. 7–8.
- [D2] Dub, M.; Berka, O.; Lopot, F.; aj.: Backlash and torsional stiffness of a gearbox. In *EAN 2015 - 53rd Conference on Experimental Stress Analysis*, 2015, s. 74–77.
- [D3] Dub, M.; Berka, O.; Lopot, F.; aj.: Torsional Characteristics Measurement of a Gearbox. *Applied Mechanics and Materials*, ročník 827, 2016: s. 87–90.
- [D4] Dub, M.; Berka, O.; Starý, F.; aj.: Experimental analysis of positioning the turbine and the gearbox using strain gauge. In *XXI IMEKO World Congress "Measurement in Research and Industry"*, 2015.
- [D5] Dub, M.; Kolář, J.; Lopot, F.; aj.: Experimental analysis of stress state and motion of tram gearbox hinge. In *EAN 2014 - 52nd International Conference on Experimental Stress Analysis*, 2014.
- [D6] Dub, M.; Kolář, J.; Lopot, F.; aj.: Investigation of Tram Gearbox Hinge Behaviour. In *55th International Conference of Machine Design Departments*, 2014.
- [D7] Dub, M.; Kolář, J.; Lopot, F.; aj.: Stress and Motion Analysis of Tram Gearbox Hinge. *Applied Mechanics and Materials*, ročník 732, 2015: s. 223–226.
- [D8] Dub, M.; Lopot, F.; Berka, O.; aj.: Loading of the Axis Gearbox for Metro During Drive Simulation. In *EAN 2016 - 54rd Conference on Experimental Stress Analysis*, 2016, s. 31–32.
- [D9] Dinybyl, V.; Berka, O.; Petr, K.; aj.: *The Latest Methods of Construction Design*. Springer International Publishing, 2015, ISBN 9783319227627.
- [D10] Janda, M.; Kamenický, J.; Berka, O.; aj.: Application of notches in machine elements for measurement sensitivity increase. 2016.

- [D11] Janda, M.; Starý, F.; Dub, M.; aj.: Experimental evaluation of a prestressed bolt connection mounting prestress. In *EAN 2015 - 53rd Conference on Experimental Stress Analysis*, 2015, s. 149–152.

# Seznam obrázků

2.1	Geometrie převodu - upraveno z [28] . . . . .	15
2.2	Vznik evolventy - upraveno z [28] . . . . .	17
2.3	Charakteristika evolventního ozubení - geometrie zubu v normální rovině - upraveno z [28] . . . . .	18
2.4	Základní profil ozubeného hřebene [27] . . . . .	18
2.5	Tvar patního přechodu [21] . . . . .	19
2.6	Normálová rovina (n) a tečná rovina (t) pro přímé (vlevo) a pro šikmé ozubení (vpravo) - upraveno z [28] . . . . .	20
2.7	Modifikace ozubení [21] . . . . .	20
2.8	Čelní a boční vůle [20] . . . . .	22
2.9	Schéma pro výpočet hlavové vůle . . . . .	24
2.10	Schéma pro určení délky záběru - upraveno z [4] . . . . .	25
2.11	Rovinný model silových poměrů v ozubení [15] . . . . .	28
2.12	Zatížení zubu a zobrazení napjatosti - upraveno z [28] . . . . .	31
2.13	Rovinný model ohybového namáhání ozubení [25] a [7] . . . . .	35
2.14	Pásmo dotyku zubů (pracovní šířka $b_p$ a výška $h_p$ ) - upraveno z [25] . . . . .	37
2.15	Distribuce zatížení přes šířku zubu s lineárním ekvivalentním přesazením [1] . . . . .	38
2.16	Určení zatížení na jednotkové šířce zubu [1] . . . . .	39
2.17	Zobrazení určování odchylek vlivem deformace komponent [10] . . . . .	40
2.18	Prvky ovlivňující kvalitu záběru [21] . . . . .	41
2.19	Výsledky návrhu ozubení před a po optimalizaci [2] . . . . .	41
2.20	Rozložení zatížení po šířce ozubení - upraveno z [25] . . . . .	42
2.21	Princip fotoelasticimetrie [23] . . . . .	48

2.22 Fotoelasticimetrie ozubení [4] . . . . .	48
2.23 Kontrola záběru ozubení na barvu. Na levém obrázku je výsledek ze záběru ozubení, kde je jeden z konců více než dvakrát přetížen. Na pravé straně je ideální stav záběru ozubení. [22] . . . . .	49
2.24 Zvukoměr [24] . . . . .	50
2.25 Akustická kamera [29] . . . . .	50
2.26 Snímače vibrací a jejich uchycení [24] . . . . .	51
2.27 Vibrace vzniklé na různých opotřebených nebo poškozených rotujících částech [3] .	52
2.28 Tenzometrické měření zubu [21] . . . . .	53
2.29 Tenzometrické měření zubu [13] . . . . .	53
2.30 Rozmístění řad tenzometrů do pat zubů [8] . . . . .	54
2.31 Naměřená hodnota napjatosti tenzometry v patě a na přechodové části boku zubu [19] . . . . .	54
2.32 Průběh naměřených dat [32] . . . . .	55
2.33 Korunové kolo s nainstalovanými tenzometry [13],[26] . . . . .	55
2.34 odporový tenzometr [23] . . . . .	56
2.35 Wheatstonův můstek [9] . . . . .	59
2.36 Grafická a číselná interpretace uvedených vět [9] . . . . .	62
2.37 Čtvrtmostové zapojení [30] . . . . .	63
2.38 Půlmostové zapojení [30] . . . . .	63
2.39 Plnomostové zapojení [30] . . . . .	63
2.40 Zatížení ohybem [7] . . . . .	64
2.41 Čtvrtmostové zapojení [7] . . . . .	64
2.42 Půlmostové zapojení [7] . . . . .	65
2.43 Plnomostové zapojení [7] . . . . .	66
2.44 Kompenzační tenzometr [7] . . . . .	66
2.45 Rozdělení tenzometrů [30] . . . . .	67
4.1 Diagram postupu dle DOE [18] . . . . .	71
4.2 Rozložení napětí v patě zubu v jednotlivých řezech jeho šířky . . . . .	72

4.3	Prostorové znázornění rozložení napětí v patě zubu v jednotlivých řezech jeho šířky . . . . .	73
4.4	Distribuce napětí v okolí paty zubu a místo instalace tenzometrů . . . . .	74
4.5	Příklad výstupu z programu KISSsoft [2] . . . . .	74
4.6	Skutečný prostor v záběru ozubení (dodáno výrobcem ozubení) . . . . .	75
4.7	Připravené ozubené kolo . . . . .	76
4.8	Příprava povrchu smirkovým papírem . . . . .	77
4.9	Umístění tenzometrů na instalační folii . . . . .	77
4.10	Odmaštění povrchu . . . . .	78
4.11	Umístění instalační folie na měřený zub . . . . .	78
4.12	Nanesení lepidla pod tenzometr . . . . .	79
4.13	Přítlačení tenzometru na vrstvu lepidla . . . . .	79
4.14	Přilepené tenzometry na zubech . . . . .	80
4.15	Připojení tenzometrů na pájecí pole . . . . .	80
4.16	Připojení přívodních vodičů . . . . .	81
4.17	Připojení přívodních vodičů na vnější svorkovnici . . . . .	81
4.18	Ochranná vrstva tenzometrů a vodičů . . . . .	82
4.19	Umístění tenzometrů na ozubené kolo . . . . .	83
4.20	Schéma zapojení do můstku . . . . .	83
4.21	Umístění tenzometrů na zubu s ukázkou zapojení . . . . .	84
4.22	Umístění tenzometrů na korunovém kole - způsob otáčení . . . . .	84
4.23	Umístění tenzometrů na zubu s ukázkou optimalizovaného křížového zapojení . .	85
4.24	Popis vybraného typu planetové převodky; Pinion=pastorek, Ring gear=korunové kolo, Satellite=satelit . . . . .	86
4.25	Prostor pro umístění aparatury (značen fialově) . . . . .	87
4.26	Zesilovač typ 9236 od firmy Burster (převzato od výrobce) . . . . .	87
4.27	Blokové schéma se zesilovači . . . . .	88
4.28	Blokové schéma bez zesilovačů . . . . .	89
4.29	Vzorkovací frekvence . . . . .	90

---

4.30	Měření statického kola s vně umístěnou ústřednou (měřená převodovka, instalace vodičů, měřicí ústředna Devetron a National Instruments . . . . .	91
4.31	Měření ústředny na měřeném rotujícím pastorku vně převodové skříně (měřená převodovka, instalace vodičů a pájecích polí, měřicí ústředna National Instruments s Wi-Fi modulem, počítač pro záznam dat . . . . .	92
4.32	Umístění ústředny do vývrtů ozubeného kola (na levé straně propojení vodiči, na pravé straně již s ochrannou vrstvou tmelu . . . . .	93
4.33	Umístění ústředny do konzole na ozubeném kole . . . . .	94
4.34	Schéma použití vodičů . . . . .	94
5.1	Schéma planetové převodovky . . . . .	97
5.2	Pastorek, satelit a korunové kolo s instalovanými tenzometry . . . . .	98
5.3	Schéma rozmístění tenzometrů na zuby kol . . . . .	98
5.4	Datalogger a systém měřicího zařízení pro ústředny National Instruments . . . . .	99
5.5	Fáze měření . . . . .	99
5.6	Tenzometry na jednotlivých korunových kolech . . . . .	101
5.7	Schéma rozmístění tenzometrů na zuby kol . . . . .	102
5.8	Systém měřicího zařízení pro ústředny National Instruments . . . . .	102
5.9	Fáze měření . . . . .	103
5.10	Schéma planetové převodovky . . . . .	105
5.11	Tenzometry na satelitu . . . . .	106
5.12	Schéma rozmístění tenzometrů na zuby kol . . . . .	106
5.13	Kontrola průběhu měření . . . . .	107
5.14	Fáze měření . . . . .	107
5.15	Fáze měření . . . . .	109
6.1	Signál z tenzometrů T1 až T7 na satelitu s několika výpadky - označeno červeně	111
6.2	Signál z tenzometrů T1, T2, T6 a T7 na pastorku . . . . .	112
6.3	Identifikace signálů z tenzometrů T1, T2, T6 a T7 na pastorku . . . . .	113
6.4	Identifikace signálů z tenzometrů na dvou zubech . . . . .	114
6.5	Kompilace identifikovaných záběrů jednotlivých satelitů . . . . .	115

6.6	Proměnná maximální hodnota zatížení zubu . . . . .	117
6.7	Minimální, průměrná a maximální naměřená hodnota . . . . .	117
6.8	Maxima záběrových křivek . . . . .	118
6.9	Maxima záběrových křivek po šířce zubu . . . . .	120
6.10	Průběh koeficientu $K_{H\beta}$ v závislosti na měřených fázích . . . . .	121
6.11	Vývoj maxim záběrových křivek po šířce zubu při změně zatížení . . . . .	121
6.12	Zatížení zubu naměřené osmi tenzometry . . . . .	122
6.13	Frekvence změn velikosti zatížení satelitů . . . . .	123
6.14	Vzájemné vychýlení satelitu s pastorkem (resp. korunovým kolem) . . . . .	123
6.15	Naměřená data při vzájemné vychýlení satelitu s pastorkem (resp. korunovým kolem); a) minimum naměřeno na levé straně zubu, b) minimum naměřeno na pravé straně zubu . . . . .	124
6.16	Oscilace maxim záběrových křivek - minimum naměřeno na levé straně zubu a minimum naměřeno na pravé straně zubu . . . . .	124
6.17	Křivka záběru zubu šikmého ozubení . . . . .	125
6.18	Deformace ozubeného kola vlivem záběru se zuby přicházející do záběru před měřeným místem . . . . .	125
6.19	Zatížení zubu korunového kola při kontaktu s jednotlivými satelity . . . . .	126
7.1	Porovnání otisku při testu na barvu s průběhem zatížení zubu . . . . .	137
7.2	Rozložení tenzometrů po šířce kola . . . . .	139
7.3	Tenzometrická instalační folie s tenzometry . . . . .	139
7.4	Rozvinutí křivky zubu . . . . .	140
7.5	Tenzometrická instalační folie pro různé moduly . . . . .	140
7.6	Kompletní optimalizované křížové zapojení pro 8 tenzometrů . . . . .	141
7.7	Způsob instalace tenzometrů a jejich zapojení . . . . .	143

# Seznam tabulek

4.1	Parametry datalogeru . . . . .	89
7.1	Přehled kanálů pro 8 tenzometrů na zubu . . . . .	141
8.1	Požadované vlastnosti měřící aparatury . . . . .	145



# **Příloha A - Výsledky z měření I**

## **Příloha B - Výsledky z měření II**

# **Příloha C - Výsledky z měření III**