



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

Využití nanovláknových tenzometrů pro konstrukci snímačů délky

USE OF NANOSTRAIN GAUGE FOR CONSTRUCTION OF LENGTH SENSOR

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Kirchner

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Perníkář, CSc.

BRNO 2016

Sem vložte první stranu zadání.

Původní zadání je samozřejmě oboustranné. Do druhého výtisku diplomové práce se doporučuje vložit kopii zadání taktéž v oboustranném provedení. Na číslování stránek se tím nic nemění.



ABSTRAKT

Cílem této práce bylo zjistit základní charakteristiky chování nanovláknových tenzometrů a na základě pokusných měření potvrdit vhodnost použití pro konstrukci snímačů délky. Pro měření byl navrhnut přípravek s výkyvným ramenem, jehož natočení zatěžuje nanovláknový tenzometr nalepený na rovné straně výbrusu. Byla provedena měření, jež zjišťují vhodný směr zatěžování na tlak a odhalují oblast vykazující lineární chování. Tato lineární oblast se nachází přibližně mezi $44 \div 92\%$ rozsahu nanovláknového tenzometru (0% max. zatížení na tah, 100% max. zatížení na tlak). Další měření se zabývalo časovou stálostí výstupní hodnoty v jednotlivých bodech. Výstupem z těchto experimentů bylo stanovení metodiky a navržnutí snímačů pro další testy s cílem vyvinout snímač pro měření malých průměrů ($1 \div 5\text{mm}$).

KLÍČOVÁ SLOVA

Nanovlákn, tenzometr, snímač, stálost, linearita, metrologie, přesnost měření, nejistota měření, rozdělení, preciznost

ABSTRACT

The aim of this thesis was to determine the basic characteristics of behavior of nanofiber strain gauges and on the basis of experimental measurements to confirm the suitability of the design of the length sensors. There was a product designed with a swivel arm whose rotation burdens the nanofiber strain gauge affixed to the flat side of the cut. Some measurements were carried out to find out a suitable direction of the loading pressure and to reveal the area showing the linear behavior. This linear area is approximately between $44 \div 92\%$ of the range of the nanostrain gauge (0% maximum load tensile, 100% maximum load pressure). Other measurements dealt with temporal stability of the output value at each point. The outcome of these experiments was to determine the methodology and to propose the design of sensors for further tests, the aim of which was to develop a sensor for measuring small diameters (from 1 to 5 mm).

KEYWORDS

Nanostrain, strain gauge, sensor, stability, linearity, metrology, measurement accuracy, measurement uncertainty, distribution, precision



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KIRCHNER, J. *Využití nanovláknových tenzometrů pro konstrukci snímačů délky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 47 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Perníkář, CSc.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Jiřího Perníkáře, CSc a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 27. května 2016

.....

Jan Kirchner



PODĚKOVÁNÍ

V první řadě bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Jiřímu Perníkářovi, CSc za jeho odbodné vedení me práce a poskytnuté materiály. Dále bych chtěl poděkovat mému dědovi Ing. Stanislavu Kirchnerovi za jeho odborné rady, konzultace a kritiku. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat firmě Mesing s.r.o. za zadání této práce a za výrobu mechanických částí pro měření.



OBSAH

Úvod	10
1 Základní termíny a definice	11
1.1 Základní pojmy přesnosti měření	11
1.2 Nejistoty měření	12
1.3 Zákon šíření nejistot	13
1.4 Chyby měření a jejich eliminace	17
1.5 Přesnost měření	19
1.6 Hodnocení jakosti měřidel	21
2 Přehled snímačů délky a jejich vlastností	23
2.1 Indukčnostní snímače	24
2.2 Inkrementální snímače	25
2.2.1 Princip snímání průchodu a odrazu světla	25
2.2.2 Interferenční princip snímání	26
3 Základní charakteristiky tenzometrů a jejich využití pro snímače délky	27
3.1 Vývoj tenzometrů	28
3.2 Tenzometry využívající nanočástice	28
4 Návrh konstrukce snímače s využitím nanovláken	30
4.1 Teoretické předpoklady	30
4.2 Návrh těla snímače	32
4.3 Lepení a manipulace s tenzometrem	33
4.3.1 Manipulace s nanovláknovým tenzometrem	33
4.3.2 Čistění a lepení nanovláknového tenzometru	34
5 Provedení zkoušek a jejich vyhodnocení	34
5.1 Ověření vhodného směru zatěžování a linearity	35
5.2 Měření časové stálosti	37
6 Závěr	38
Literatura	41
Seznam použitých zkratk a symbolů	42
Seznam příloh	43



Úvod

Při kontrole délkových rozměrů v sériové výrobě se používají jednoduchá, někdy i poměrně složitá měřicí zařízení, jejichž základní prvky tvoří rozdílové snímače délky. Tyto snímače neměří absolutní hodnotu délek, ale odchylku od nastavené jmenovité hodnoty.

Společným znakem těchto snímačů je vysoká rozlišitelnost a poměrně malý rozsah měření. V dřívějších dobách se vyráběla široká škála komparačních měřidel s různými převody. Jednalo se o převody mechanické, optické, mechanicko-optické, elektrické a další. Některá tato měřidla: optimetr, orthotest, ultraoptimetr a další často z hlediska konstrukce měřidel velmi „krásné“, nicméně výrobně složité rozměrná a drahá. Rozlišitelnost byla většinou 1 μm , maximálně 0,1 μm a měřicí rozsah do 1 mm.

V současné době jsou nejpoužívanější systémy s převodem elektrickým. Indukčnostní snímače mají malé rozměry, vysoké rozlišení (až 0,01 μm), rozsah 5 mm i více. Velkou výhodou těchto snímačů je i to, že naměřená hodnota je v podobě elektrického signálu, který se může dále zpracovávat. Měřicí zařízení může obsahovat dvacet i více snímačů. Při kontrole složitějších kusů je možné velmi rychle a spolehlivě vyhodnotit nejen průměry a délky, ale i kolmosti, ovalitu a sousost.

Stále vyšší požadavky na jakost, spolehlivost a miniaturizaci snímačů délky si vyžadují výzkum a vývoj nových systémů snímání délky. Zadání bakalářské práce požaduje prověření možnosti využití nanovláknových tenzometrů pro konstrukci snímačů délky.

Tenzometr je pasivní elektrotechnická součástka sloužící k nepřímému měření mechanického pnutí (tenze) na povrchu součásti. Parametry běžně měřené pomocí tenzometrů a oblasti využití jsou: deformace objektů, tlak, síla, krouticí moment, zatížení nosníků mostů, konstrukce přesných vah, vznik pnutí vlivem teploty, měření zbytkového pnutí, měření vibrací, apod.

V současné době není znám případ použití těchto snímačů pro měření délek.

Cílem této práce bylo navrhnout zařízení (snímač), který by byl schopný měřit délku s využitím nanovláknových tenzometrů. Použití nanovláknových tenzometrů pro měření délky se zdá jako použitelná varianta, jelikož na rozdíl od nejpoužívanějších fóliových či polovodičových tenzometrů (nominální odpor 120–300 Ω) mají zhruba 2500x vyšší nominální odpor (až 1 M Ω). Tím odpadá nutnost silného zesílení výstupního signálu. Dalšími významnými důvody pro použití nanovláknového tenzometru jsou jeho minimální prostorové nároky na zástavbu, minimální spotřeba (1 μW) znamenající minimální oteplení a dle prospektů výrobce fakt, že by měli vykazovat lineární chování. Hlavním cílem je potvrzení, nebo vyvrácení možnosti využití nanovláknových tenzometrů pro délkové snímače.



1 ZÁKLADNÍ TERMÍNY A DEFINICE

Základní termíny související s vyjadřováním přesnosti měření jsou definovány v mezinárodním slovníku termínů v metrologii TNI 01 0115. Tento dokument je zpracován příliš exaktně, a je tudíž často těžko srozumitelný. Proto je v této kapitole použita spíše forma srozumitelné interpretace těchto pojmů.

1.1 ZÁKLADNÍ POJMY PŘESNOSTI MĚŘENÍ

Měření je proces experimentálního získávání jedné nebo více hodnot veličiny.

Výsledkem měření by teoreticky měla být absolutně přesná hodnota (hodnota pravá), kterou ovšem nelze získat, neboť neexistují absolutně přesná měřidla a ani absolutně přesné podmínky měření.

Hodnota veličiny.

- pravá hodnota
- skutečná hodnota

Pravá hodnota veličiny není zjistitelná z důvodu neexistence absolutně přesného měřidla a nemožnosti realizovat naprosto ideální podmínky měření. Proto je v praxi nahrazována konvenční hodnotou veličiny, která se získá měřením dané hodnoty pomocí etalonu, nebo obecně měřidlem přesnějším alespoň o jeden řád (desetkrát). Při kalibracích se pro konvenční hodnotu používá termín: „referenční hodnota“.

Konvenční hodnota veličiny (konvenčně pravá) je hodnota veličiny přiřazená pro daný účel k veličině dohodou, která určí její přesnost (nejistotu měření).

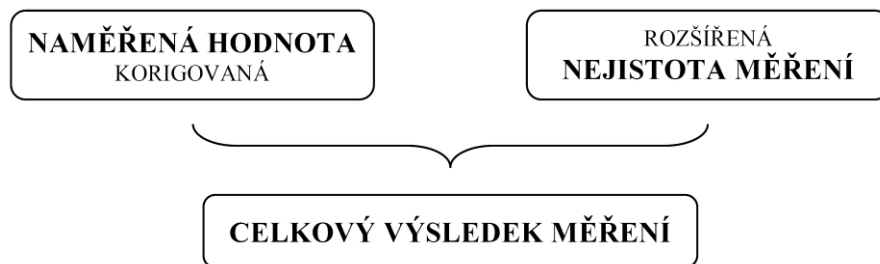
Konvenční hodnota veličiny (dříve „konvenčně pravá hodnota veličiny“) je taková hodnota, která vyhovuje svou přesností (nejistotou) pro daný účel použití. V praxi je pak používána jako referenční hodnota veličiny (etalonů či fyzikálních konstant) pro další kalibrace a zastupuje tak pravou hodnotu veličiny.

Referenční hodnota (konvenční) je hodnota veličiny používaná jako základ pro porovnávání s hodnotami veličin stejného druhu. Referenční hodnota veličiny odpovídá hodnotě konvenční. Tento termín se používá při kalibracích.

Naměřená hodnota je hodnota veličiny získaná měřením. Naměřená hodnota se získá měřením, zpravidla jako aritmetický průměr ze série měření provedených za podmínek opakovatelnosti. V případě nepřímých měření se jednotlivé hodnoty získají výpočtem ze vstupních veličin.

Výsledek měření je soubor hodnot veličiny, přiřazený měřené veličině společně s údajem o její přesnosti (s nejistotou měření).

Celkový výsledek měření sestává z **naměřené hodnoty** oproštěné od systematické chyby (tj. korigované naměřené hodnoty) a z **nejistoty měření**, jak je znázorněno na obr. 1.1



Obr. 1.1 Výsledek měření

1.2 NEJISTOTY MĚŘENÍ

Nejistota měření je nezáporný parametr charakterizující rozptýlení hodnot veličiny přiřazených k měřené veličině na základě použité informace.

Interpretace nejistoty měření:

Máme-li:

Y - naměřenou hodnotu (korigovanou),

U - výslednou rozšířenou nejistotu měření ,

pak se hledaná pravá (skutečná) hodnota měřené veličiny bude nacházet v intervalu

$\langle Y - U; Y + U \rangle$ s danou pravděpodobností (většinou 95 %).

Druhy nejistot:

Standardní nejistota „ u “: se získá buď způsobem „A“, nebo způsobem „B“.

Tím se získá nejistota:

- typu **A** (u_a) získaná z opakovaných měření jako směrodatná odchylka aritmetického průměru
- typu **B** (u_b) získaná jinými způsoby

Kombinovaná standardní nejistota u_c :

$$u_c = \sqrt{u_a^2 + u_b^2} \quad (1)$$

Rozšířená nejistota U :

$$U = u_c \cdot k_u \quad (2)$$

kde k_u je koeficient rozšíření (pokrytí), $k_u = 2$ (nejčastěji), $\max k_u = 3$.



Stanovení nejistoty typu A

Provede se $n = 10$ měření za podmínek opakovatelnosti a z naměřených hodnot se vypočítá u_a jako směrodatná odchylka aritmetického průměru:

$$s_{\bar{x}} = u_a = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}$$

(3)

$$s_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{n}}$$

(4)

Kde s_x je výběrová **směrodatná odchylka** (jednoho měření)

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}$$

(5)

kteřou snadno zjistíme i pomocí kalkulačky nebo počítače.

Je-li počet opakovaných měření $n < 10$, lze standardní nejistotu typu A stanovit ze vztahu:

$$u_{ak} = u_a \cdot k_s$$

(6)

kde k_s je koeficient, jehož velikost závisí na počtu měření n , viz tabulka 1.1.

n	9	8	7	6
k_s	1,2	1,2	1,3	1,3

Tab. 1.1 Hodnoty koeficientu k_s

Poznámka: menší počet měření než 6 se nedoporučuje.

1.3 ZÁKON ŠÍŘENÍ NEJISTOT

Základní otázkou při stanovení postupů určování nejistot v měření je, jak stanovit nejistotu odhadu hodnoty, která je funkcí jiných veličin, jejichž odhady, ale i nejistoty známe.



V případě, že nás zajímá jedna veličina Y (výstupní veličina), která je funkcí m veličin $X_1, X_2, \dots, X_m$ (vstupní veličiny), kterých nejistoty, odhady i kovariance známe a je ve tvaru $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_m)$ (f je známá funkce), určíme odhady výstupní veličiny Y ze vztahu:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (7)$$

Kde $x_1, x_2, \dots, x_m$ jsou odhady vstupních veličin $X_1, X_2, \dots, X_m$
 y je odhad výstupní veličiny

f je známý funkční vztah – reprezentuje postup měření a metodu stanovení a popisuje, jak jsou hodnoty výstupní veličiny Y stanovovány z hodnot vstupních veličin X_i . Ve většině případů se bude jednat o analytickou funkci. Může se ale jednat i o skupinu funkcí zahrnující korekce a korekční faktory systematických vlivů, a tím o komplikovanější vztah mezi výstupní veličinou a vstupními veličinami, který není zapsán jako jedna explicitní funkce. Dále může být funkce f určena experimentálně, nebo může existovat pouze v podobě numericky vyhodnocovaného počítačového algoritmu, nebo se může jednat o kombinaci všech výše uvedených možností.

Nejistotu odhadu y veličiny Y v případě, že odhady $x_1, x_2, \dots, x_m$ jsou nekorelované, určíme ze vztahu,

$$s_x = \sqrt{\sum_{i=1}^m A_i^2 \cdot u^2(x_i)} \quad (8)$$

kde $u(x_i)$ jsou jednotlivé složky nejistot vstupních veličin
 A_i je koeficient citlivosti (převodu) příslušného zdroje nejistoty, který je znám, popř. se určí jako parciální derivace funkce f podle příslušné vstupní veličiny x_i .

Pro koeficienty A_i platí:

$$A_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{\partial f}{\partial X_i} \Big|_{X_1=x_1, X_2=x_2, \dots, X_m=x_m} \quad (9)$$

V případě, že odhady $x_1, x_2, \dots, x_m$ jsou korelované, musíme uvažovat i kovariance mezi jednotlivými odhady, které tvoří další složky výsledné nejistoty.

Ve většině praktických případů je funkce f lineární, pak koeficienty $A_i \pm 1$ a výsledná nejistota u_b se vypočítá pomocí vztahu:



$$u_b = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_{b_i}^2}$$

(10)

Postup při určování nejistot typu **B**

- 1) Vytipují se možné zdroje nejistot $Z_1, Z_2, \dots, Z_j$.
- 2) Určí se standardní nejistoty typu **B** u_{bz_i} každého zdroje nejistot (převzetím hodnot z technické dokumentace, kalibračních listů, technických norem, údajů výrobce atd. nebo odhadem).

Postup:

- Pro danou ovlivňující veličinu se odhadne se maximální rozsah změn (chyba) $\pm z_{max}$ (např. od měřené hodnoty). Velikost z_{max} se volí tak, aby její překročení bylo málo pravděpodobné
- Uváží se, které rozdělení pravděpodobnosti nejlépe vystihuje výskyt hodnot v intervalu $\pm z_{max}$ a z tabulky rozdělení pravděpodobnosti odečteme konstantu **K**
- Je-li pravděpodobnost výskytu hodnot v okolí středu intervalu vyšší než výskyt hodnot v krajním intervalu, použijeme normální rozdělení (**K = 2**). V případě, že rozdělení pravděpodobností odchylek v intervalu $\pm z_{max}$ je přibližně stejné, předpokládá se stejná hodnota pravděpodobnosti pro všechny odchylky, tzn. Volíme rovnoměrné rozdělení (**K = $\sqrt{3}$**).
- Určí se nejistoty typu **B** z jednotlivých zdrojů Z_j dle vztahu:

$$u_{b_i} = \frac{z_{max}}{K}$$

(11)

kde **K** se zvolí dle typu rozdělení (hustoty pravděpodobností) z tabulky 2.2. Celková nejistota typu **B** je dána geometrickým součtem nejistot jednotlivých zdrojů.

$$u_b = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_{b_i}^2}$$

(12)

Možné zdroje standardní nejistoty u_b :

Pro měření délek

- chyby měřidla
- tepelné deformace



- pružné deformace
- chyby ve styku
- vliv operátora

Pro většinu případů měření elektrických veličin, nebo ostatních veličin, které jsou vhodnými převodníky převedeny na elektrické signály, (což je v poslední době případ většiny měření), je možné vybírat z následujících zdrojů:

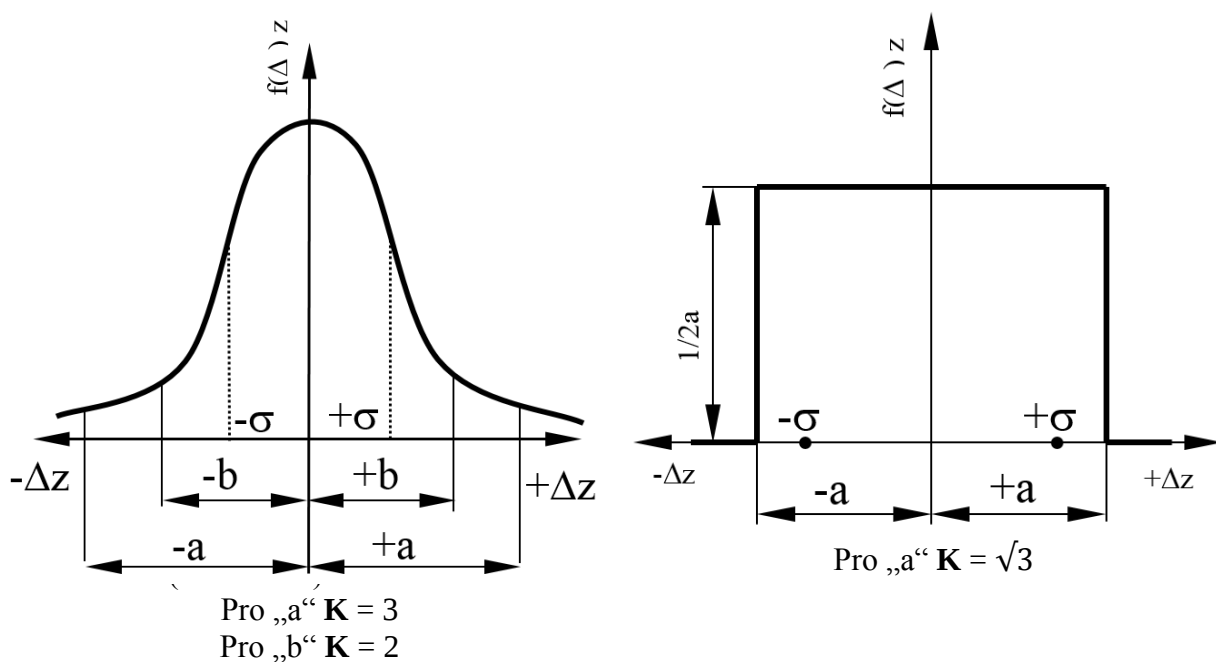
Vlivy vázané na použité přístroje, etalony a vybavení:

- nejistoty kalibrace
- stabilita (časová specifikace) přístrojů
- zanedbané systematické chyby
- vnitřní tření v přístrojích
- rozlišitelnost/rozlišení odečtu z přístrojů (v některých případech může nahradit standardní nejistotu u_a)
- hystereze, mrtvý chod
- specifikace výměnných částí přístrojů

Vlivy okolního prostředí a jejich změny:

- tlak, změna tlaku
- relativní vlhkost,
- teplota okolí
- elektrické pole
- osvětlení, příp. jeho frekvence a tepelné vyzařování

Určování koeficientu **K** podle druhu rozdělení





1.4 CHYBY MĚŘENÍ A JEJICH ELIMINACE

Chyba měření je naměřená hodnota veličiny mínus referenční hodnota veličiny,

$$\Delta = x_m - x_p \quad (13)$$

kde x_m je naměřená hodnota měřené veličiny

x_p konvenční (referenční) hodnota měřené veličiny

Relativní chyba je podíl chyby měření a pravé hodnoty měřené veličiny,

$$\Delta_p = \frac{x_m - x_p}{x_p} \quad (14)$$

kterou je možné vyjádřit v procentech:

$$\Delta_p = \frac{x_m - x_p}{x_p} \cdot 100 [\%] \quad (15)$$

Výsledky minimálně 5-ti měření po sobě, prováděné za podmínek opakovatelnosti se zpravidla řídí zákonem normálního rozdělení, což platí i o chybách měření.

Klasifikace chyb měření:

- **celková chyba Δ** , která se skládá z chyby **systematické** a **náhodné**
- **hrubá chyba**, která je naprosto nepřipustná a platí zásada, že dobrý metrolog nesmí udělat hrubou chybu.
- **Systematická chyba Δ_s** je střední hodnota, která by vznikla z nekonečného počtu měření téže měřené veličiny, uskutečněných za podmínek opakovatelnosti, od které se odečte pravá hodnota měřené veličiny.
- **Náhodná chyba δ** je výsledek měření mínus střední hodnota, která by vznikla z nekonečného počtu měření téže měřené veličiny uskutečněných za podmínek opakovatelnosti.

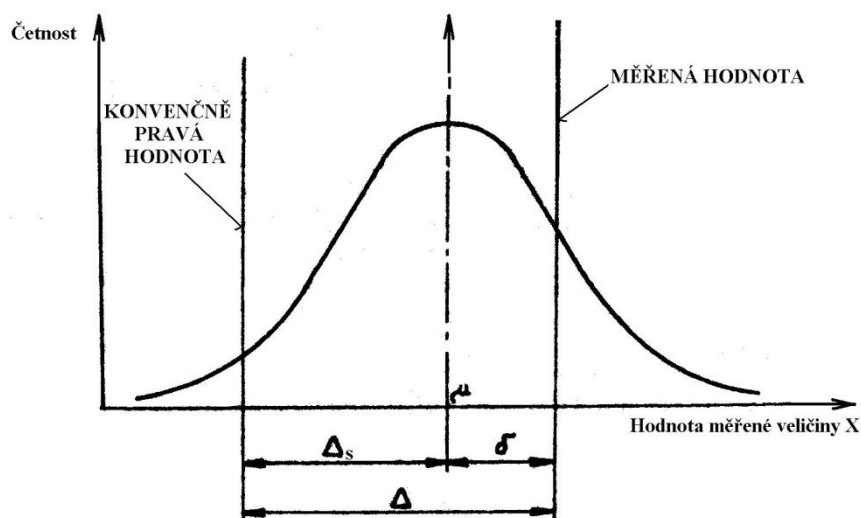


Chyba měření Δ

$$\Delta = \Delta_s + \delta$$

(16)

kde Δ_s systematická chyba
 δ náhodná chyba



Obr. 1.3 Grafické vyjádření chyby měření

Eliminace chyb měření

Systematickou chybu eliminujeme pomocí korekce, kterou přičteme k nekorigovanému výsledku měření.

Korekce je algebraicky připočtená hodnota k nekorigovanému výsledku měření ke kompenzaci systematické chyby. Korekce má hodnotu systematické chyby ale opačné znaménko.

Zjištění hodnoty systematické chyby, přesněji jejího odhadu se provede následovně:

Provede se série n měření za podmínek opakovatelnosti, výsledek měření se vypočte jako aritmetický průměr. Od toho se odečte konvenční hodnota získaná například měřením pomocí etalonu.

V praxi je zjištění systematické chyby velmi důležité pro zpřesňování výsledků měření. Přesnost odhadu střední hodnoty je tím větší, čím je větší počet opakovaných měření n .

Eliminace náhodné chyby

Náhodná chyba jednoho měření může nabývat hodnot maximálně $\pm 3s_x$ (směrodatné odchylky). Snížit ji můžeme tak, že měření opakujeme n -krát za podmínek opakovatelnosti a jako výsledek měření vypočteme aritmetický průměr $\bar{x}$.



Směrodatná odchylka aritmetického průměru:

$$s_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{n}}$$

(17)

Znamená to, že když například měření opakujeme 4x, směrodatná odchylka, a tím i největší hodnota náhodné chyby, se zmenší 2x.

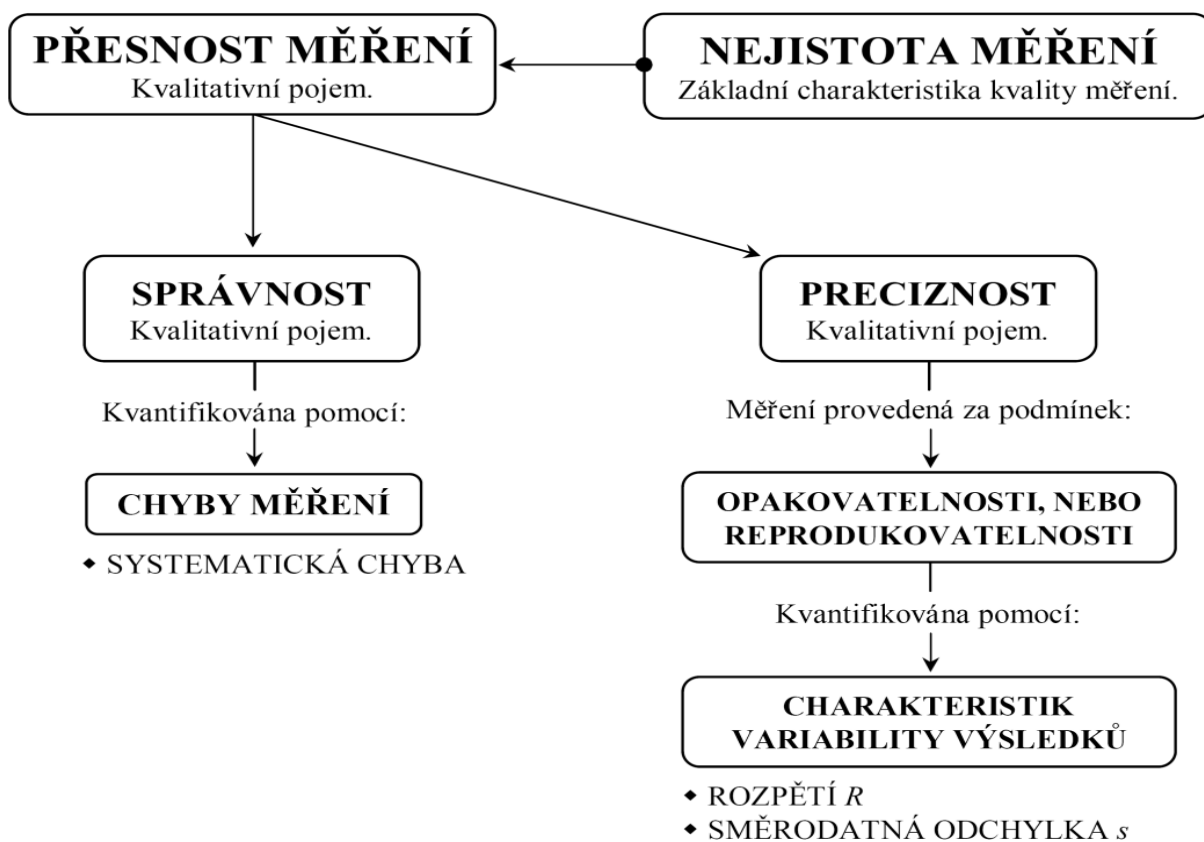
1.5 PŘESNOST MĚŘENÍ

Přesnost měření je těsnost shody mezi naměřenou hodnotou veličiny a pravou hodnotou měřené veličiny.

Přesnost měření jako taková, je kvalitativní pojem, nedá se kvantifikovat. Kvantitativní charakteristika, která vyjadřuje přesnost výsledku měření je **nejistota měření**.

Při vyhodnocování měření se kvantifikují dvě základní charakteristiky:

1. **Odhad průměru** (střední hodnoty, polohy), - správnost (pravdivost)
2. **Odhad variability** (rozptylu) – preciznost



Obr. 1.4 Charakteristiky přesnosti měření



Správnost měření je těsnost shody mezi aritmetickým průměrem nekonečného počtu opakovaných naměřených hodnot veličiny a referenční hodnotou veličiny.

Tato definice se nedá samozřejmě kvantifikovat. Jedná se prakticky o systematickou chybu měření, (viz Obr. „Grafické vyjádření chyby měření“). V metrologické praxi se tato charakteristika nazývá strannost. Systematická chyba se eliminuje pomocí korekce.

Preciznost měření je těsnost shody mezi indikacemi nebo naměřenými hodnotami veličiny získanými opakovanými měřeními na stejném objektu, nebo na podobných objektech za specifikovaných podmínek.

Preciznost se kvantifikuje pomocí charakteristik variability (rozptylu).

Pro tyto účely se používá:

Rozpětí

$$R = x_{max} - x_{min} \quad (18)$$

Směrodatná odchylka

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2} \quad (19)$$

Vždy musí být uvedeno, o jaký parametr se jedná.

Podle specifikovaných podmínek se rozeznává:

- a) **Preciznost za podmínek opakovatelnosti**
(dříve opakovatelnost)
- b) **Preciznost za podmínek reprodukovatelnosti**
(dříve reprodukovatelnost)
- c) Mezilehlá preciznost

Poznámka: podmínky mezilehlé preciznosti měření se ve strojírenství nepoužívají.

Podmínky opakovatelnosti měření:

- stejné měřidlo
- stejný postup měření
- stejný obslužný personál
- stejné pracovní podmínky a stejné místo měření
- opakování měření na stejném nebo podobných objektech v krátkém časovém úseku

Podmínky reprodukovatelnosti měření:



vychází z podmínek opakovatelnosti, ve kterých je změněna minimálně jedna podmínka, tj.:

- různé postupy měření
- různý obslužný personál
- různý měřicí systém
- různá místa měření
- opakování měření na stejném nebo podobných objektech

Hodnocení preciznosti měření za podmínek reprodukovatelnosti je ale možné pouze pro srovnatelné měřicí systémy.

1.6 HODNOCENÍ JAKOSTI MĚŘIDEL

K základním charakteristikám přesnosti měřidla, které se dají kvantifikovat, patří :

Rozlišitelnost (indikačního zařízení) je kvantitativní vyjádření způsobilosti indikačního zařízení rozlišit velmi blízké hodnoty indikované veličiny. Rozlišitelnost je interpretována například jako **hodnota jednoho dílku stupnice** (u analogových měřidel), nebo **jednoho digitu** (u digitálních měřidel)

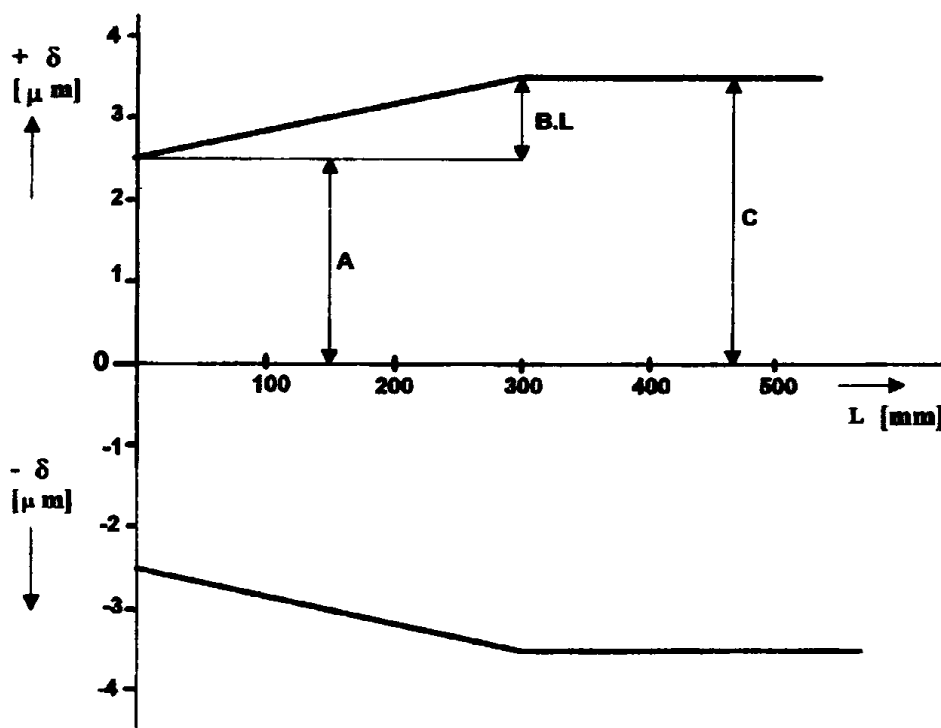
Největší dovolená chyba δ (měřidla) je extrémní hodnota chyby daného měřidla povolená specifikacemi, normou, garantovaná výrobcem atd.

Největší dovolená chyba měřidla je zpravidla **větší než rozlišitelnost**, proto při odečítání měřené hodnoty na stupnici neodhadujeme zlomky nejmenšího dílku (s výjimkou kalibrace).

Největší dovolená chyba měřidla závisí zpravidla na absolutní hodnotě měřené veličiny.

$$\delta = \pm(A + B \cdot l) \leq C [\mu m] \quad (20)$$

Kde	<i>l</i>	hodnota měřené veličiny v mm (případně v m)
	<i>A</i>	konstanta zahrnující vliv náhodných chyb
	<i>B</i>	konstanta zahrnující vliv nevyloučených systematických chyb
	<i>C</i>	horní hranice chyby δ



Obr. 1.5 Geometrická interpretace vztahu (19)

Žádný výsledek měření provedený za daných podmínek nesmí mít chybu větší, než je největší dovolená chyba (pravděpodobnost 100%).

Nejistota měření

Pokud nás zajímá jakost měřidla kvantifikovaná pomocí nejistoty měření, musíme maximálně eliminovat vlivy, které s daným měřidlem přímo nesouvisí (vliv operátora, okolního prostředí apod.)

Mimo uvedené parametry přesnosti se definují další charakteristiky jakosti měřidla:

- Strannost
- Opakovatelnost
- Reprodukovatelnost
- Stabilita
- Linearita

Strannost je rozdíl mezi přijatou referenční hodnotou a střední hodnotou výsledků zkoušek. Strannost je míra systematické chyby. Pro kvantifikaci strannosti je třeba získat referenční hodnotu znaku, která se získá zpravidla pomocí referenčního etalonu.

Opakovatelnost (výsledků měření) je těsnost shody mezi výsledky po sobě následujících měření téže měřené veličiny, provedených za stejných podmínek opakovatelnosti.



Reprodukovatelnost (výsledků měření) je těsnost shody mezi výsledky po sobě následujících měření téže měřené veličiny, provedených za změněných podmínek měření. Při hodnocení jakosti měřicího zařízení se reprodukovatelnost hodnotí z hlediska variability výsledků měření způsobené operátory.

Stálost umožňuje předvídat chování měřidla v budoucnosti. Měřidlo a měřicí systém musí být odolné proti všem vlivům, které způsobují nestabilitu (teplotní změny, opotřebení, koroze, atd.). V některých případech je eliminace těchto vlivů složitým problémem a je zvláště těžké kontrolovat všechny tyto vlivy současně.

Linearita se analyzuje na základě výběru hodnot v celém rozsahu měřidla. Zjišťuje se na základě porovnání hodnot průměrů výsledků měření jednotlivých kusů s konvenčně pravou hodnotou.

2 PŘEHLED SNÍMAČŮ DÉLKY A JEJICH VLASTNOSTÍ

V dnešní době se využívá pro přesné měření délky převážně dvou typů snímačů. Nejrozšířenějším typem snímačů jsou snímače indukčnostní. Další poměrně rozšířenou skupinou jsou snímače inkrementálního typu, jež se dále dělí dle dvou základních principů na snímače využívající fotoelektrické pravítko a na snímače využívající laserové holografické pravítko. Zřídka se lze setkat s metodou využívající laser interferometrie v klasické podobě, jelikož problémem bývá obtížnost je vyrobit v přijatelně malém rozměru.

Rozdělení snímačů

- Přímé - snímaná veličina je i na výstupu snímače
- Nepřímé - výstupní signál ze snímače (obvykle elektrický) je úměrný snímané měřené veličině.

Výhody nepřímých snímačů s převodem na elektrickou veličinu:

- snadné zpracování elektrického signálu v analogové i digitální formě
- možnost dálkového přenosu dat
- převod na unifikovaný signál
- vysoká citlivost a rychlost elektrických snímačů

Rozdělení snímačů mechanických veličin:

Podle druhu měřené fyzikální veličiny

- polohy
- rychlosti a zrychlení
- kmitavého pohybu
- mechanického napětí
- síly atd.



Podle průběhu výstupního signálu

- spojité
- limitní
- číslicové

Podle principu činnosti

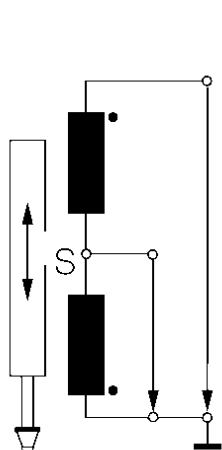
- mechanické
- odporové
- magnetické
- indukční
- kapacitní
- optické
- ultrazvukové atd.

Podle způsobu odměřování

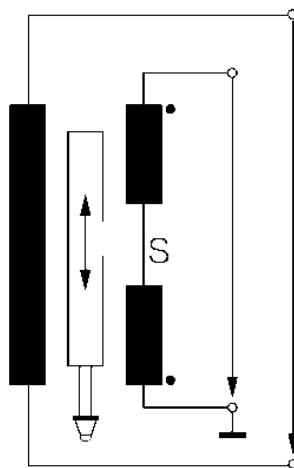
- absolutní
- přírůstkové (inkrementální)
- smíšené

2.1 INDUKČNOSTNÍ SNÍMAČE

Princip měření u indukčních snímačů spočívá ve změně indukčnosti mezi cívkami. Ke změně dochází vlivem změny polohy magneticky vodivého jádra vůči sadě cívek. Základním rozdělením je rozdělení na snímače pracující na principu polomůstku (Obr. 2.1) a na snímače využívající principu diferenciálního transformátoru (Obr. 2.2).



Obr. 2.1 Polomůstek



Obr. 2.2 Lineární diferenciální transformátor



Základní parametry:

Parametr:	Běžná hodnota:	Jednotka:
• Citlivost	$8 \div 200$	[mV/V/mm]
• Měřicí síla	$0,6 \div 4$	[N]
• Nosný kmitočet	$5 \div 19,4$	[KHz]
• Opakovatelnost	$0,05 \div 0,5$	[μm]
• Pohon zdvihu	vakuový / tlakový vzduch / mechanický	
• Rozlišitelnost	$0,2 \div 1$	[μm]
• Rozsah měření	$0,5 \div 5$	[mm]

2.2 INKREMENTÁLNÍ SNÍMAČE

U inkrementálního měření je dělení tvořeno pravidelnou mřížkovou strukturou. Optický rastr tvoří dvě souběžné stopy, inkrementální a referenční. Polohová informace se získává počítáním jednotlivých přírůstků (měřicích kroků) od libovolně nastaveného nulového bodu. Jelikož pro stanovení polohy je nutná absolutní vazba, nachází se na měřítku další stopa s referenčními značkami. Vzdálenost mezi referenčními značkami odpovídá jedné periodě výstupního signálu.

Základní parametry:

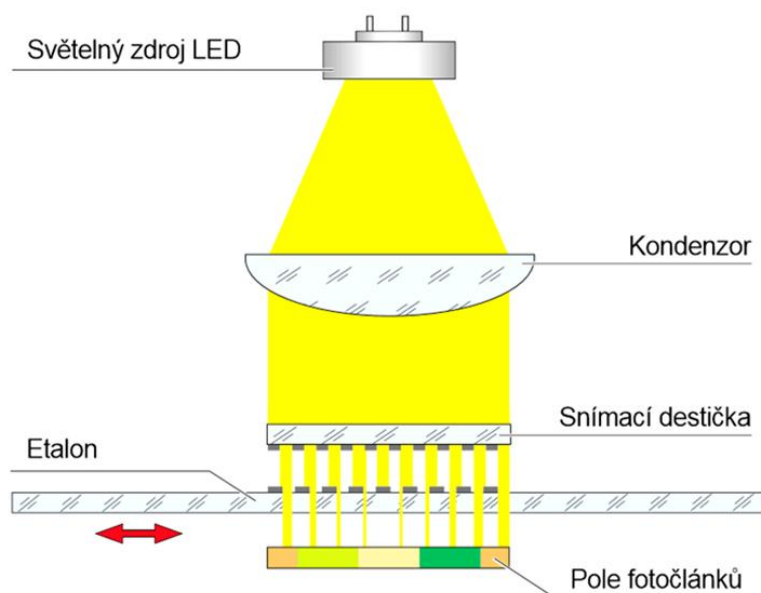
Parametr:	Běžná hodnota:	Jednotka:
• Citlivost	$8 \div 200$	[mV/V/mm]
• Měřicí síla	$0,1 \div 1,7$	[N]
• Opakovatelnost	$0,05 \div 0,5$	[μm]
• Pohon zdvihu	vakuový / tlakový vzduch / mechanický	
• Rozlišitelnost	$0,03 \div 1$	[μm]
• Rozsah měření	$0,5 \div 5$	[mm]

2.2.1 PRINCIP SNÍMÁNÍ PRŮCHODU A ODRAZU SVĚTLA

Výstupní signál generují přechody světla a tmy přes pole fotočlánků. Dvě čárové mřížky se shodnou nebo podobnou periodou dělení se vzájemně pohybují. Nazývají se měřítko, resp. snímací destička. Nosný materiál snímací destičky je průsvitný a dělení měřítka může být naneseno na průsvitném, nebo reflexním materiálu.

Běžné rozměry periody dělení mřížky pro princip snímání průchodu a odrazu světla jsou 20-40 μm . Čím je perioda dělení mřížkové struktury menší, tím menší a úžeji tolerovaný je odstup mezi snímací destičkou a měřítkem.

Při průchodu paralelního světla vznikají na mřížce světlé a tmavé pruhy, jež se dle pohybu různě kryjí s mřížkou na snímací destičce. Světelné změny zachytává pole fotočlánků (Obr. 2.3).

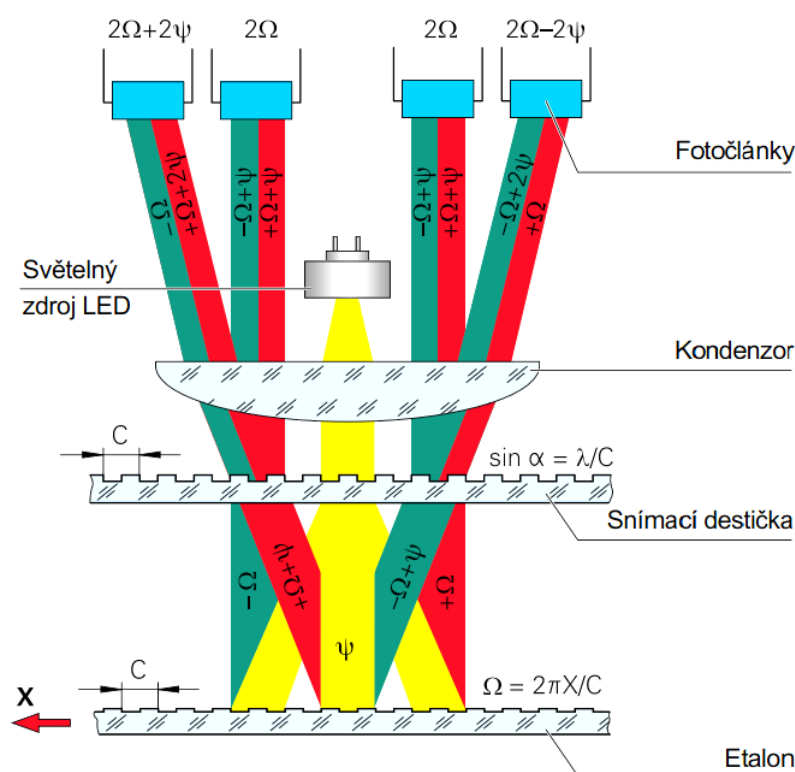


Obr. 2.3 Princip snímání průchodu a odrazu světla

2.2.2 INTERFERENCEČNÍ PRINCIP SNÍMÁNÍ

Snímače využívající interferenční princip snímání využívají pro generování signálů difrakci a interferenci světla na mřížce s jemným dělením, ze které lze odečíst vzájemný pohyb. Jako optické měřítko se používá fázová mřížka s jemným dělením. Fázovou mřížku tvoří reflexní rysky o výšce $0,2\ \mu\text{m}$ na rovném reflexním povrchu. Před ní se jako snímací destička nachází průsvitná fázová mřížka se stejnou periodou dělení, jako má měřítko.

Obvyklá perioda dělení mřížek pro interferenční způsob snímání je mezi $4\text{--}8\ \mu\text{m}$. Čím je perioda dělení mřížkové struktury menší, tím menší a úžeji tolerovaný je odstup mezi snímací destičkou a měřítkem.



Obr. 2.4 Interferenční princip snímání

Vlna, která dopadne na snímací destičku, se rozloží pomocí difrakce na tři dílčí vlny řádu 1, 0 a -1 s přibližně stejnou intenzitou. Tyto vlny se na měřítku s fázovou mřížkou ohnou a rozloží. Větší část světelného toku je v odraženém řádu difrakce 1 a -1. Tyto dílčí vlny se znovu setkají na fázové mřížce snímací destičky, znovu se ohnou a interferují. Přitom vznikají tři sledy vln, které opustí snímací destičku pod různými úhly. Relativní pohyb snímací destičky a měřítka uděluje fázovému sledu fázový posuv, který se mění v závislosti na pohybu. Fotočlánky přemění světelný tok na elektrické signály (Obr. 2.4).

3 ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY TENZOMETRŮ A JEJICH VYUŽITÍ PRO SNÍMAČE DÉLKY

Tenzometr je pasivní elektrotechnická součástka sloužící k nepřímému měření mechanického pnutí (tenze) na povrchu součásti. Parametry běžně měřené pomocí tenzometrů a oblasti využití jsou: deformace objektů, tlak, síla, krouticí moment, zatížení nosníků mostů, konstrukce přesných vah, vznik pnutí vlivem teploty, měření zbytkového pnutí, měření vibrací, apod. Na základě zadání se práce zabývá ověřením možnosti použití tenzometrů pro snímání malých délek. Výhodou těchto snímačů by měly být jejich malé rozměry.

Fyzikální podstatou tenzometrického měření je úměrnost mezi deformací materiálu a působící silou. Drátkové tenzometry na principu Hookeova zákona, který popisuje zmenšení průřezu drátků při zatížení, a tím vzrůstá i jeho odpor.



3.1 VÝVOJ TENZOMETRŮ

První tenzometr drátkového typu byl vyvinut v roce 1938. Konstrukční řešení bylo velmi podobné dnešním typům. Mřížka tvořená drátkem o průměru 0,025mm byla nalepena přes tenkou izolační podložku na testovací povrch pomocí epoxidového lepidla. Dalším bodem ve vývoji tenzometrů bylo vyvinutí fóliového tenzometru v roce 1952.

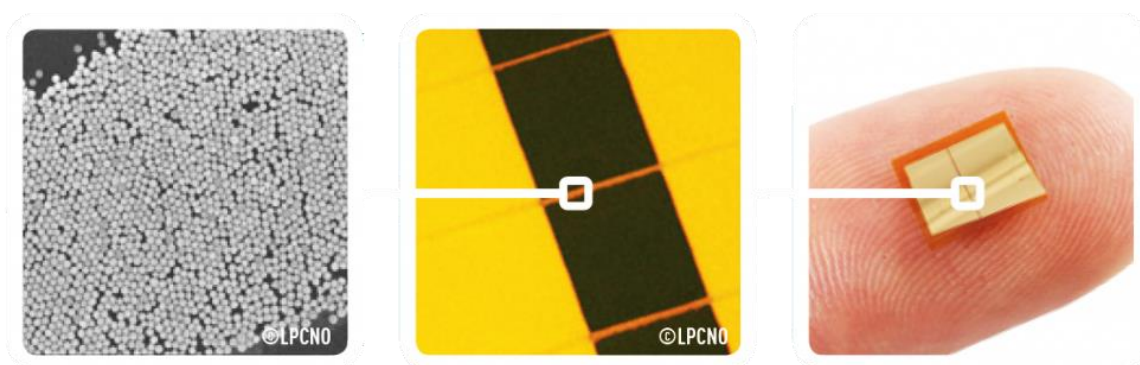
Fóliové tenzometry je možné dostatečně miniaturizovat, což je nutný krok pro masivní rozšíření do široké škály průmyslových odvětví. Výroba obvykle probíhá napařováním, naprašováním a odleptáváním.

Novější variantou klasického tenzometru jsou polovodičové tenzometry. Tento typ tenzometru tvoří pásek vyřezaný z monokrystalu křemíku či germánia, difuzně znečištěného pomocí různých příměsí výrazně ovlivňující vlastnosti tenzometru. Kromě využití monokrystalu se využívá pro konstrukci polovodičových tenzometrů i polykrystalu, na který jsou příměsí naprašovány.

3.2 TENZOMETRY VYUŽÍVAJÍCÍ NANOČÁSTICE

V roce 2015 na mezinárodním strojírenském veletrhu ve Stuttgartu byly poprvé představeny francouzskou firmou Nanolike tenzometry využívající nanočástice, místo dnes široce používaného krystalu či napařeného filmu kovu na polyamidovou fólii. Firma Nanolike není vstřícná v poskytování informací a komunikace vážne také, tudíž získávání informací bylo značně ztíženo.

Nanočástice jsou nanesené v prouzcích na dvě zlaté elektrody, které mezi sebou mají mezeru 0,1mm a jsou nanesené na polyamidovém podkladu. Na stránkách výrobce lze dohledat ilustrační obrázek s postupným přiblížením (viz Obr. 3.1). Jelikož se údaje na stránkách výrobce a informace z výrobního protokolu od výrobce v některých bodech rozcházejí, rozhodl jsem se informace ověřit nezávisle.

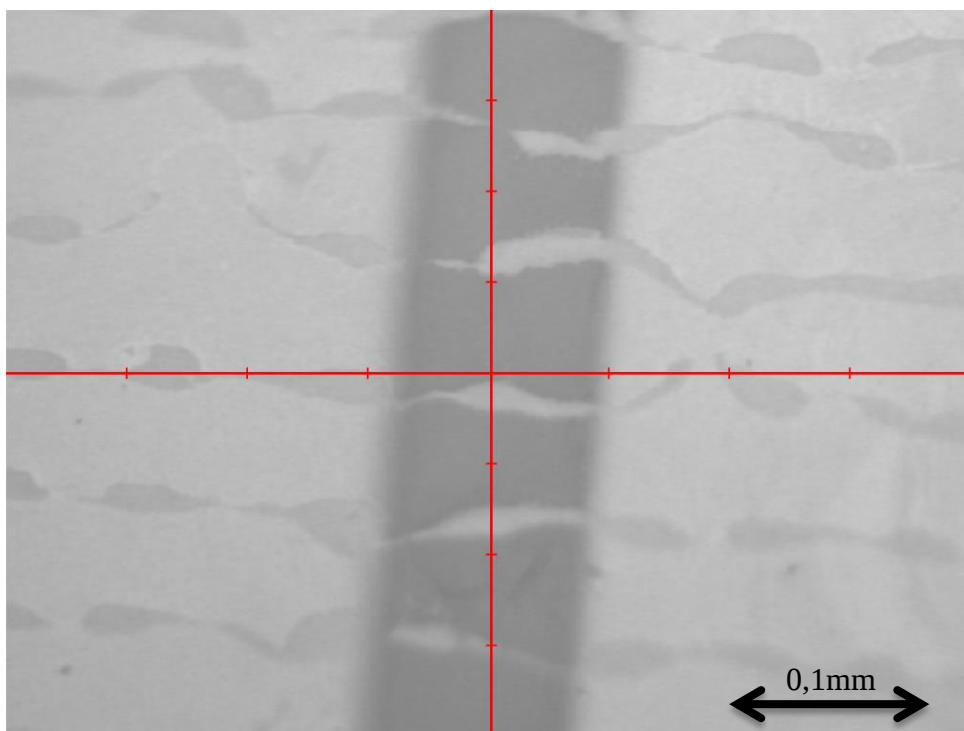


Obr. 3.1 Tenzometr využívající nanočástice (zdroj výrobce)

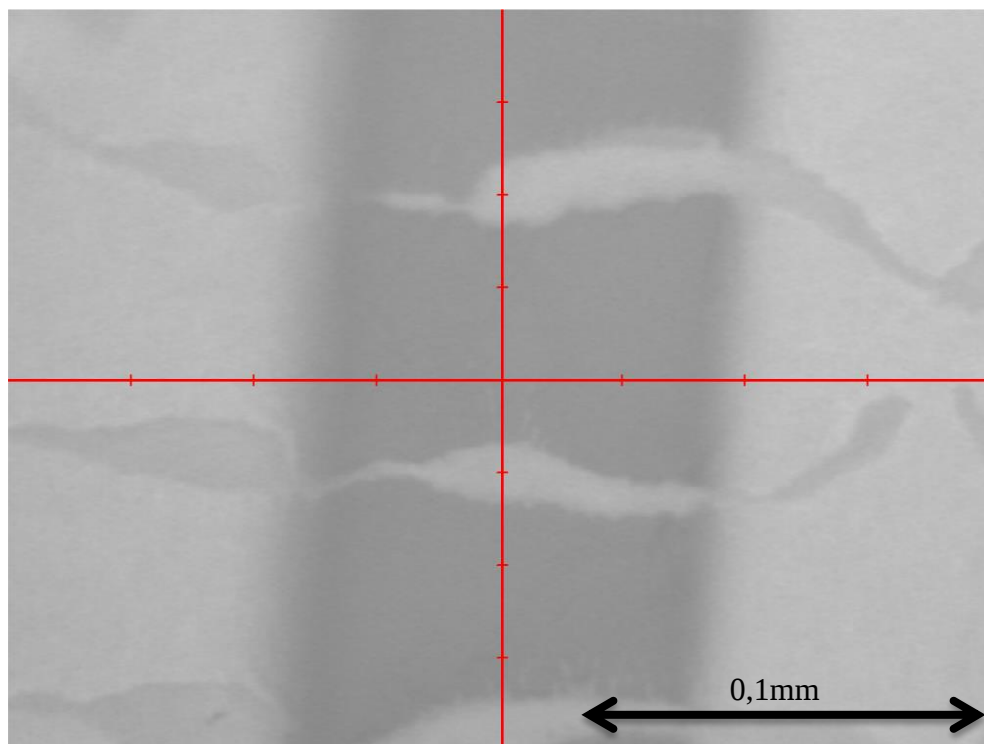
Prvním bodem bylo získání snímků pořízených pomocí mikroskopu. Ing. Kryštof Dočkal mi ochotně nabídl možnost využití školních mikroskopů, na kterých pracuje. Získané snímky se poměrně odlišují od snímků ze stránek výrobce. Ze začátku pozorování bylo obtížné vlákna identifikovat, jelikož jsem předpokládal úhlednou lineární strukturu, podobně jako na snímcích výrobce. Po prozkoumání celého průřezu tenzometru jsme se shodli, že nanovlákna jsou poměrně nepravidelné skvrny nanesené po celé délce tenzometru v nepravidelné struktuře



připomínající rovnoběžné přímky s rozstupem cca 0,8mm, pravidelně rozmístěné po celé šířce tenzometru (viz Obr. 3.2 Obr. 3.3).



Obr. 3.2 Nanovláčna tenzometru (300x zoom)



Obr. 3.3 Nanovláčna tenzometru (600x zoom)



4 NÁVRH KONSTRUKCE SNÍMAČE S VYUŽITÍM NANOVLÁKEN

Cílem této práce bylo navrhnout zařízení (snímač), který by byl schopný měřit délku s využitím nanovláknových tenzometrů. Použití nanovláknových tenzometrů pro měření délky se zdá jako použitelná varianta, jelikož na rozdíl od nepoužívanějších fóliových či polovodičových tenzometrů (nominální odpor 120–300Ω) mají zhruba 2500x vyšší nominální odpor (až 1MΩ). Tím odpadá nutnost silného zesílení výstupního signálu. Dalším z hlavních důvodů pro použití nanovláknového tenzometru jsou jeho minimální prostorové nároky na zástavbu, minimální spotřeba (1μW) znamenající minimální oteplení a dle prospektů výrobce také fakt, že by měli vykazovat lineární chování.

4.1 TEORETICKÉ PŘEDPOKLADY

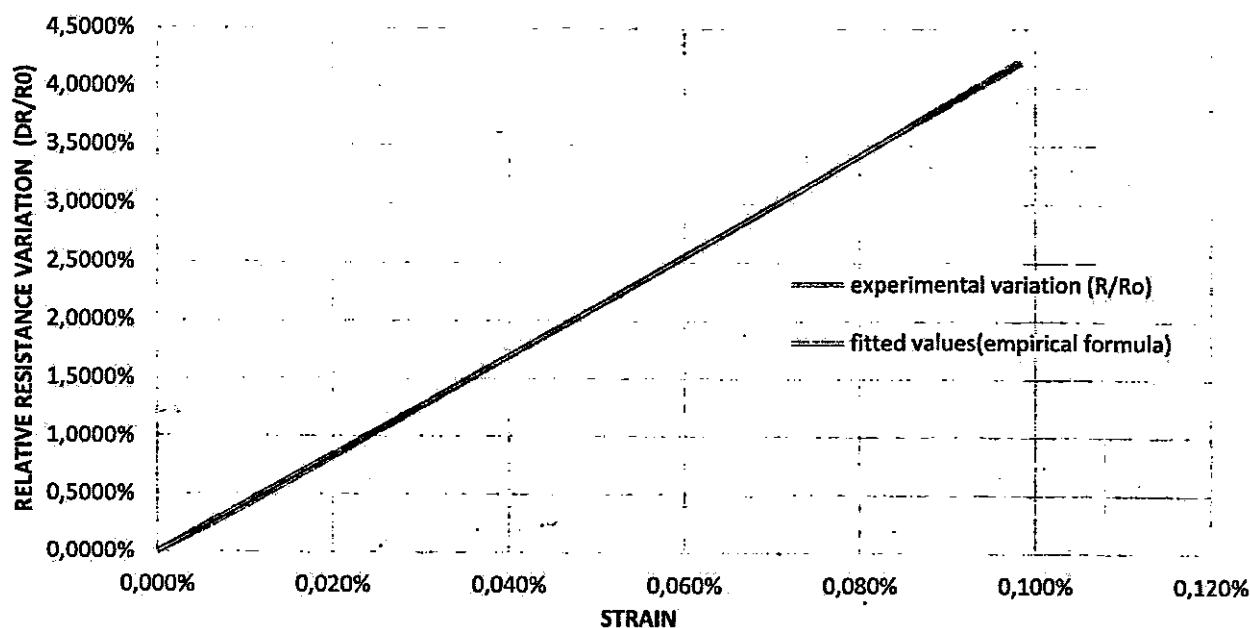
Vstupními parametry byly:

Rozměry tenzometru

Výrobce vyrábí nanovláknové tenzometry ve dvou typech velikostí 5x10mm a 3x5mm. Firma Mesing s.r.o. zakoupila pro testování dva tenzometry se jmenovitým odporem 1MΩ, po jednom kusu od obou velikostních variant. Součástí sady je i vyhodnocovací jednotka.

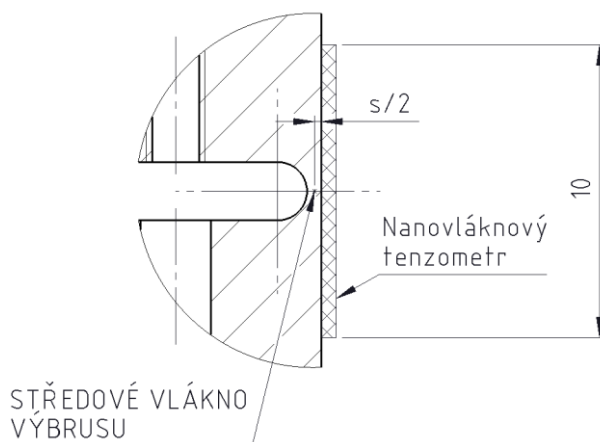
Maximální přípustná deformace

Informace o deformačním rozsahu byly značně omezené. V propagačních materiálech výrobce uvádí maximální deformaci 20000 μm/m → **0,2mm/cm**. Druhým zdrojem je výrobní protokol, ve kterém je uvedený graf kontrolního měření provedeného po výrobě. Z grafu 4.1 vyplývá přibližná hodnota poměrné deformace 0,1% → **0,01mm/cm**.



Graf 4.1 Závislost poměrného prodloužení na relativní změně odporu
(zdroj: Výrobní protokol)

Po zvolení návrhové hodnoty poměrné deformace $0.1\% \rightarrow 0,01\text{mm/cm}$, je potřeba navrhnout základní geometrii snímače. To znamená, že při délce tenzometru 10 mm je maximální prodloužení 0,01 mm. Pákovým převodem se získá rozsah měřené délky až 2 mm.



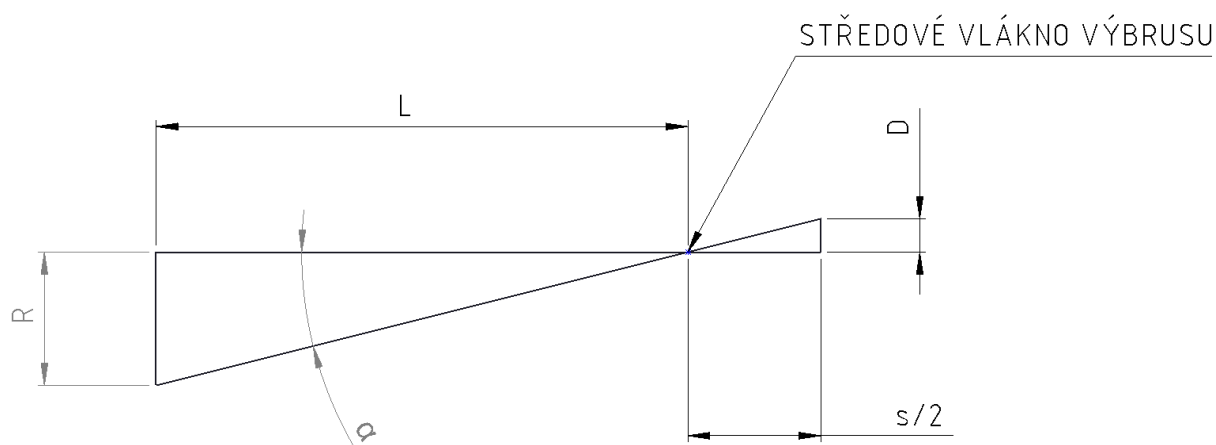
Obr. 4.1 Detail výbrusu

Hlavním navrhovaným parametrem byla **tloušťka výbrusu** s (Obr. 4.1), respektive polovina této tloušťky (rozměr $s/2$), jelikož je to rozměr, který v kombinaci s informací o maximální přípustné poměrné deformaci a rozměry tenzometru, určuje uhlové natočení výkyvné části snímače α .

Při pohybu doteku v navrhovaném rozsahu bude pohyblivá část snímače vykonávat kyvný pohyb, v rozsahu $0 - \alpha$ (Obr. 4.2), okolo teoretické osy, která je shodná se středovým vláknem výbrusu (Obr. 4.1). Na rovinné straně výbrusu bude nalepený nanovláknový tenzometr, jehož deformace bude, při dobré kvalitě lepeného spoje, shodná s deformací na povrchu součásti.

Při maximální deformaci tenzometru D a vzdálenosti středového od krajního vlákna výbrusu $s/2$ lze ze základní geometrie snímače (Obr. 4.2), určit závislost parametrů a stanovit vztah(20).

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2 \cdot D}{s} = \frac{R}{L} \quad (21)$$



Obr. 4.2 základní geometrie snímače



Pro výpočet návrhové tloušťky výbrusu je nutné stanovit parametry R a L . Délka $L = 74\text{mm}$ vyplývá z rozměrů 57mm dlouhého doteku, který jsem dostal k dispozici a 17mm, které jsem si nechal pro konstrukci kyvné části těla snímače. Zdvih zvolený pro návrh je $R_n = 2\text{mm}$, jde však pouze o orientační hodnotu.

$$s = \frac{2 \cdot D \cdot L}{R_n} = \frac{2 \cdot 0,01 \cdot 74}{2} = 0,74\text{mm} \rightarrow \frac{s}{2} = 0,37\text{mm} \quad (22)$$

Výbrus o šířce 0,74mm by znamenal příliš velkou měřicí sílu. To vede ke kompromisu mezi využitým akčním rozsahem tenzometru a šířkou výbrusu. Druhou návrhovou hodnotou je zvolená tloušťka výbrusu $s = 0,45\text{mm}$, pro kterou byl proveden zpětný výpočet deformace D_k .

$$D_k = \frac{s \cdot R_n}{2 \cdot L} = \frac{0,45 \cdot 2}{2 \cdot 74} = 0,0061\text{mm} \quad (23)$$

Poměrná je deformace 0,061% při měřicím rozsahu $R = 2\text{mm}$. Snížení citlivosti pomocí zmenšení tloušťky výbrusu nám umožňuje zvětšit měřicí rozsah.

$$R = \frac{2 \cdot D \cdot L}{s} = \frac{2 \cdot 0,01 \cdot 74}{0,45} = 3,2\text{mm} \quad (24)$$

D	Maximální deformace tenzometru	[mm]
D_k	Kontrolní deformace tenzometru	[mm]
L	Délka od středového vlákna ke středu kulového doteku	[mm]
R	Měřicí rozsah	[mm]
R_n	Měřicí rozsah návrhový	[mm]
s	Tloušťka výbrusu	[mm]
α	Maximální úhlová výchylka	[°]

Omezení měřicí silou má pro experimentální laboratorní podmínky malý vliv, jelikož pro účel experimentu, jehož cílem je pouze ověření, zda je použití nanovláknových tenzometrů vhodné pro konstrukci snímačů délky, není nutnost minimalizace zařízení a je možné zvolit dostatečně tuhou konstrukci prototypu snímače. Pro případné budoucí konstrukce pro konkrétní aplikace už bude zapotřebí uvažovat měřicí sílu jako návrhový parametr.

4.2 NÁVRH TĚLA SNÍMAČE

Vstupními požadavky na konstrukci snímače byly:

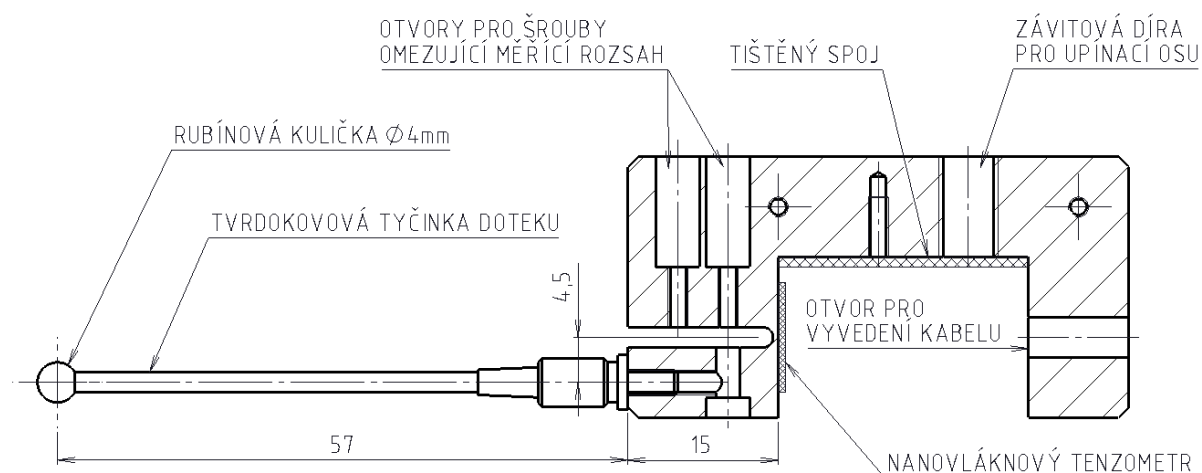
- Chráněné místo pro nalepení nanovláknového tenzometru.
- Místo pro umístění tištěného spoje pro přechod mezi tenkým vodičem tenzometru a výstupním kabelem.
- Upínací osa Ø8 h7. Standardní běžně používaný rozměr pro snímače délky.
- Délka doteku 57mm



- Možnost stavitelného omezení měřicího rozsahu ve dvou směrech.
- Krytování

Pro navrhnuté tělo, vyrobené firmou MESING s.r.o., byl vybrán materiál 14 260. Tato ocel je legována křemíkem a chromem a je vhodná pro zvláště namáhané pružiny převážně v automobilovém a železničním průmyslu. Využívá se i na obložení aktivních částí zemědělských strojů díky své vysoké odolnosti proti opotřebení. Je však obtížně svařitelná a obrobitelná.

Polotovarem mnou navržené konstrukce byla plochá tyč válcovaná za tepla ČSN EN 10058 rozměr 30x12-55mm.



Obr. 4.3 Konstruktivní řešení těla snímače

4.3 LEPENÍ A MANIPULACE S TENZOMETREM

Lepení tenzometrů jakéhokoli druhu je vždy nejdůležitější částí přípravy celého procesu měření. Nevhodně zvolené lepidlo, či nekvalitně provedené lepení může naprosto znehodnotit celé měření. Lepidlo musí být po vytvrzení dostatečně tuhé, aby vykazovalo minimální tečení – CREEP efekt. Tenzometr musí být nalepený na co nejtenčí vrstvě lepidla, aby docházelo k maximálnímu přenosu mechanického napětí ze zatěžovaného povrchu na podklad tenzometru. Pouze při stoprocentní kvalitě lepeného spoje může být využit celý potenciál vlastností tenzometru.

Tenzometr je umístěný na polyamidovém podkladu, který se využívá i u fóliových tenzometrů. Proto jsem otázku lepení konzultoval s firmou HBM měřicí technika s.r.o., která se zabývá problematikou tenzometrického měření, a na jejich doporučení jsem se rozhodl pro použití kyanoakrylátového lepidla značky Loctite. Toto lepidlo je vhodné pro nahrazení drahého lepidla přímo od výrobce nanovláknových tenzometrů firmy Nanolike, které je také na bázi kyanoakrylátu. Lepidla značky Loctite doporučuje výrobce Nanolike jako schůdnou variantu.

4.3.1 MANIPULACE S NANOVLÁKNOVÝM TENZOMETREM

Nanovláknové tenzometry jsou dodávány v petriho misce, kde jsou pojištěny krycí páskou, tak, aby se daly jednoduše vyjmout. Pro vyjmutí tenzometru výrobce výrazně doporučuje použití pinzety a pro další manipulaci je vhodné používat latexové rukavice a na obě strany tenzometru



nalepit kousek krycí pásky (slabě lepící) tak, aby střední část nanovláknového tenzometru, kde se nachází aktivní oblast zůstala nezakrytá.

4.3.2 ČISTĚNÍ A LEPENÍ NANOVLÁKNOVÉHO TENZOMETRU

Dalším klíčovým krokem je očištění povrchu, na který se bude lepit. V první řadě očistíme povrch od mechanických nečistot pomocí jemného smirkového papíru. Následně povrch pomocí papírového ubrousku namočeného v acetonu očistíme a odmastíme.

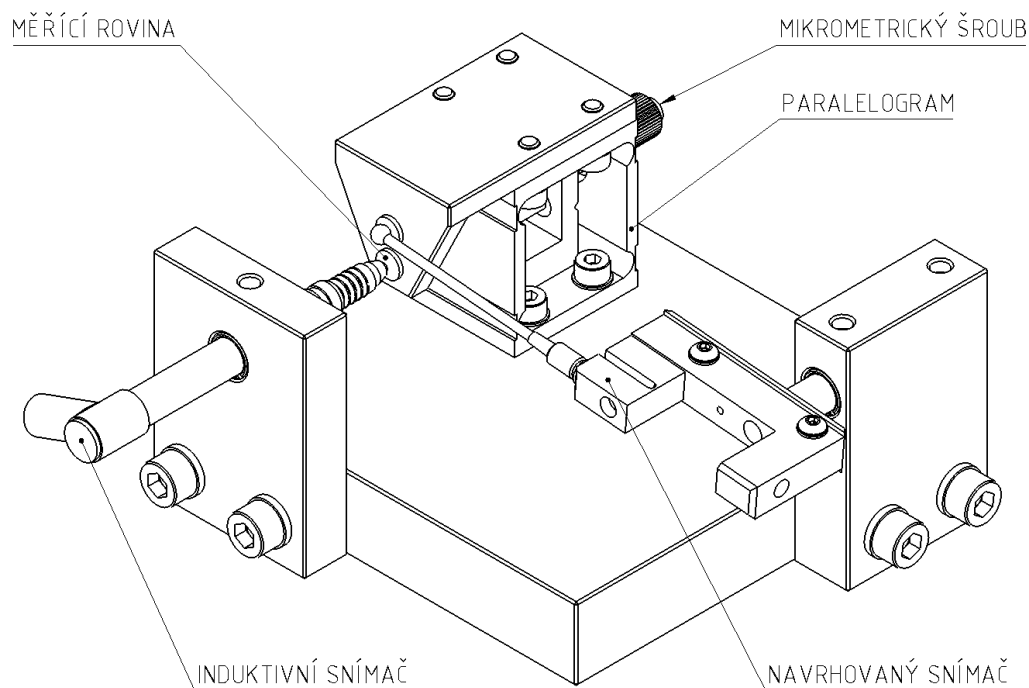
Na povrch si můžeme lehce naznačit tenkým popisovačem prostor pro umístění tenzometru. Do tohoto prostoru nejdříve tenzometr zkusmo umístíme pro ověření, zda se dá tenzometr bezpečně umístit. Do vyznačeného prostoru nanese malé množství kyanoakrylátového lepidla a pomocí párátko rovnoměrně rozetřeme po celém prostoru pro lepení. Tenzometr uchopíme pomocí krycí pásky nalepené na jeho bocích a umístíme jej do vyznačeného prostoru a po 30 vteřin jej lehce přitlačujeme v oblasti obou elektrod. Pro přitlačení lze použít jako nelepivou vrstvu mikrotenový sáček, na který vteřinové lepidlo nechytá. Důležité je nevyvíjet tlak na aktivní část ve středu tenzometru. Po vytvrzení lepidla odstraníme krycí pásky z boků tenzometru.

Výstupní drátky mají průměr 0,2 mm, aby bránily přenášení zatížení z vodiče na tenzometr. Z tohoto důvodu je potřeba je pevně fixovat, a to buď pomocí přilepení k tělu snímače, a nebo napájením na přechodový tištěný spoj. Také je potřeba vyvarovat se táhání za drátek. Jelikož je elektroda pouze nalepená vodivým lepidlem, není moc složité ji odtrhnout od podkladu.

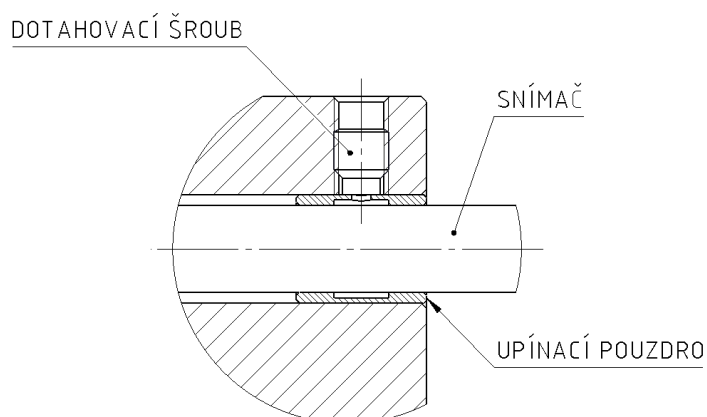
5 PROVEDENÍ ZKOUŠEK A JEJICH VYHODNOCENÍ

Vzhledem k velmi omezeným zdrojům informací bylo cílem provedných měření ověřit vlastnosti nanovláknového tenzometru inzerované výrobcem a zjistit další vlastnosti jako vhodný směr zatěžování, hystereze, teplotní citlivost atd.

Pro provádění měření bylo vyrobeno testovací stanoviště (Obr. 5.1) vybavené referenčním indukčním snímačem s měřicím převodníkem EDK 93, s rozlišením 1 μm a rozsahem 2mm. Dále je stanoviště vybaveno měřicí plochou umístěnou na paralelogramu, který je posouván mikrometrickým šroubem od firmy Mitutoyo s rozsahem 6mm. Dalšími díly jsou upínací kostky pro snímače, které jsou osazeny standartními upínacími pouzdry Ø8mm (Obr. 5.2). Dvojitě upevnění upínací osy by mělo zamezit vzniku deformací vyvozených měřicí silou, které by mohly ovlivňovat měření.



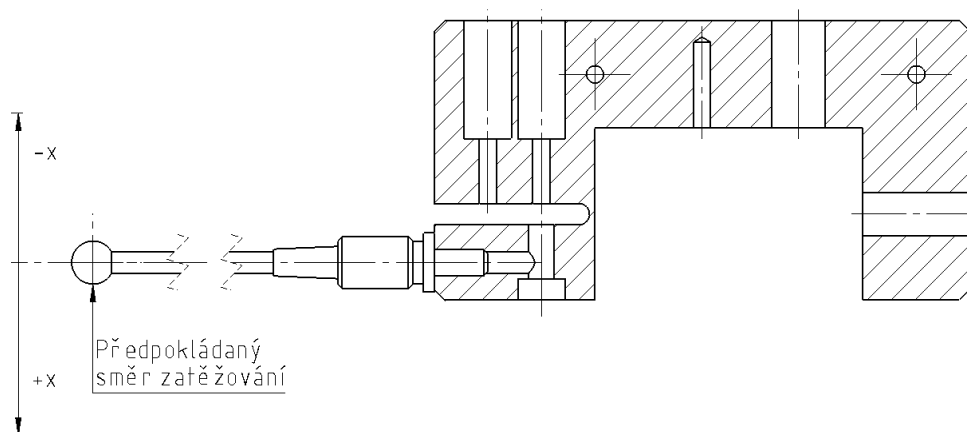
Obr. 5.1 Měřicí stanoviště



Obr. 5.2 Upínání snímače

5.1 OVĚŘENÍ VHODNÉHO SMĚRU ZATĚŽOVÁNÍ A LINEARITY

Prvním cílem měření bylo stanovit vhodný směr zatěžování, či ověřit předpokládaný směr. Předpokládaný směr byl zvolen takový, aby nalepený nanovláknový tenzometr byl namáhaný na tah. Tento předpoklad vychází ze způsobu zatěžování foliových tenzometrů, které jsou běžně zatěžované na tah. Na základě tohoto předpokladu bylo pro nalepení tenzometru zvolené předepnutí **1,5mm** ve směru $+x$. Předepnutí bylo voleno proto, abychom se během měření nepohybovali v nulové oblasti.



Obr. 5.3 volba souřadného systému

První měření se sestávalo z postupného zatěžování ve směru $-x$ po krocích $50\mu\text{m}$. Zatěžování bylo započato bodě, ve kterém se snímač ustálí bez zatížení. V intervalech 30s byla krokově posouvána měřicí rovina, a to až do doby než výstupní hodnota dosáhne své horní hranice (tj. hodnota 65505), na které se nárůst zastaví i při dalším zatěžování. Tento stav nastal po posunutí měřicí roviny o **1,35mm** ve směru $-x$. Toto měření je pracovně označeno „**zatěžování na tah**“.

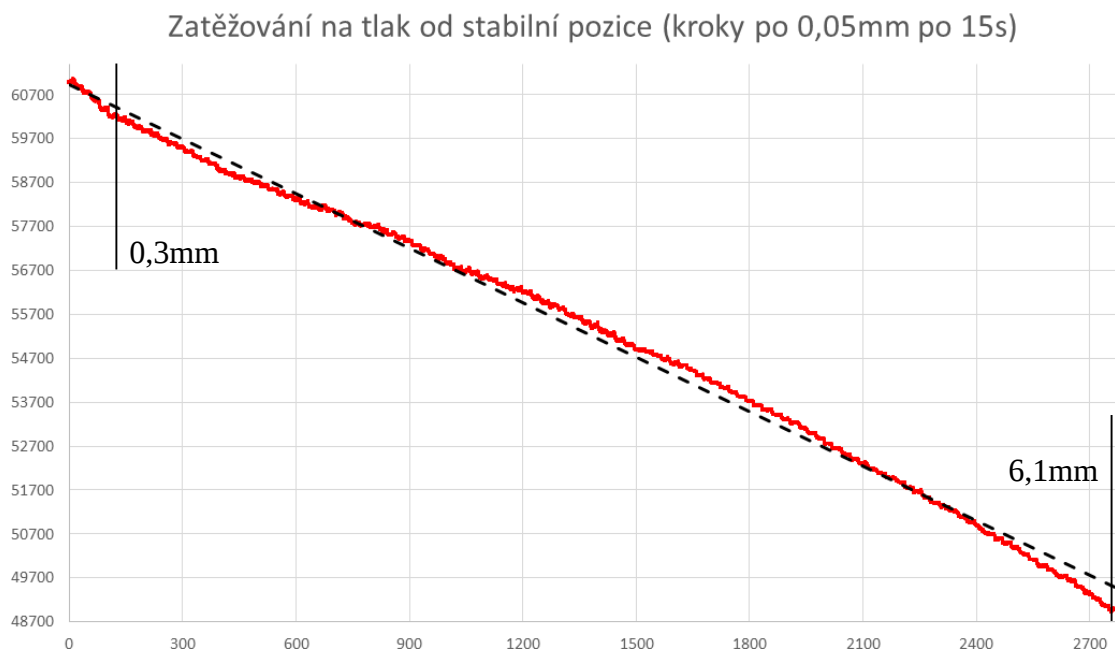
Po dokončení měření a vykreslení hodnot do grafu pomocí MS Excel dostáváme graf závislosti výstupní hodnoty na čase v sekundách (viz Graf 5.1 a příloha P3). Po prvních $0,4\text{mm}$ snímač nevykazoval téměř žádné změny výstupní veličiny a choval se značně nestabilně. Od $0,4\text{mm}$ do $0,95\text{mm}$ snímač vykazoval celkem lineární chování na jednotlivé kroky, ale výstupní hodnota byla stále nestálá. Od $0,95\text{mm}$ až do limitních $1,35\text{mm}$ opět mizí náznaky lineárního chování a objevují se náhle skokové změny výstupní veličiny bez zjevného důvodu.



Graf 5.1 zatěžování na tah



Druhé měření bylo postupem shodné s měřením zatěžování na tah, jen kroky $50\mu\text{m}$ byly prováděny ve směru $+x$. V intervalech 15s byla krokově posouvána měřicí rovina a to až do posunutí $6,1\text{mm}$, kde končí rozsah mikrometrického šroubu a tělo snímače je již značně deformované a dochází tak k výraznému navýšení měřicí síly. Toto měření je pracovně označeno „zatěžování na tlak“.



Graf 5.2 zatěžování na tlak

Vyhodnocení naměřených dat a sestavení závislosti výstupní hodnoty na čase v sekundách vytváří graf zatěžování na tlak (Graf 5.2). Velké množství měřených bodů znesnadňuje vyhodnocování. Pro bližší zkoumání je nutné softwarové přiblížení dat. Po přezkoumání lze z grafu 5.2 (viz příloha P4) zatěžování na tlak vyčíst, že poměrně lineární chování nastává již po posunutí o $0,3\text{mm}$ ve směru $+x$ od nulového bodu. Ve směru $+x$ snímač prokázal mnohem větší možné posunutí a vykazuje poměrně lineární a stálé chování. Tato lineární oblast se nachází přibližně mezi $44 \div 92\%$ rozsahu nanovláknového tenzometru (0% maximální zatížení na tah, 100% maximální zatížení na tlak).

Z těchto dvou měření vychází výrazně výhodněji, na rozdíl od předpokladu, zatěžování na tlak. Zatěžování v tlaku umožňuje využít delší část lineární části aktivního rozsahu nanovláknového tenzometru, a navíc měření není omezeno maximální hodnotou digitálního převodníku.

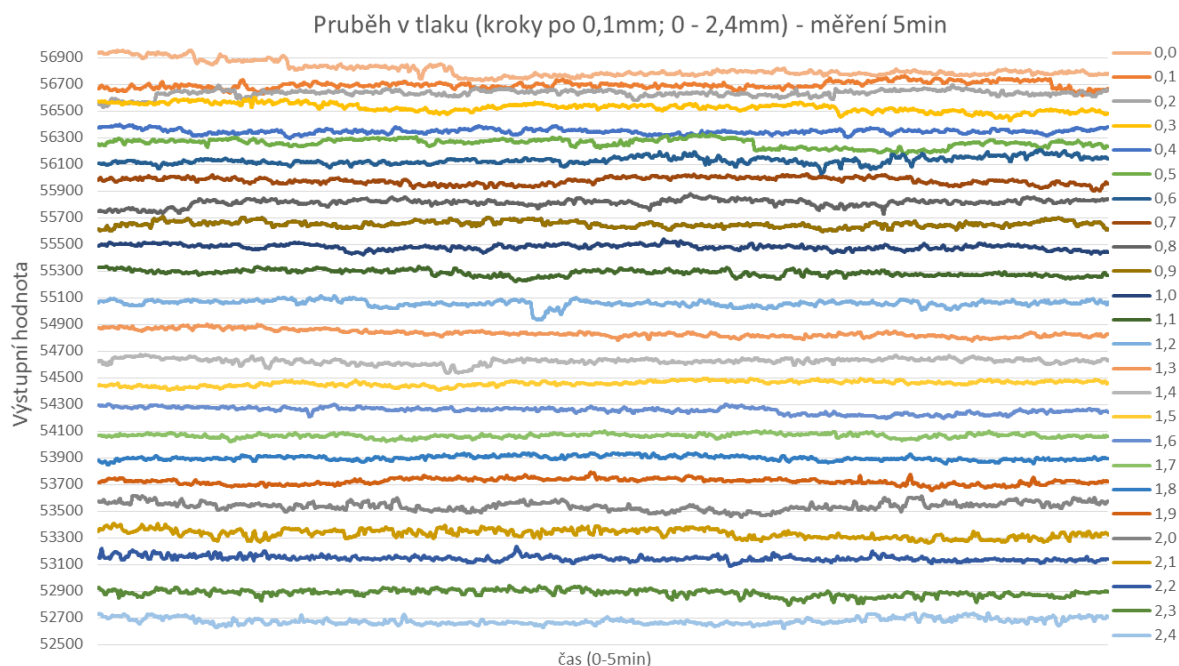
5.2 MĚŘENÍ ČASOVÉ STÁLOSTI

Při předchozích měřeních se ukázalo, že výstupní hodnota má tendenci lehce stoupat, či klesat. Pro zmapování tohoto chování mělo posloužit měření delší dobu v jednotlivých pozicích.

Parametry pro toto měření byly stanoveny s ohledem na časovou náročnost tohoto měření. Původní měření probíhalo 15 minut a krok posunutí ve směru $+x$ byl stanoven na $0,1\text{mm}$. Jelikož se ale při vyhodnocování objevily chyby vzniklé během měření, měření bylo znehodnoceno. Dalším problémem bylo velké množství dat, které bylo velice obtížné počítačově zpracovatelné a docházelo k přetížení počítače. Pro opakované měření byl zvolen



časový interval pro měření v jedné pozici 5 minut. Data z měření byla sestavena do grafu vyjadřujícího časovou stálost v 25 bodech v rozmezí 0,0mm až 2,4mm (Graf 5.3).



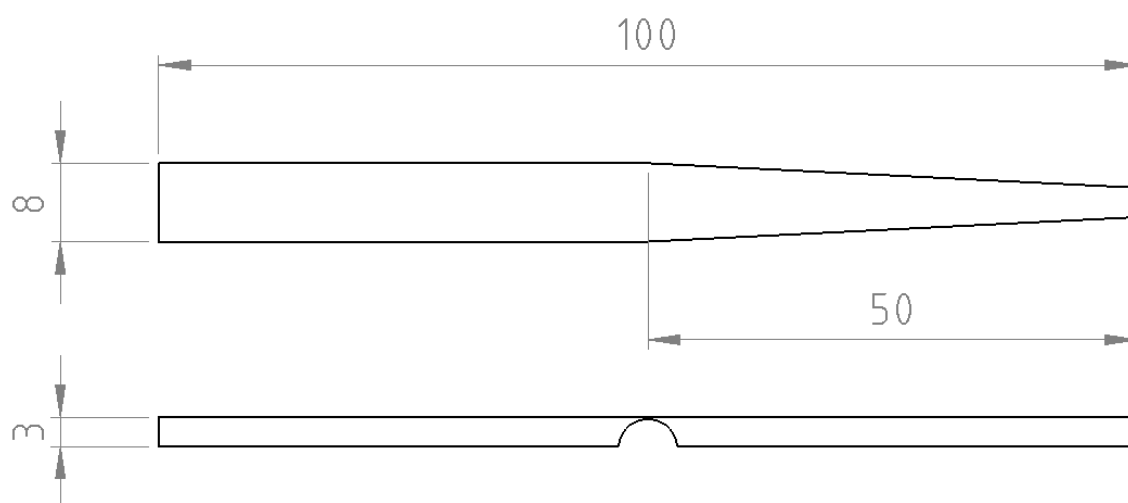
Graf 5.3 časová stálost v tlaku

V grafu časové stálosti v tlaku (Graf 5.3) lze najít jistou podobnost s grafem zatěžování na tlak (Graf 5.2). Oba grafy vykazují od posunutí 0,3mm ve směru $+x$ vyšší stálost a pravidelnější rozestupy mezi jednotlivými kroky. Po bližším přezkoumání grafu 5.3 (viz přílohy P1 a P2) lze říct, že výstupní hodnota za klidového stavu má převážně lehce klesající tendenci, která se ovšem nevyskytovala u všech pozic, a u některých z nich byla tendence stoupající. Jev, který má za následek vznik této tendence se zatím nepodařilo odhalit.

6 ZÁVĚR

Výstupem z provedených měření jsou informace využitelné pro provádění dalších měření na dalších testovacích snímačích. Z měření vyplývá vhodný směr zatěžování ve směru $+x$, tzn. zatěžování tenzometru na tlak. V této oblasti snímač vykazuje poměrně lineární i přiměřeně stabilní chování. Ukázalo se, že výbrus o tloušťce 0,45mm má za následek příliš velikou měřicí sílu, která do měření může zanášet chyby vlivem deformací částí snímače. Proto byl při konstrukci dalších pokusných snímačů brán zřetel na velikost měřicí síly a tloušťka výbrusu byla jednotně volena 0,2mm.

Předmětem dalšího měření, které bude provedeno při vývoji snímače pro malé otvory ve firmě Mesing s.r.o., měření je prověřit vliv vzdálenosti plochy, na níž je nalepený nanovláknový tenzometr od středového vlákna výbrusu. Pro toto měření byly navrženy snímače výrazně jednoduššího jednotného tvaru (viz Obr. 6.1).



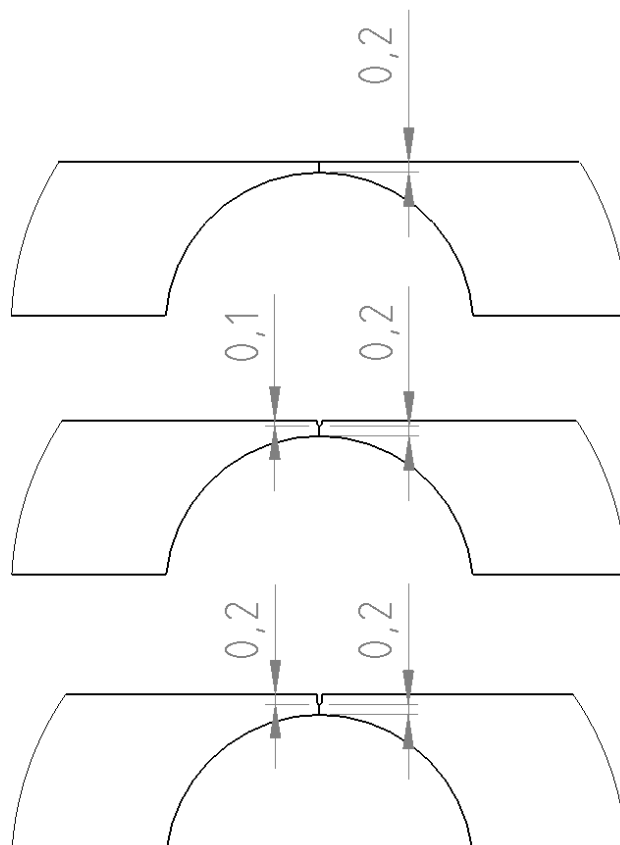
Obr. 6.1 Snímač pro testování vhodné vzdálenosti
tenzometru od středového vlákna výbrusu

Pro toto měření zakoupila firma Mesing dalších 5 kusů nanovláknových tenzometrů o rozměru $5\text{mm} \times 10\text{mm}$ o jmenovitém odporu $1\text{M}\Omega$. Testovací snímače jsou shodného tvaru, pouze se liší provedením výbrusu. Zářez na straně pro lepení tenzometru bude vyplněný pružným materiálem na bázi dvousložkového epoxidu, a nebo na bázi kyanoakrylátu, aby aktivní část tenzometru nebyla umístěná ve vzduchu.

Pro základní měření budou použity tři snímače, kdy první má plochu pro lepení hladkou a nedělenou a tloušťka výbrusu pod tenzometrem je $0,2\text{mm}$ a vzdálenost od středového vlákna výbrusu k ploše pro tenzometr je $0,1\text{mm}$ (viz Obr. 6.2 nahoře).

Druhý snímač má plochu lepení tenzometru v nejužším místě dělenou zářezem o hloubce $0,1\text{mm}$ (vyrobený pomocí vyjiskřování drátkem), který má za úkol oddálit středové vlákno výbrusu do vzdálenosti $0,2\text{mm}$ od plochy pro lepení tenzometru při zachování maximální tloušťky $0,2\text{mm}$ (viz Obr. 6.2 uprostřed).

Třetí snímač má plochu lepení tenzometru v nejužším místě dělenou zářezem o hloubce $0,2\text{mm}$ (vyrobený pomocí vyjiskřování drátkem), který má za úkol oddálit středové vlákno výbrusu do vzdálenosti $0,3\text{mm}$ od plochy pro lepení tenzometru při zachování maximální tloušťky $0,3\text{mm}$ (viz Obr. 6.2 dole).



Obr. 6.2 detail provedení výbrusu na nových testovacích snímačích

Předpokládaný závěr měření, která budou provedena na nových snímačích, je zvýšení citlivosti díky zvětšení vzdálenosti mezi středovým vláknem výbrusu a plochou pro nalepení tenzometru. Zvětšením tohoto rozměru by mělo dojít ke zmenšení nutného úhlového natočení kyvné části snímače pro dosažení limitních výstupních hodnot tenzometru.

Doposud provedená měření prokázala **nevhodnost** použití nanovláknových tenzometrů pro konstrukci snímačů s větším rozsahem, jelikož dochází ke snížení citlivosti v důsledku velkého mechanického převodu, který je dán poměrem vzdálenosti doteku a plochy pro nalepení tenzometru od středového vlákna výbrusu.

Výhodou těchto tenzometrů jsou jejich minimální rozměrové nároky na zástavbu a předpokládaná oblast použití by mohla být pro konstrukci jednoúčelových úchylkoměrů s minimálním rozsahem a minimálními rozměry vhodných pro měření malých vnitřních průměrů od cca 1mm.



LITERATURA

- [1] ČECH, Jaroslav, Jiří PERNÍKÁŘ a Kamil PODANÝ. *Strojírenská metrologie*. 4. přepracované. Brno: CERM, 2005. ISBN 80-214-2070-2.
- [2] ČECH, Jaroslav, Jiří PERNÍKÁŘ a Kamil PODANÝ. *Strojírenská metrologie*. 4. přepracované. Brno: CERM, 2005. ISBN 80-214-2070-2.
- [3] Vyjadřování přesnosti měření ve strojírenské praxi. *Metrologie*. 2015, **2015**(4), 12-19.
- [4] *Megatron* [online]. [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.megatron.cz/>
- [5] *Mezinárodní metrologický slovník: Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny (VIM)* [online]. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: http://www.unmz.cz/files/Sborníky%20TH/Terminologie%20v%20oblasti%20metrologie_DEF.pdf
- [6] *Mesing s.r.o.* [online]. Šámalova 60a, 615 00 Brno [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.mesing.cz/>
- [7] Nanolike. *Nanolike* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.nanolike.com/en/>



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

α	[mm]	maximální úhlová výchylka
Δ	[-]	chyba měření
A	[-]	konstanta zahrnující vliv náhodných chyb
A_i	[-]	koeficient citlivosti (převodu) příslušného zdroje nejistoty
B	[-]	konstanta zahrnující vliv nevyloučených systematických chyb
C	[-]	horní hranice chyby δ
D	[mm]	maximální deformace tenzometru
D_k	[mm]	kontrolní deformace tenzometru
k_s	[-]	koeficient zahrnující vliv malého počtu měření
k_u	[-]	koeficient rozšíření (pokrytí)
L	[mm]	délka od středového vlákna ke středu kulového doteku
l	[-]	hodnota měřené veličiny
r	[-]	Rozpětí
R	[mm]	měřicí rozsah
R_n	[mm]	návrhový měřicí rozsah
s	[mm]	návrhová tloušťka výbrusu
S_x	[-]	směrodatná odchylka aritmetického průměru
s_x	[-]	výběrová směrodatná odchylka
U	[-]	rozšířená nejistota měření
$U_{(xi)}$	[-]	jednotlivé složky nejistot vstupních veličin
u_a	[-]	nejistota typu A
u_{ak}	[-]	nejistota typu A pro malý počet měření
u_b	[-]	nejistota typu B
u_c	[-]	kombinovaná standardní nejistota
x_i	[-]	odhady vstupních veličin
x_m	[-]	naměřená hodnota měřené veličiny
x_p	[-]	konvenční (referenční) hodnota měřené veličiny
Y	[-]	naměřenou hodnotu
y	[-]	odhad výstupní veličiny
Z_j	[-]	možné zdroje nejistot



SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA P1 – Stálost v tlaku (kroky po 0,1mm; 0-2,4mm), měření 5minut

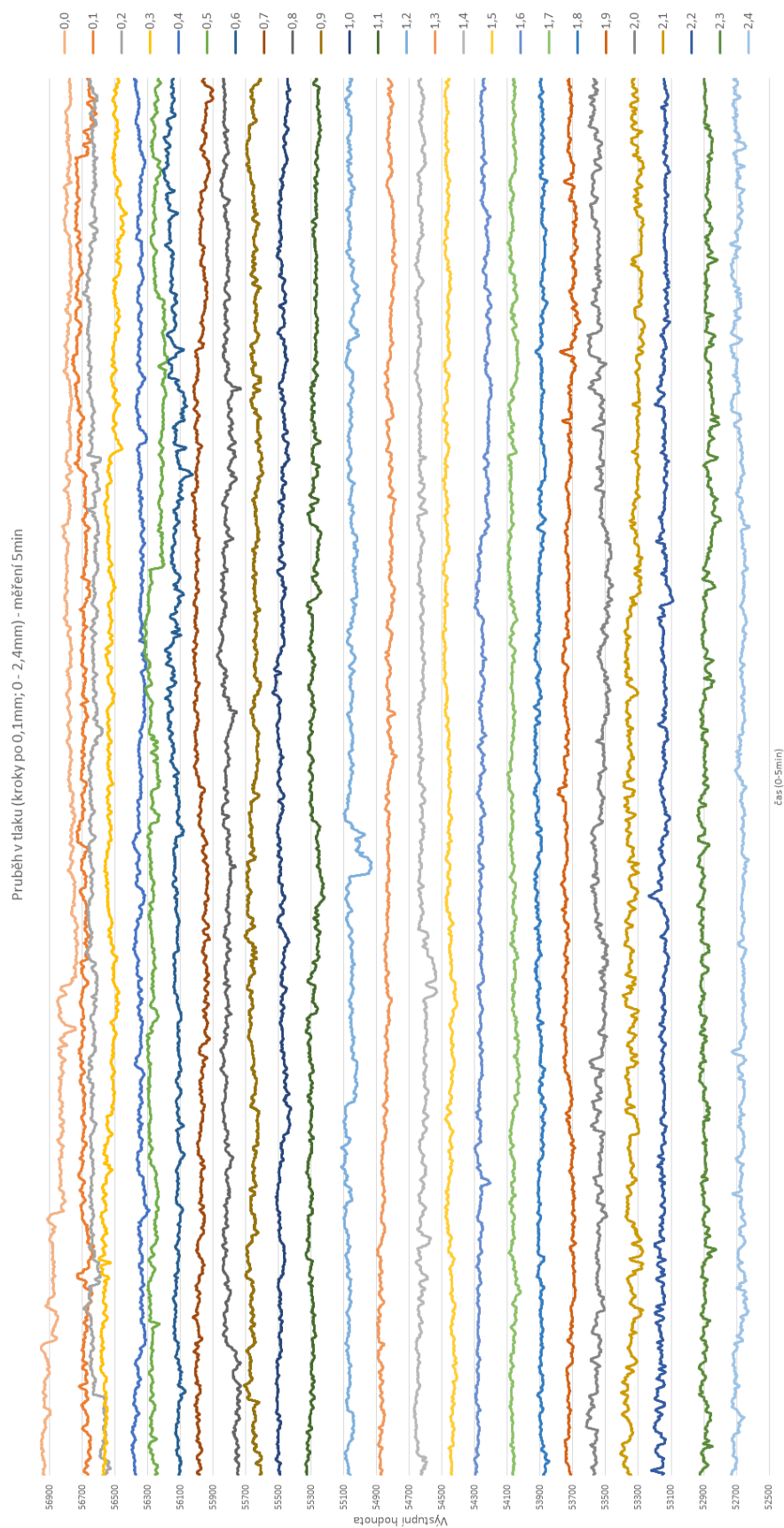
PŘÍLOHA P2 – Stálost v tlaku s trendy (kroky po 0,1mm; 0-2,4mm), měření 5minut

PŘÍLOHA P3 – Zatěžování na tah (krok 0,05mm po 30s)

PŘÍLOHA P4 – Zatěžování na tlak (krok 0,05mm po 15s)

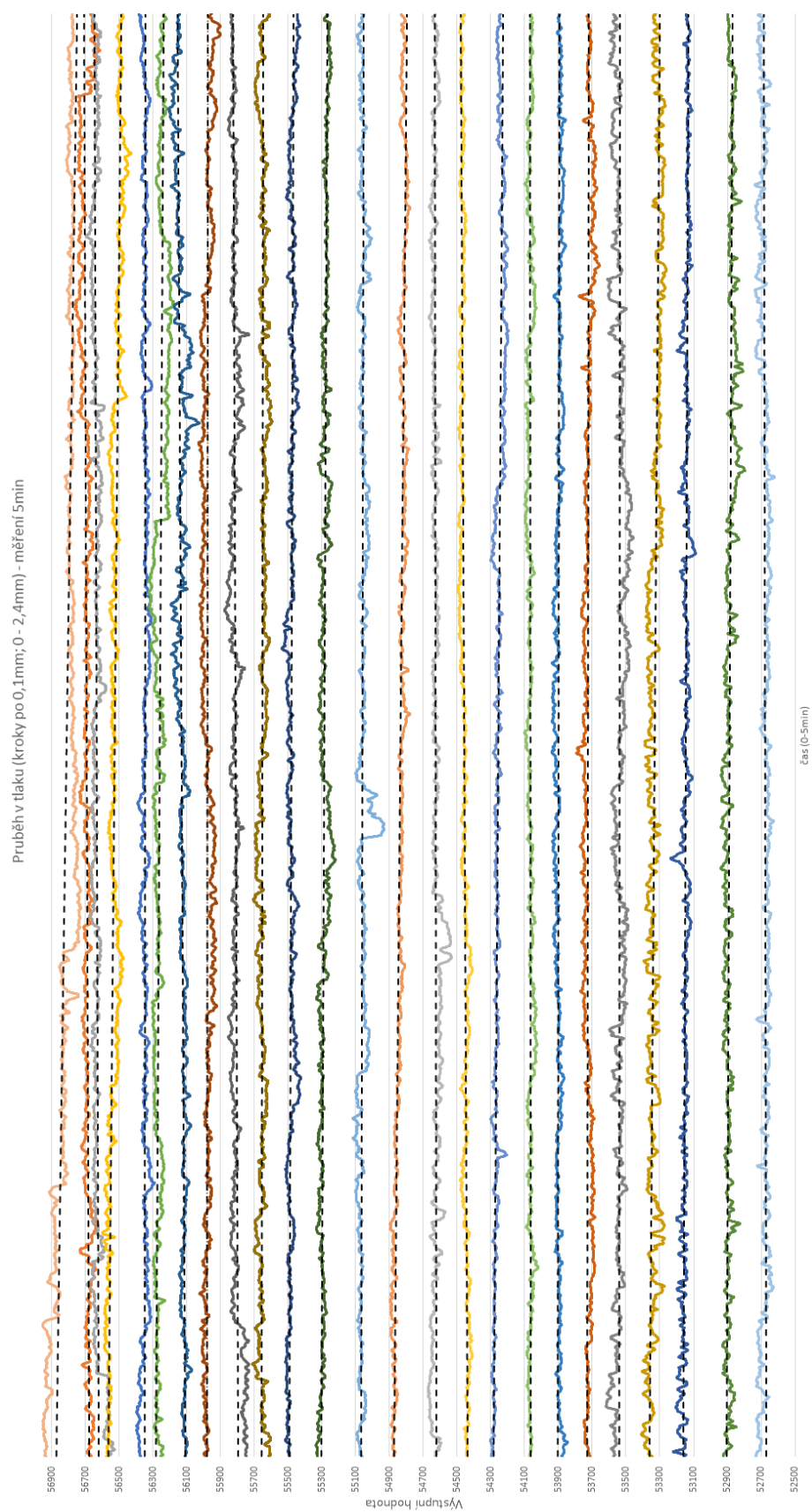


PŘÍLOHA P1 – Stálost v tlaku (kroky po 0,1mm; 0-2,4mm), měření 5minut



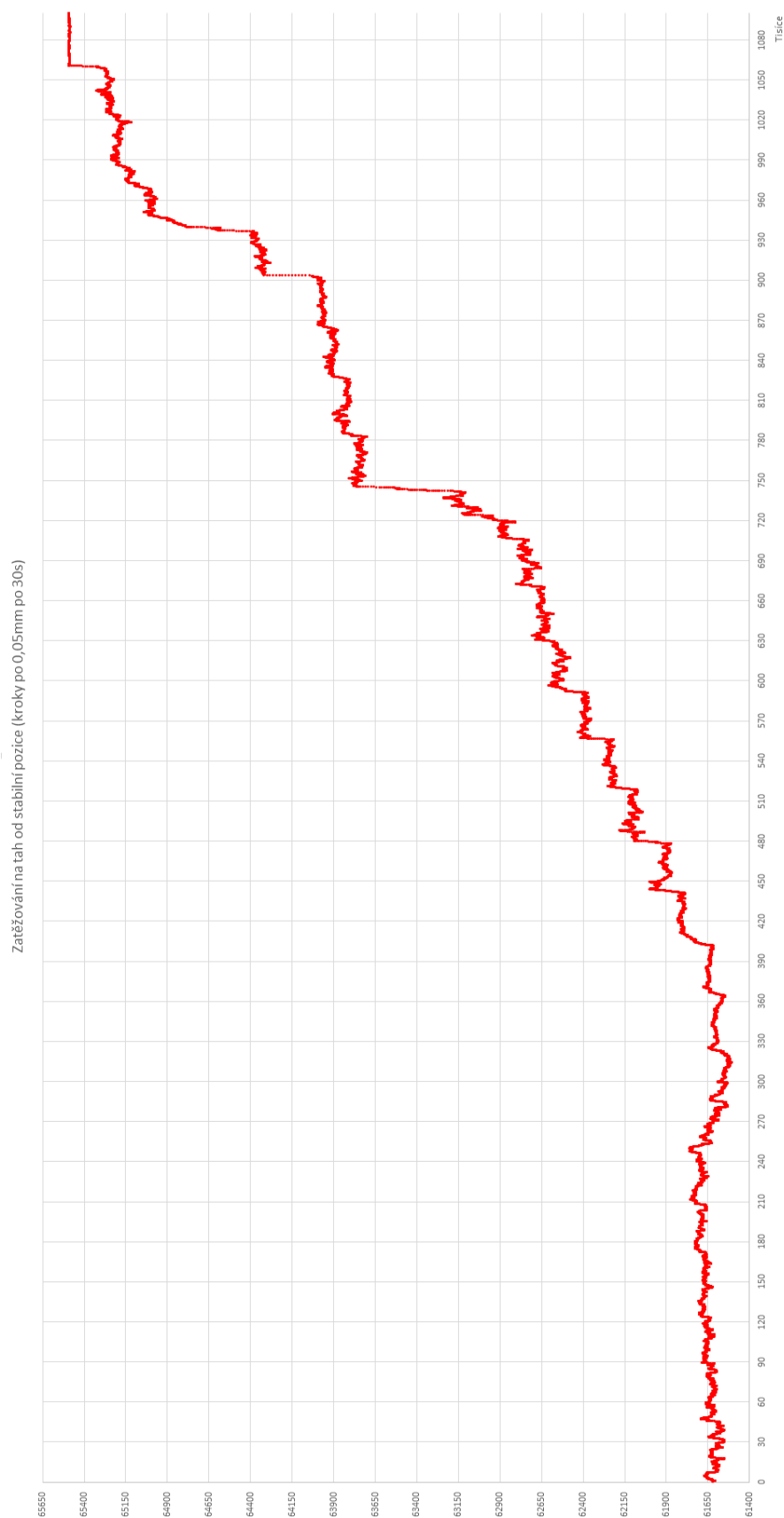


PŘÍLOHA P2 – Stálost v tlaku s trendy (kroky po 0,1mm; 0-2,4mm), měření 5minut





PŘÍLOHA P3 – Zatěžování na tah (krok 0,05mm po 30s)





PŘÍLOHA P4 – Zatěžování na tlak (krok 0,05mm po 15s)

