



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

SPECIÁLNÍ SNÍMAČE DÉLKY

SPECIAL LENGTH SENSORS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Pavliš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Róbert Jankových, CSc.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student: **Jakub Pavliš**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Kvalita, spolehlivost a bezpečnost
Vedoucí práce: **doc. Ing. Róbert Jankových, CSc.**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Speciální snímače délky

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V průmyslové praxi existuje řada výrobních procesů, ve kterých nelze použít konvenční měřidla a systémy. Úkolem je navržení montáže speciálního snímače délky a jeho oživení pro vhodnou aplikaci. Řešení úkolu je zajištěno se spolupracující firmou.

Cíle bakalářské práce:

1. Analýza konstrukce a funkce vybraného druhu snímače délky.
2. Návrh montáže a oživení pro vhodnou aplikaci.
3. Hodnocení metrologických vlastností snímače.
4. Doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

WHITEHOUSE, D. J. Handbook of surface and nanometrology. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2010. ISBN 978-1-4200-8201-2.

WHITEHOUSE, D. J. Surfaces and their Measurement. London: Kogan Page Ltd, 2004. ISBN 1-903-9660-0.

VALÁŠEK, M. a kol. Mechatronika. Praha: ČVUT, 1995. ISBN 80-01-01276-X.

PERNIKÁŘ, J. a TYKAL, M. Strojírenská metrologie II. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-3338-8.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce obsahuje teoretický popis vybraných snímačů délky s důrazem na indukčnostní a optické snímače. Hlavním přínosem práce je návrh a realizace speciálního indukčnostního snímače s malou přitlačnou silou a optického snímače s rozlišením 2,5 nanometrů. V práci jsou analyzovány vybrané metrologické vlastnosti navržených snímačů a formulace doporučení pro jejich praktické využití.

ABSTRACT

This bachelor thesis contains a theoretical description of selected length sensors with emphasis on inductive and optical sensors. The main benefit of this thesis is the design and realization of a special inductive sensor with a small pressure force and an optical sensor with a resolution of 2.5 nanometers. In the thesis are analyzed the selected metrological properties of the designed sensors and the formulation of recommendations for their practical use.

KLÍČOVÁ SLOVA

Snímač délky, optický snímač, indukčnostní snímač, průmyslová metrologie, přesnost měření, nejistota měření, chyba měření.

KEYWORDS

Length sensor, optical sensor, inductive sensor, metrology, measurement accuracy, measurement uncertainty, measurement error.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PAVLIŠ, J. Speciální snímače délky. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 55 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Róbert Jankových, CSc.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 25. 5. 2018

.....

Pavliš Jakub

PODĚKOVÁNÍ

Nejprve bych rád poděkoval doc. Ing. Róbertu Jankových, CSc. za vedení své bakalářské práce, za cenné rady a čas věnovaný jejím konzultacím.

Dále chci poděkovat Ing. Janu Kůrovi ze společnosti MESING, spol. s r. o. za všestrannou podporu a za možnost spolupráce s firmou na návrzích a realizaci praktické části práce.

Poděkování patří také panu Pavlu Kýrovi ze společnosti Renishaw s. r. o. za rady a pomoc při zpracování tématu optických snímačů.

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	MOTIVACE.....	17
3	MĚŘENÍ DÉLKY	19
3.1	Historie délkového odměřování.....	19
3.2	Současný stav technologie délkového odměřování	19
3.3	Měřicí soustava	20
3.4	Přesnost měření ve strojírenské praxi	21
3.4.1	Měření a přesnost měření	22
3.4.2	Nejistota měření.....	23
3.4.3	Chyba měření.....	24
4	ANALÝZA PRŮMYSLOVÝCH SNÍMAČŮ DÉLKY	27
4.1	Indukčnostní snímače délky.....	28
4.1.1	Indukčnostní snímač s malou vzduchovou mezerou	28
4.1.2	Indukčnostní snímač s otevřeným magnetickým obvodem.....	29
4.1.3	Indukčnostní snímač s potlačeným pólem.....	30
4.1.4	Indukčnostní snímač bez feromagnetika	31
4.2	Optické snímače délky	31
4.2.1	Absolutní optické snímače.....	31
4.2.2	Inkrementální optické snímače	32
5	SNÍMAČ S MALOU PŘÍTLAČNOU SILOU	33
5.1	Analýza modelu	33
5.1.1	Tělo navrhovaného pákového snímače.....	33
5.1.2	Cívková jednotka snímače.....	34
5.2	Montáž snímače a uvedení do provozu.....	35
5.3	Zhodnocení metrologických vlastností snímače.....	35
5.4	Doporučení pro praxi	38
6	SNÍMAČ PRO OPERATIVNÍ KONTROLU	39
6.1	Analýza modelu	39
6.1.1	VIONiCplus.....	39
6.1.2	Nerezové pravítko.....	40
6.1.3	Renishaw Advanced Diagnostic Tool (ADT)	41
6.1.4	Dotek a kuličkové vedení	42
6.1.5	Tělo navrhovaného snímače	42
6.2	Montáž snímače a uvedení do provozu.....	43
6.3	Zhodnocení metrologických vlastností snímače.....	44
6.4	Doporučení pro praxi	46
7	ZÁVĚR.....	47
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	49
9	SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK.....	51
9.1	Seznam tabulek.....	51
9.2	Seznam obrázků.....	51
9.3	Seznam použitých zkratek a symbolů.....	52
10	SEZNAM PŘÍLOH	55

1 ÚVOD

Strojírenská metrologie je oblast, jejíž vývoj jde dopředu stejně rychle jako vývoj technologie výroby součástí i výroby samotné. Dnešní linkové měřicí přístroje běžně dosahují rozlišení v řádu mikrometrů a čas pro změření jednoho dílu se pohybuje v jednotkách sekund.

I přes široké uplatnění standardizovaných snímačů nelze tyto snímače aplikovat ve všech případech v průmyslu. Požadavky zákazníků jsou často velmi náročné a konvenční měřidla je většinou nedokáží splnit. V tomto případě je třeba vyvíjet speciální a atypické snímače pro konkrétní aplikace.

V předložené bakalářské práci je ve spolupráci s brněnskou firmou MESING, spol. s r. o., specializující se na automatizační a měřicí techniku, realizován návrh dvou speciálních snímačů. Prvním navrženým nestandardním snímačem je indukčnostní páčkový snímač s malou přitlačnou silou pro velmi „jemné“ měření a druhým je prototyp snímače pro operativní kontrolu s optickou jednotkou s rozlišením 2,5 nm.

Práce je rozčleněna do šesti kapitol a závěru.

Druhá kapitola objasňuje důvody vzniku práce a její cíle s přihlédnutím k dnešním požadavkům strojírenské metrologie a k zadání bakalářské práce.

Ve třetí kapitole je podle dostupné literatury zpracován historický vývoj odměřování délky. Jsou zde také vysvětleny základní pojmy v oblasti metrologie délky a přesnosti měření ve strojírenské praxi.

Čtvrtá kapitola se zabývá analýzou vybraných průmyslových snímačů délky. Jedná se o hojně rozšířené indukčnostní snímače a progresivní optické snímače.

Pátá kapitola je zaměřena na analýzu, návrh a realizaci speciálního indukčnostního snímače s malou přitlačnou silou. Tato část také obsahuje zhodnocení metrologických vlastností snímače a doporučení pro praktické využití.

V šesté kapitole je řešen návrh a oživení druhého snímače – prototypu optického snímače délky. Stejně jako v předchozí kapitole, i zde se nachází ověření požadovaných metrologických vlastností a doporučení pro praxi.

2 MOTIVACE

V průmyslové praxi existuje požadavek na speciální indukčnostní snímač, u kterého je nutné při měření garantovat přítlačnou silou menší než 0,01 N. Takový druh snímače je nutným předpokladem pro atypické měření povrchově citlivých nebo měkkých součástí. Průmyslové snímače s malou přítlačnou silou však nejsou na trhu běžně dostupné. [2] Uvedený druh snímače by mohl být využíván v poloautomatických a automatických měřicích stanicích pro kontrolu optických výrobků, elektrotechnických součástek apod.

Při ověřování a kalibraci úchylkoměrů a dalších délkových měřidel se doposud využívají standardní indukčnostní snímače s rozlišením 0,1 mikrometru. Firma Renishaw s. r. o. nabízí novou generaci optických snímačů polohy s rozlišením až 2,5 nanometru. [21-25] V dostupné literatuře zatím neexistuje návod na konstrukci snímače s takovým rozlišením. Je tedy možné považovat za vhodné zahájit vývoj nového typu délkového snímače pro laboratorní účely s takovýmto rozlišením.

Na základě analýzy zadání, rešerše dostupné literatury a pokynů vedoucího byly stanoveny následující cíle této práce:

1. Zpracování základní terminologie v oblasti délkového odměřování a přesnosti měření ve strojírenské praxi.
2. Analýza konstrukce a funkce indukčnostních a optických snímačů délky.
3. Návrh konstrukce snímače s malou přítlačnou silou.
4. Návrh snímače pro operativní kontrolu s optickou jednotkou.
5. Montáž vyvinutých snímačů, uvedení do provozu a zhodnocení jejich metrologických vlastností.
 - a. U snímače s malou přítlačnou silou ověřit velikost této síly a čas dokmitu jeho doteku.
 - b. U snímače pro operativní kontrolu vyhodnotit systematickou a náhodnou chybu měření.
6. Formulace doporučení praktického využití pro oba vyvinuté snímače.

3 MĚŘENÍ DÉLKY

Měření je dle článku 46 mezinárodního slovníku VIM3 [10] proces experimentálního získávání jedné nebo více hodnot veličiny, které mohou být důvodně přiřazeny veličině.

V praxi je cílem měření délky především zjištění hodnoty délkového rozměru součásti, nebo zkontrolovat shodu se specifikací. Ve strojírenství patří měření délek k nejčastěji prováděným metrologickým úkonům, kde zaujímá až 70 % všech měření. [8] Pro získávání hodnot délkových parametrů máme k dispozici velké množství přístrojů a měřidel. Ty je nutné vybírat s přihlédnutím k danému použití.

3.1 Historie délkového odměřování

První pokusy o uvědomělé měření délek můžeme nalézt už v pravěku, kde se vzdálenosti porovnávaly s rozměry částí lidského těla např. palec, stopa, píd', loket apod. [8]

Postupem času byla snaha různé jednotky a míry sjednocovat a vznikala první měřidla – „etalony“, která měla přesně dané rozměry a byla zavazující pro konkrétní oblast např. pražský loket. Přes vývoj definice metru a přes průmyslovou revoluci se dostaneme k potřebě měřit opravdu malé rozměry. K tomuto účelu byly vynalezeny mechanické přístroje (posuvné měřidlo, výškoměr, úchylkoměr...). Po přelomovém objevu elektrického proudu je snaha tuto energii uplatnit stejně jako v mnoha dalších odvětvích techniky také v metrologii. [1]

Změna elektrických vlastností vodičů, například odporu, při rozdílných rozměrech byla objevena lordem Kelvinem už v roce 1856. Faraday například zkoušel měřit rychlost proudící vody pomocí elektrické indukce. První odporový teploměr sestrojil Siemens roku 1871 a další fyzikální zákonitosti byly prezentovány veřejnosti už v druhé polovině devatenáctého století. Princip změny kapacity byl předveden světu okolo roku 1910. Ostatní podobné objevy na sebe nenechaly dlouho čekat: kapacitní měření torze (1912), uhlíkové snímače pro tlakoměry (1924), torzní snímače pro tlakoměry (1917) ... [1]

Vidíme tedy, že většina fyzikálních pravidel využívaných v technice měření byla popsána už v letech 1920-1935. Nicméně rozvoj měření neelektrických veličin pomocí elektrických podmínil rozmach elektrotechniky a elektroniky. A je samozřejmostí, že nové poznatky byly aplikovány i do odměřování délek. [1]

V roce 1958 vzniká pro chemický průmysl zařízení, které můžeme nazvat jako první indukční snímač, i když v té době nahrazoval pouze mechanický koncový snímač. Tehdy bylo třeba vymyslet přístroj, který bude odolný vůči opotřebení a spolehlivě vydrží mnoho pracovních cyklů. I když mluvíme o dobách minulých, je pozoruhodné, že požadavky, které iniciovaly vznik prvního indukčního snímače, jsou stále aktuální a jsou pouze doplněny o další. [5]

Během následujících let se s postupným vývojem vědy a techniky dostávají do povědomí další progresivní, především už bezkontaktní, metody odměřování. Například ultrazvukové snímače, optické, magnetické atd.

3.2 Současný stav technologie délkového odměřování

Dnešní technické požadavky kladou důraz na automatizaci měření fyzikálních veličin. Proto se nejčastěji setkáváme s převodem měřené neelektrické veličiny na veličinu elektrickou pomocí

různých snímačů (senzorů), které se liší svou konstrukcí a principem. Měření elektrických veličin je pro potřeby strojírenského průmyslu vhodné díky těmto vlastnostem:

- velká přesnost,
- vysoké rozlišení,
- vyšší rychlost měření,
- možnost dálkového přenosu veličin,
- měření na více místech,
- možnosti zpracování výstupních dat.

Je třeba dodat také nevýhody, například:

- vyšší náklady na měřicí kanál,
- nákladnější údržba,
- nutnost kvalifikovanějšího personálu. [3] [8]

Příkladem převodu neelektrické veličiny na veličinu elektrickou může být převod změny délky na změnu indukčnosti.

Odrazem současného stavu jsou například metrologické požadavky automobilového průmyslu na systém a způsob měření dílů. Ty jsou odlišné od požadavků prezentovaných dříve. Postupně se upouští od statistického vyhodnocování zmetkovitosti výroby (např. metoda SPC popsaná v normě ČSN ISO 11462-2 (010275) [11]) a na místo toho je kladen důraz na 100 % kontrolu výrobků. To znamená, že na montážní linku nesmí přijít neshodný díl. Navíc je třeba tohoto vyhodnocení dosáhnout přímo ve výrobních linkách. Proto se dnes běžně setkáváme s automatickými kontrolními stanicemi, jež jsou do výrobních linek integrovány. Za normálního taktu linek, který se například v automobilovém průmyslu pohybuje i v řádu sekund, je nutné změřit všechny důležité parametry výrobku s přesností známou dosud jen u laboratorních měřících přístrojů. [7] [4]

Kromě zmíněného požadavku na rychlost a přesnost měření jsou navíc u snímačů kladeny nároky na bezproblémové fungování v náročných podmínkách výrobních hal. Ty můžeme definovat jako výrazné kolísání teploty, vibrace, rázy, olejová mlha, vzdušná vlhkost apod. Navíc se ukazuje, že vývoj jde tak dopředu, že je třeba již v krátké budoucnosti realizovat měřicí přístroje s rozlišitelností a opakovatelností měření v řádu nm. [4]

Taktéž není možné používat pouze několik typů univerzálních snímačů, ale je potřeba celá řada účelově koncipovaných snímačů pro kontrolu různých parametrů. Z důvodu taktu linky je nutné, aby snímač měl malou dobu dokmitu a disponoval pneumatickým odstavováním doteku zabraňujícím poškození ať už doteku samotného, nebo měřeného objektu. [4]

I přes rychlý vývoj bezkontaktních technologií, jako jsou například optické metody měření, se však ve výrobních linkách stále nejčastěji využívají doteková – kontaktní měřicí zařízení. [4]

3.3 Měřicí soustava

Pokud pomineme mechanická měřidla, která jsou pro sériovou velkovýrobu dnes již pravděpodobně překonaná, můžeme se detailněji zaměřit na perspektivní systémy a způsoby kontroly délkových rozměrů v praxi. V praxi se pro tyto účely používají různá čidla, senzory,

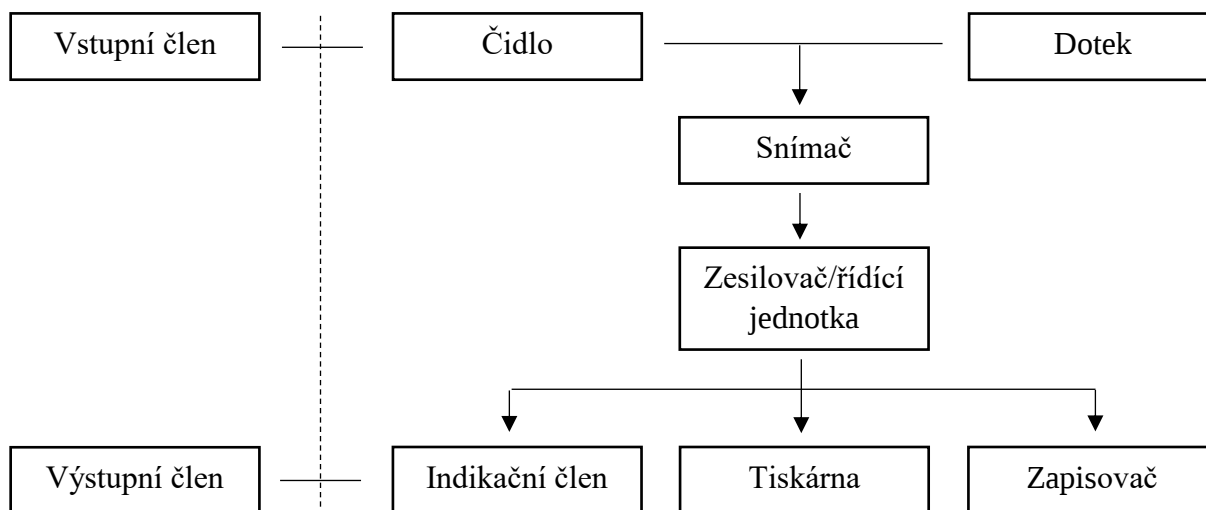
snímače, avšak všechny uvedené termíny popisují tutéž věc. Můžeme je tedy shrnout pojmem snímač, což je část měřicí soustavy. [3]

Měřicí soustavy jsou složitější přístroje používané pro měření požadovaných vlastností. Můžeme je rozdělit na jednokanálové, vícekanálové a vícekanálové s přepínačem. Měřicí řetězec (obr. 1) je složen z měřicího kanálu, záznamového kanálu a pokud jde o automatizované měření ještě navíc z procesoru, nebo elektronického počítače, který má za úkol řízení samotného měřicího procesu a následné zpracování a vyhodnocení naměřených dat. Počítač je propojen s dalšími částmi měřicí soustavy. [3]

Měřicí kanál tvoří snímač, elektronické obvody a indikátor. Záznamový kanál se skládá ze zapisovače, tiskárny, číslicové paměti, či jiného zařízení pro uchování dat. [3]

Snímač jako jedna z nejdůležitějších částí měřicí soustavy má na starosti právě převod vstupní neelektrické veličiny na veličinu elektrickou. Stavba snímače je přizpůsobena použití a principu, na kterém funguje. Často je možné měřit stejnou veličinu více typy snímačů. Při výběru snímače pro konkrétní aplikaci je nutno zohlednit tyto požadavky:

- nutná závislost výstupní veličiny na vstupní,
- odpovídající rozlišení a přesnost pro konkrétní aplikaci,
- u snímače musí vyhovovat tvar závislosti vstupní veličiny na výstupní,
- snímač nesmí zatěžovat objekt měření,
- odolnost snímače vůči nepříznivým podmínkám okolí (vlhkost, olejová mlha, vibrace...), či parazitním vlivům okolí,
- co nejjednodušší stavba snímače, jednoduchost údržby a co největší spolehlivost. [3]



Obr. 1) Schéma měřicího řetězce [8]

3.4 Přesnost měření ve strojírenské praxi

Abychom se mohli bavit o vlastnostech měřicích přístrojů, je nutné používat jednotnou terminologii. V současné době je platný mezinárodní slovník metrologických termínů VIM 3, který je u nás převzatý normou TNI 01 0115 [10]. Jde o komplexní slovník zabývající se názvoslovím v mnoha oblastech včetně strojírenství.

3.4.1 Měření a přesnost měření

Prvním důležitým termínem je pravá hodnota veličiny (pravá hodnota; skutečná hodnota), kterou norma definuje jako hodnotu veličiny, která je ve shodě s definicí veličiny. [10]

Protože neexistuje absolutně přesné měřidlo a naprosto ideální podmínky měření, pravé hodnoty veličiny v praxi nikdy nedosáhneme. Ve skutečnosti je nahrazována konvenční hodnotou veličiny, což je hodnota veličiny přiřazená pro daný účel k veličině dohodou. [10] „Přiřazená dohodou“ znamená, že hodnota vyhovuje svou přesností danému účelu použití. Pomocí této hodnoty a nejistoty kalibrace zapisujeme výsledek kalibrace etalonu, kde má konvenční hodnota hlavní využití. Získává se komparační metodou měření pomocí etalonu. Odhadem pravé veličiny v praxi je referenční hodnota veličiny. [12]

Referenční hodnota veličiny, nebo jen referenční hodnota je slovníkem definována jako hodnota veličiny používaná jako základ pro porovnání s hodnotami veličin stejného druhu. [10]

V praxi se jako referenční hodnota používá konvenční hodnota veličiny (při kalibraci). Mohou to však být také hodnoty stupnice čárkového měřidla. Obecně při jakémkoli měření, nebo kalibraci je výsledek naměřená hodnota veličiny, kterou dle slovníku rozumíme hodnotu veličiny reprezentující výsledek měření [10]. Jedná se o odečtenou hodnotu, nebo aritmetický průměr ze série měření při dodržení podmínek opakovatelnosti. Je možnost naměřenou hodnotu upravit odečtením systematické chyby. [12]

Výsledek měření definujeme jako soubor hodnot veličiny přiřazený měřené veličině společně s jakoukoliv další dostupnou relevantní informací [10].

Úplný výsledek se skládá z naměřené hodnoty bez systematické chyby a z nejistoty měření, což je nezáporný parametr charakterizující rozptýlení hodnot veličiny přiřazených k měřené veličině na základě použité informace. [10]

Další termín, který se používá v souvislosti s každým měřením i měřidlem samotným je přesnost měření. Tu slovník [10] definuje jako těsnost shody mezi naměřenou hodnotou veličiny a pravou hodnotou měřené veličiny. Přesnost není kvantitativní pojem, tudíž nelze číselně vyjádřit. A jelikož není možné vyjádřit ani přesnou hodnotu veličiny přesnost, nemůže být rozdíl dvou hodnot, které popisuje definice. [12] Proto se přesnost měření vyjadřuje pomocí nejistot a chyb měření. Tyto pojmy jsou detailněji popsány v následujících dvou podkapitolách.

S přesností také úzce souvisí preciznost měření, která udává těsnost shody mezi indikacemi nebo naměřenými hodnotami veličiny získanými opakovanými měřeními na stejném objektu nebo na podobných objektech za specifikovaných podmínek. [10]

Před uvedením do provozu a poté v pravidelných intervalech používání měřidla je nutné provádět kalibraci měřidla. To je dle metrologického slovníku činnost, která za specifikovaných podmínek v prvním kroku stanoví vztah mezi hodnotami veličiny s nejistotami měření poskytnutými etalonu a odpovídajícími indikacemi s přidruženými nejistotami měření. A ve druhém kroku použije tyto informace ke stanovení vztahu pro získání výsledku měření z indikace. [10]

Abychom mohli uvažovat o relevanci a návaznosti měření, je nutné dodržet podmínky opakovatelnosti měření a podmínky reprodukovatelnosti měření. Mezi první zmíněné patří:

- stejný postup měření,
- stejný obslužný personál,
- stejný měřicí systém,

- stejné pracovní podmínky,
- stejné místo
- a opakování měření na stejném, nebo podobných objektech v krátkém časovém úseku. [10]

Soubor podmínek reprodukovatelnosti je pak definován:

- různým místem měření,
- různým obslužným personálem,
- stejnými podmínkami
- a stejným, nebo podobným objektem měření. [10]

V neposlední řadě je třeba definovat rozlišení, jakožto parametr, který hraje důležitou roli v hodnocení u všech měřících přístrojů. Rozlišení je nejmenší změna veličiny, kterou rozeznáme v odpovídající indikaci. [10]

3.4.2 Nejistota měření

K získání úplného výsledku měření je tedy nutné k výsledku měření přidat kombinovanou standardní nejistotu měření u_C . Tu v praxi skládáme z nejistoty typu A (u_A) a z nejistoty typu B (u_B). Zatímco nejistotu typu A získáme opakovaným měřením jako výběrovou směrodatnou odchylku, do nejistoty typu B zahrnujeme vliv okolních možných zdrojů nejistot. Nejistota typu B tedy primárně nesouvisí s měřením samotným. [12]

Nejistota typu A se vyhodnocuje z n naměřených hodnot za podmínek opakovatelnosti, ze kterých vypočítáme u_A jako výběrovou směrodatnou odchylku $s_{\bar{x}}$ aritmetického průměru:

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

$$s_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{n}}, \quad (2)$$

kde s_x je směrodatná odchylka:

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}. \quad [12] \quad (3)$$

Doporučený minimální počet opakovaných měření je $n = 10$. Pokud budeme uvažovat menší počet měření, vypočteme nejistotu měření ze vztahu:

$$u_{AK} = k_s \times u_A, \quad (4)$$

kde k_s označuje koeficient, jehož velikost je při dodržení dalších předpokladů možné odvodit ze Studentova rozdělení. [12]

Postup vyhodnocování nejistot typu B obsahuje 2 kroky:

- 1) vytipování možných zdrojů nejistot $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_n$,
- 2) určení složek nejistoty typu B u_{BZj} každého zdroje nejistot (technická dokumentace, kalibrační listy, technické normy, pokyny výrobce, expertní odhad atd.).

Možné zdroje nejistoty u_B závisí především na systému měření, vlivech prostředí a na měřené veličině. V případě měření délky a následném vyhodnocení nejistoty typu B je nutné brát v úvahu především tyto faktory:

- chyby měřidel,
- teplotní dilatace,
- elastické deformace,
- chyby v doteku,
- vliv obsluhy.

Příklad vlivů vázaných na měřicí přístroje a vlivů okolního prostředí:

- kalibrační nejistoty,
- rozlišitelnost/rozlišení odečtu z přístrojů,
- relativní vlhkost,
- tlak,
- magnetické a elektrické pole atd. [12]

Smyslem tohoto procesu je získat oba typy nejistot, ze kterých vyjádříme kombinovanou standardní nejistotu u_C dle vzorce:

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}. [12] \quad (5)$$

Posledním krokem je získání standardní rozšířené nejistoty U , která bude dílčí složkou úplného výsledku měření viz výše. Vztah pro výpočet rozšířené nejistoty:

$$U = k_U \times u_C, \quad (6)$$

kde k_U reprezentuje koeficient rozšíření (pokrytí 95%). Ten závisí na rozložení jednotlivých vlivů, nejčastěji se však vyskytuje $k_U = 2$. [12]

U nejistotového přístupu můžeme měření prohlásit za přesnější, když nabízí menší nejistotu měření.

3.4.3 Chyba měření

O chybě měření můžeme obecně říct, že je relativní a lze vyjádřit jí podílem chyby měření a referenční hodnoty měřené veličiny. Standardně se udává v procentech a dle metrologického slovníku [10] je definována jako naměřená hodnota veličiny minus referenční hodnota veličiny. [12]

Vznik chyby měření zapříčiňují různé zdroje nepřesností a lze jí rozdělit na:

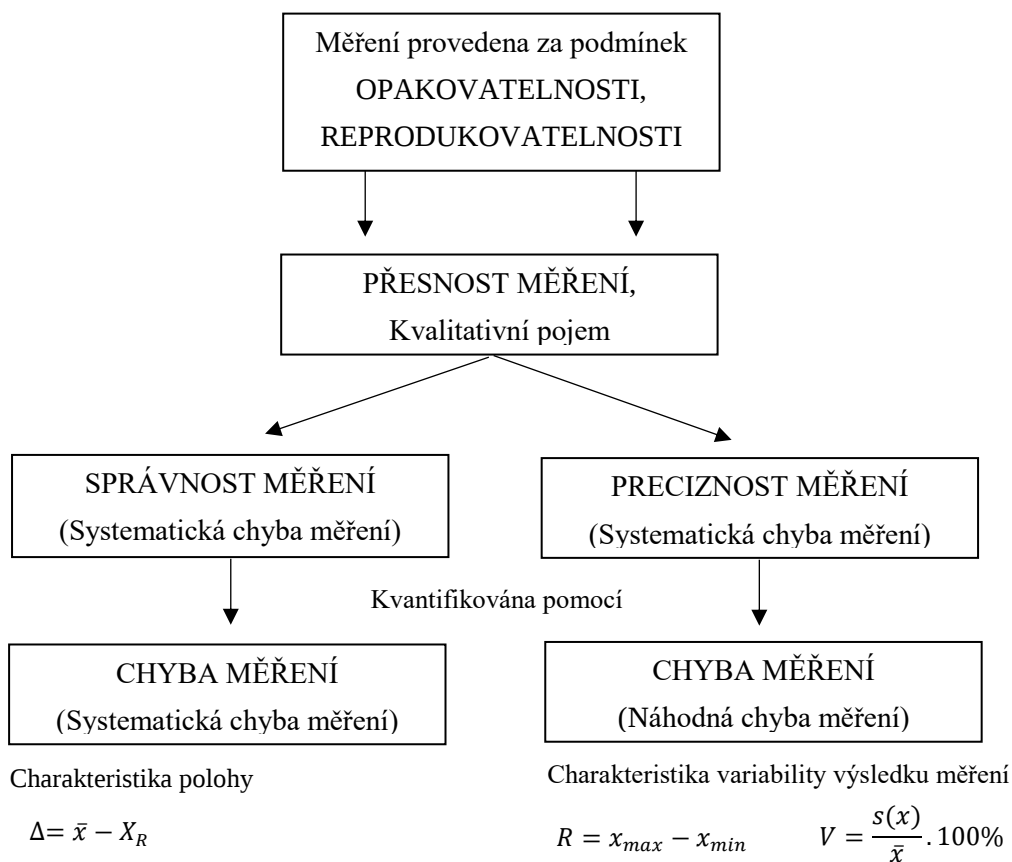
- náhodnou, což je složka chyby měření, která se v opakovaných měřeních mění nepředvídatelným způsobem a
- systematickou, kterou slovník definuje jako složku chyby měření, která v opakovaných měřeních zůstává konstantní nebo se mění předvídatelným způsobem. [10]

Toto dělení lze však provádět pouze u série měření, protože pouze u jednoho měření není možné zcela jednoznačně rozlišit systematické a náhodné vlivy. [12]

Z tohoto vyplývá, že například chybu při kalibraci způsobenou konstantní pracovní teplotou rozdílnou od referenční teploty můžeme označit za systematickou a lze jí tedy

kompenzovat. Naproti tomu chybu náhodnou jednoduše kompenzovat nelze, můžeme jí pouze snížit zvýšením počtu měření. [12]

Tedy při uvažování chybového přístupu, schematicky znázorněného na obrázku 2, můžeme měření považovat za přesnější, když nabízí menší chybu měření.



Obr. 2) Schéma chybového přístupu – upraveno dle [12] [26]

Kde Δ – systematická chyba měření, X_R – referenční hodnota, R – rozptyl a V – variační koeficient.

Při vyjadřování systematické chyby měření pomocí charakteristiky polohy pracujeme s aritmetickým průměrem $\bar{x}$, který vypočítáme ze vztahu:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. [12] \quad (7)$$

Níže jsou uvedeny rovnice pro výpočet systematické chyby, rozptylu a variačního koeficientu:

$$\Delta = \bar{x} - X_R, \quad (8)$$

$$R = x_{max} - x_{min}, \quad (9)$$

$$V = \frac{s(x)}{\bar{x}} \cdot 100\%. [12] \quad (10)$$

4 ANALÝZA PRŮMYSLOVÝCH SNÍMAČŮ DÉLKY

Snímač je jednou z nejpodstatnějších součástí měřicího systému. Limituje přesnost celé měřicí soustavy, často nejvíce ovlivňuje nákladnost zařízení a také náročnost výroby. Při stavbě snímačů se používají precizní materiály s velice jemnou úpravou. [1]

Snímače, které převádějí neelektrickou veličinu na elektrickou, můžeme na základní úrovni rozdělit na kontaktní (obr. 3a) a bezkontaktní (obr. 3b). Dalším možným hlediskem dělení je dle chování v závislosti na elektrické energii:

- aktivní snímač – pokud je snímač vystaven působení neelektrické veličiny, funguje jako zdroj elektrické energie (termoelektrický, piezoelektrický indukční, ...),
- pasivní snímač – mění se pouze jeden z parametrů snímače (odporový, kapacitní, indukčnostní, ...). [1]



a)



b)

Obr. 3) a) kontaktní indukčnostní snímač Peter Hirt [13]
b) bezkontaktní indukční snímač Baumer [14]

Vedle snímačů délky existují ve strojírenské praxi i další snímače pro hodnocení jiných fyzikálních vlastností. Například snímače pro měření:

- mechanických veličin (poloha, rychlost, vibrace, tlak...),
- tepelných veličin (teplo, teplota),
- chemických veličin (složení plynů a pevných látek),
- záření (viditelné světlo, UV záření, infračervené záření). [1]

Posledním znakem pro rozdělení snímačů je fyzikální princip. Podle toho rozlišujeme snímače na:

- elektrické,
 - odporové,
 - indukčnostní,
 - kapacitní,
 - ostatní,
- pneumatické,

- optické,
- rezonanční,
- mechanické,
- kombinované. [8]

4.1 Indukčnostní snímače délky

Indukčnostní kontaktní snímače zaujímají nepostradatelnou pozici v automobilovém průmyslu. Představují široké spektrum pasivních snímačů (zapojených do obvodu s pomocným střídavým napětím) určených k měření délek, kde je zkoumaná neelektrická veličina snímačem konvertována na změnu indukčnosti. [8]

Snímač se skládá z cívky s jádrem, které může být pouze elektricky vodivé nebo feromagnetické. Z důvodu působení vnější neelektrické veličiny dojde k změně polohy jádra vůči cívce, nebo cívčám, a to způsobí změnu jejich vlastností. [8]

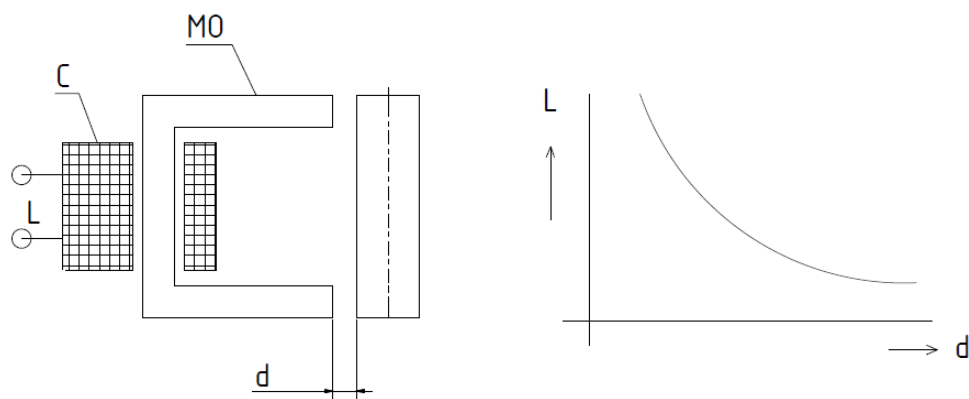
Indukčnost cívky je závislá na počtu závitů, jejím rozměru, na elektrických a magnetických vlastnostech obvodu a na celkové geometrii obvodu. Pokud využíváme dvou cívек, je třeba zohlednit jejich vzájemnou indukčnost, která je závislá na vzdálenosti těchto cívек a také na jejich orientaci. [3]

Změny indukčnosti můžeme docílit různými způsoby, podle nich rozeznáváme čtyři typy snímačů:

- indukčnostní snímač s malou vzduchovou mezerou,
- indukčnostní snímač s otevřeným magnetickým obvodem,
- indukčnostní snímač s potlačeným pólem,
- indukčnostní snímač bez feromagnetika. [1]

4.1.1 Indukčnostní snímač s malou vzduchovou mezerou

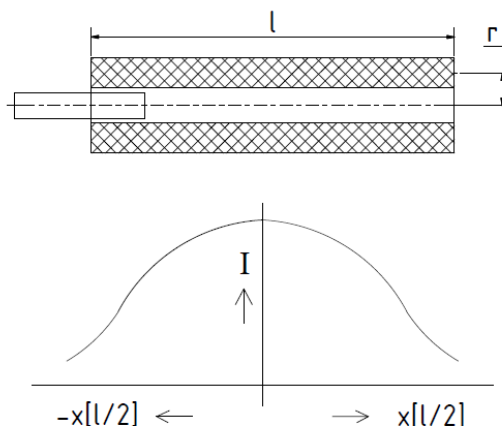
Snímač pracující na principu změny velikosti vzduchové mezery d v magnetickém obvodu MO , nebo změny velikosti plochy vzduchové mezery v magnetickém obvodu (obr 4). Magnetický obvod tvoří pevná část snímače vyrobená z oceli nebo feritu. Snímač s malou vzduchovou mezerou se vyznačuje velkou nelinearitou základní charakteristiky. Ta je vyznačena na obrázku 4, kde L je indukčnost cívky C . Tento typ snímače se v praxi používá v diferenčním uspořádání je určen především k měření malých změn polohy. [3]



Obr. 4) Indukčnostní snímač s malou vzduch. mezerou [3]

4.1.2 Indukčnostní snímač s otevřeným magnetickým obvodem

Snímač se skládá z cívky, do níž je zasouváno feromagnetické jádro. Posuvem jádra vůči cívce dochází ke změně indukčnosti cívky. Feromagnetický obal cívky je v podélném směru rozdělen, aby nedocházelo ke vzniku závitu nakrátko. Obrázek 5 znázorňuje rozložení intenzity magnetického pole v ose cívky (I – el. proud, r – poloměr cívky, l – délka cívky). [1]

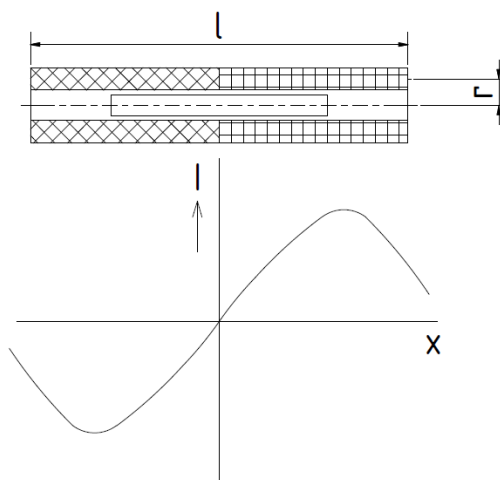


Obr. 5) Indukčnostní snímač s otevřeným magnetickým obvodem [1]

Při diferenčním zapojení snímače s otevřeným magnetickým můžeme pozorovat odlišný průběh jeho charakteristiky (obr. 6). Výhoda tohoto zapojení je ve vzájemné kompenzaci nelineárních indukčnostních změn. V porovnání se snímačem s malou vzduchovou mezerou můžeme však pozorovat některé nevýhody:

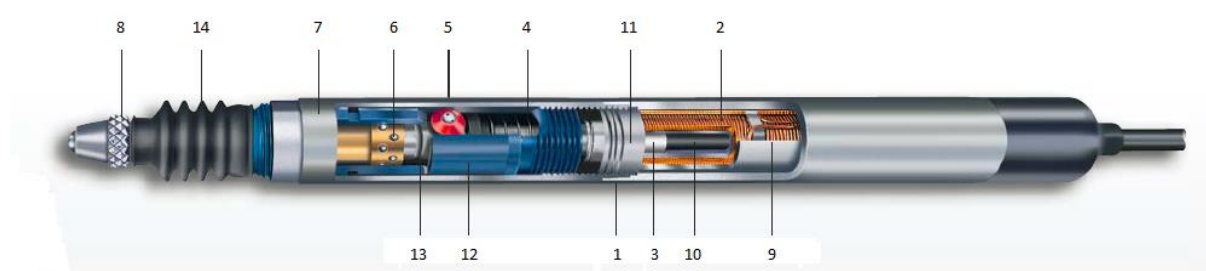
- menší rozlišení,
- větší počet závitů cívky = větší parazitní kapacita,
- vliv okolních magnetických polí,
- větší nároky na přesné vyrobení cívky. [1]

I přes uvedené nevýhody představuje tento typ většinu snímačů používaných v automobilovém a ložiskovém průmyslu. Konstrukce těchto snímačů se vyznačují mechanickou odolností, jednoduchostí, nízkou cenou, spolehlivostí a příznivými metrologickými vlastnostmi



Obr. 6) Diferenciální uspořádání snímače s otevřeným magnetickým obvodem [1]

Základním konstrukčním uspořádáním průmyslového indukčnostního snímače je tzv. tužkový snímač, jehož řez je proveden na obrázku 7. Dvě cívky (2), ve kterých se pohybuje feromagnetické jádro (10), jsou umístěny v kovovém plášti (1). Cívky jsou chráněny proti okolním vlivům stínícím pláštěm (9). Pohyb a vedení jádra v ose pláště zajišťuje předepnuté kuličkové vedení (6), u kterého se nachází vodící systém (5), jenž má za úkol zamezit protáčení celého vnitřního aparátu snímače. Kuličkové vedení spolu s vodící rolničkou mají své samostatné uložení (12). Měřicí trn (13), ke kterému je pomocí členu (3) upevněno jádro, je opatřen pružinou (4). Jejím úkolem je přitlačení snímacího doteku (8) k měřenému objektu. Parametry pružiny tedy udávají přitlačnou sílu, kterou snímač na objekt působí. Pružina je v systému zajištěna matkou (11). Číslem (7) je na obrázku znázorněn vymežovací kroužek. Část měřicího trnu, která se nachází vně pláště je opatřena ochranným gumovým prvkem. (14). [18]



1 – plášť, 2 – cívky, 3 – upevňovací člen jádra, 4 – pružina, 5 – vodící systém, 6 – kuličkové vedení, 7 – vymežovací kroužek, 8 – snímací dotek, 9 – stínící plášť, 10 – jádro, 11 – zajišťovací matka, 12 – uložení vedení, 13 – měřicí trn, 14 – ochranný prvek

Obr. 7) Tužkový snímač TESA [18]

Měřicí dotek bývá ke snímači standardně připevněn závitem M2,5 a v mnoha případech se jedná o kuličku z materiálu přímo definovaného pro konkrétní použití (ocel, rubín, slinuté karbidy apod.). Dalším typem doteku může být například hrotový dotek, diskový dotek atd. [19]

Indukčnostní snímače bývají také často vybaveny pneumatickým, nebo vakuovým odstavováním doteku, které má hned několik důvodů. Zaprvé je minimalizován vliv obsluhy na měření, což souvisí s podmínkou opakovatelnosti. A za další jde o řešení požadavku na měření v taktu výroby linky, kdy je nutné rychlé výměny dílu v měřícím zařízení. S odstavováním doteku velmi úzce souvisí doba dokmitu snímače. To je doba, za kterou se po kontaktu s objektem dotek ustálí do klidové polohy, ve které je snímač schopný měření. Je zřejmé, že na tuto vlastnost snímače má veliký vliv přitlačná pružina. Zároveň se musí volit taková síla, aby nedocházelo k porušení měřeného objektu.

I přes široké uplatnění tužkových snímačů přichází uživatelé se specifickými požadavky na měřicí zařízení, kterým tato konstrukce nevyhovuje. Ať už jde o tvar těla, zdvih snímače, přitlačnou sílu, způsob odstavování apod. Proto je často nutné navrhovat speciální konstrukce snímačů pro konkrétní použití. Jeden takový návrh je detailněji zpracován v páté kapitole této práce.

4.1.3 Indukčnostní snímač s potlačeným polem

Tento typ snímače využívá změny vzdálenosti cívky od elektricky vodivého objektu, při které dojde ke rozdílu impedance cívky v obvodu. Právě změna impedance je přenesením měřené neelektrické veličiny. [3]

V praxi rozlišujeme tři základní typy snímačů s potlačeným pólem. Liší se způsobem orientace cívky vůči vodivému tělesu:

- plocha tělesa se pohybuje kolmo na osu cívky,
- vodivým tělesem je válec, který je nasunován na cívku,
- vodivým tělesem je válec nebo tyč, které se pohybují uvnitř cívky. [1]

4.1.4 Indukčnostní snímač bez feromagnetika

Jde o konstrukci zařízení, kde změnu vzájemné indukčnosti zajišťují alespoň dvě cívky, které lze vzájemně posunout. Uplatnění v praxi najdeme při měření malých posunutí, měření úhlových vychylek atd. [1]

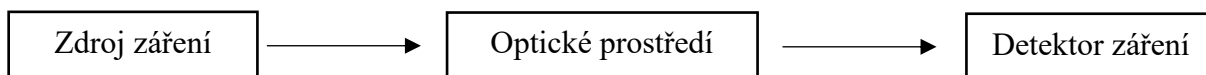
4.2 Optické snímače délky

Díky využití principů optiky u měřících zařízení lze sestavit snímač polohy s vysokým rozlišením, které je limitováno vlastnostmi světelných jevů. Dalšími nespornými výhodami této technologie je odolnost vůči okolním elektromagnetickým vlivům a také schopnost dosahovat malých konstrukčních rozměrů snímačů. [15]

Schéma optického snímače (obr. 8) lze zjednodušit na zdroj záření, optické prostředí a detektor záření. Zdroj záření využívající luminiscenci (emise optických částic) vyzařuje paprsek, který cestou skrz optické prostředí získá potřebnou informaci. Tuto informaci detektor rozkládá a dalším postupem je signál převeden na elektrický impulz. Jako zdroje záření se používají LED diody, laserové diody, výbojky, žárovky, helium-neonový laser a další. [15]

V praxi rozlišujeme tři konstrukční typy optických snímačů:

- snímač, kde zjišťujeme změnu polohy zdroje,
- signál je tvořen průchodností paprsku optickým prostředím,
- vyhodnocuje se interference vyzářeného a odraženého paprsku. [15]

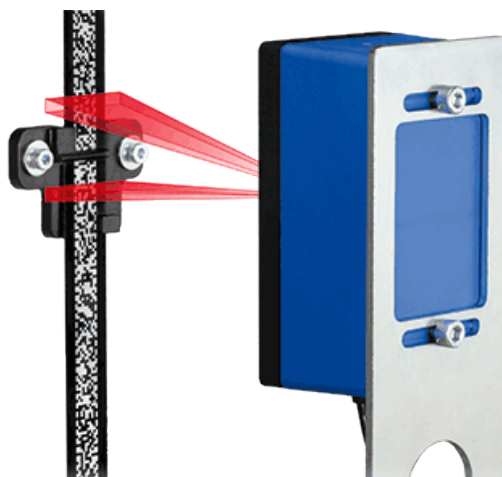


Obr. 8) Schéma optického snímače [15]

4.2.1 Absolutní optické snímače

Tento typ snímačů zařazujeme mezi optické snímače pro měření spojitě polohy. Signál s polohou získáme pomocí průhledných a neprůhledných ploch, které jsou uspořádány na pravítku pro přímočarý pohyb, nebo na kotouči pro pohyb křivočarý. Výslednou polohu snímač vyhodnotí podle referenčního bodu. Světelný tok procházející průhlednými plochami dopadá na systém přesně uspořádaných detektorů. V nich se informace digitalizuje a výstupem je absolutní poloha měřeného objektu. [15]

Dalším možnou modifikací absolutního snímače je systém, kde se vyskytují dva zdroje záření (obr. 9) a detektor odražených paprsků vyhodnocuje jejich vzájemnou polohu vůči pravítku se speciálním kódem. [15]



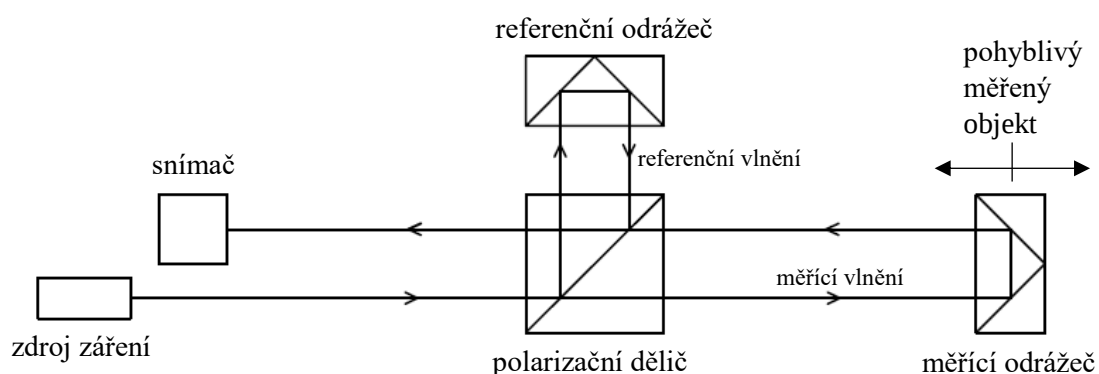
Obr. 9) Absolutní optický snímač s kódovým pravítkem [16]

4.2.2 Inkrementální optické snímače

Jde opět o snímače pro měření spojitě polohy. Na rozdíl od snímačů absolutních, které nám udávají přesnou polohu měřeného objektu, inkrementální snímače pouze poskytují informaci o pohybu objektu a o směru pohybu. Pokud chceme pomocí tohoto typu zjistit přesnou polohu objektu, je třeba snímač doplnit o kanál s referenční značkou, ke které se vztahuje poloha.

Na tomto principu fungují laserinterferometry (blokové schéma na obrázku 10), ve kterých se skládají dvě vlny – měrná a referenční. Svazek paprsků zde dopadá na polopropustnou plochu pod úhlem 45° , od které se část paprsků odrazí k zrcadlu a část se dostane k pohyblivému zrcadlu na měřeném objektu, kde se odrazí zpět do detektoru. Složením prvního a druhého odraženého paprsku získáme přesnou polohu objektu. Dalšími úpravami optiky lze dosáhnout indikaci směru. [15] [6]

Dalším možným principem inkrementálního snímače je vyhodnocování světelného paprsku, který interaguje s pohyblivým pravítkem. Pravítko může být tvořeno střídáním odrazné a neodrazné plochy, nebo průsvitné a neprůsvitné plochy. Paprsky, které se buď odrazí, nebo projdou pravítkem, dopadají na fototranzistor. Pokud dojde k posuvu pravítka, mění se kolektorové napětí, které generuje dva impulzy posunuté o jednu čtvrtinu periody. [15]



Obr. 10) Laserový interferometr [17]

5 SNÍMAČ S MALOU PŘÍTLAČNOU SILOU

Dnes vyvíjené snímače jsou zařízení určená převážně pro poloautomatické a automatické linkové stanice, často pracující v nepříznivých provozních podmínkách (vibrace, rázy, olejová mlha, kolísání teploty, magnetické pole atd.). Jak již bylo zmíněno, jejich provoz musí být v souladu s taktem linky a rozlišení musí odpovídat současným špičkovým laboratorním odměřovacím zařízením. Pro tyto účely se používají především indukčnostní diferenciální snímače s polomostovým zapojením. Nejrozšířenějším typem je cívková jednotka s pláštěm o průměru 6,2 mm a délkou v závislosti na požadované linearitě (převážně do 25 mm). Tyto systémy umožňují měřit s rozlišením a opakovatelností do 0,01 μm , avšak v podmínkách laboratoře, nebo provozních středících podniků. Tužkové snímače však často speciálním požadavkům zákazníků nevyhovují a výrobci snímačů jsou nuceni vyvíjet snímače přímo na míru konkrétnímu použití. Jedním z takových je i následující návrh.

5.1 Analýza modelu

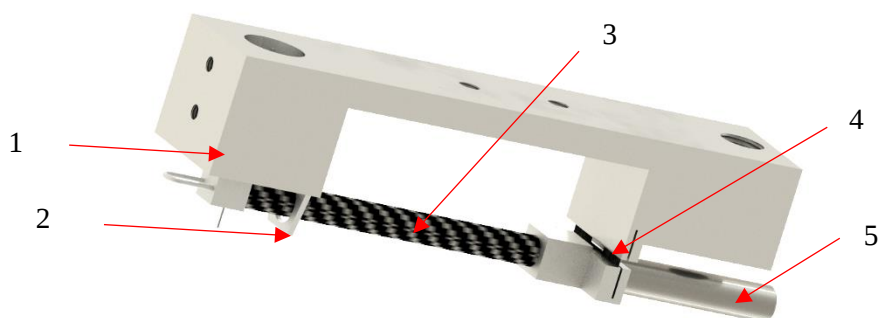
Nově navrhovaný nízkozdvihový snímač pro přesnější měření reaguje na požadavek malé přitlačné síly a rozlišení v řádu nm, tedy o řád vyšší než běžně používané snímače. Vyššího rozlišení je možné docílit zvětšením počtu závitů cívek a použitím kvalitnějšího materiálu na jádro a plášť cívkové jednotky.

Požadovaná přitlačná síla musí dosahovat maximálně 0,01 N. Právě z tohoto důvodu není možné použít klasickou konstrukci indukčnostních snímačů s předepnutým kuličkovým vedením. Pokud by bylo použito standardní kuličkové vedení, objevilo by se při takto malé přitlačné síle riziko ztráty plynulosti chodu při zdvihu snímače, což by mělo nepříznivý vliv na měření. Řešením problému je použít jako vodící prvek tenkou planžetu z planžetového plechu, která absolutní plynulost chodu zaručuje. Kvůli použití planžety byla místo klasického tužkového těla navržena konstrukce fungující na principu páky. Odstavování doteku snímače od měřeného objektu zajišťuje pneumatický válec TESA o průměru 8 mm.

5.1.1 Tělo navrhovaného pákového snímače

Pro přesnější cívkovou jednotku byla vyvinuta konstrukce dle obrázku 11. Pohyblivé rameno (3), které nese jádro cívkové jednotky, je připevněno ke statické části těla snímače pomocí planžety (4). Požadovanou přitlačnou sílu bude možné regulovat tloušťkou (tuhostí) planžety a také závažím (5) druhém konci páčky. To má excentrický tvar, jenž zabrání jeho vyšroubování. Aby bylo možné považovat pohyb na konci páčky za přímočarý, je důležité omezit pohyb ramene na malou výchylku (zdvih snímače) dorazem (2).

Použitím ocele 11 523 jako materiálem na statickou část těla (1) bylo dosaženo potřebnou odolnost a tuhost celé konstrukce. Použitím uhlíkového vlákna na pohyblivé rameno došlo k redukci jeho hmotnosti. Komponenty z polotovarů byly vytvářeny drátořezem (Wire EDM). Prvky těla bylo pak nutné zkompletovat dle vyhotoveného montážního výkresu. Výkresová dokumentace dílů těla jednotky snímače, včetně montážního výkresu, se nachází v přílohách na přiloženém nosiči pod čísly 1 až 12.

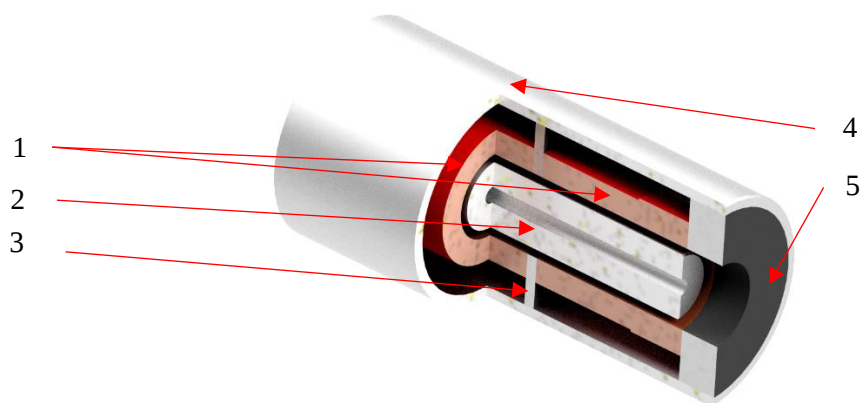


1 – statická část těla, 2- doraz, 3 – páčka, 4 – planžeta, 5 – závaží

Obr. 11) Tělo navrhovaného páčkového snímače

5.1.2 Cívková jednotka snímače

Jedním z požadavků na navrhovaný snímač je jeho rozlišení, které má dosahovat hodnot o řád vyšší než standardní snímače. Toho lze dosáhnout použitím vhodných materiálů na plášť a jádro snímače, a zvýšením počtu závitů cívky. Jedním z materiálů, které se vyznačují vysokou permeabilitou, a jsou tedy pro tyto účely vhodné, je permalloy. Jedná se o magneticky měkkou slitinu niklu a železa obsahující 75-80 % niklu. Tato slitina bude díky svým vlastnostem použita na jádro jednotky a také na její plášť (ten vznikne skružením plechu tloušťky 0,25 mm). Limitní průměr pláště je 10 mm. Permalloyové jádro o průměru 3,1 mm bude použito z konstrukčně podobných cívkových jednotek firmy MESING spol. s r. o.



1 – cívky, 2 – jádro, 3 – středící podložka, 4 – plášť, 5 – víko

Obr. 12) Model cívkové jednotky páčkového snímače

Ve spolupráci s výše uvedenou společností bylo experimentálně zjištěno, že 1190 závitů u obou cívek je z důvodu lineární charakteristiky nejvhodnějším řešením pro tuto konkrétní aplikaci. U malých přístrojů jako jsou snímače je veliký důraz kladen na co nejmenší rozměr všech součástí. Použitím samonosných cívek dojde k redukci prostoru, který by jinak zabírala kostra cívky. Samonosné cívky se vyrábí pomocí vodiče opatřeného slabou vrstvou

termoplastu, která je při navíjení zahřívána horkým vzduchem. Během toho dojde k roztavení plastu a slepení jednotlivých závitů dohromady. Po vychladnutí vytvoří cívka tuhý prvek.

Posledními komponenty cívkové jednotky jsou plastové zátky z obou stran pláště a plastová středící podložka mezi cívkou. Dalším krokem je slepení všech dílů dohromady dle obrázku. Výkresová dokumentace týkající se cívkové jednotky se nachází v přílohách pod čísly 13-18

5.2 Montáž snímače a uvedení do provozu

Po vyhotovení všech součástí byl snímač dle montážního schématu (příloha 19) složen dohromady a uveden do provozu. Smontování spočívá ve vložení cívkové jednotky do těla snímače a našroubování pneumatického válce TESA. Na obrázku 7 vidíme smontovaný snímač připevněný ke stojanu a připravený na testovací měření. Celé tělo je opatřeno krytem z uhlíkového vlákna a ve spodní části lze vidět páčku s dotekem. Měřicí zařízení uvedeme do provozu připojením k standardní řídicí jednotce pro indukčnostní snímače pomocí konektoru cívkové jednotky. Montážní schéma viz příloha 19.

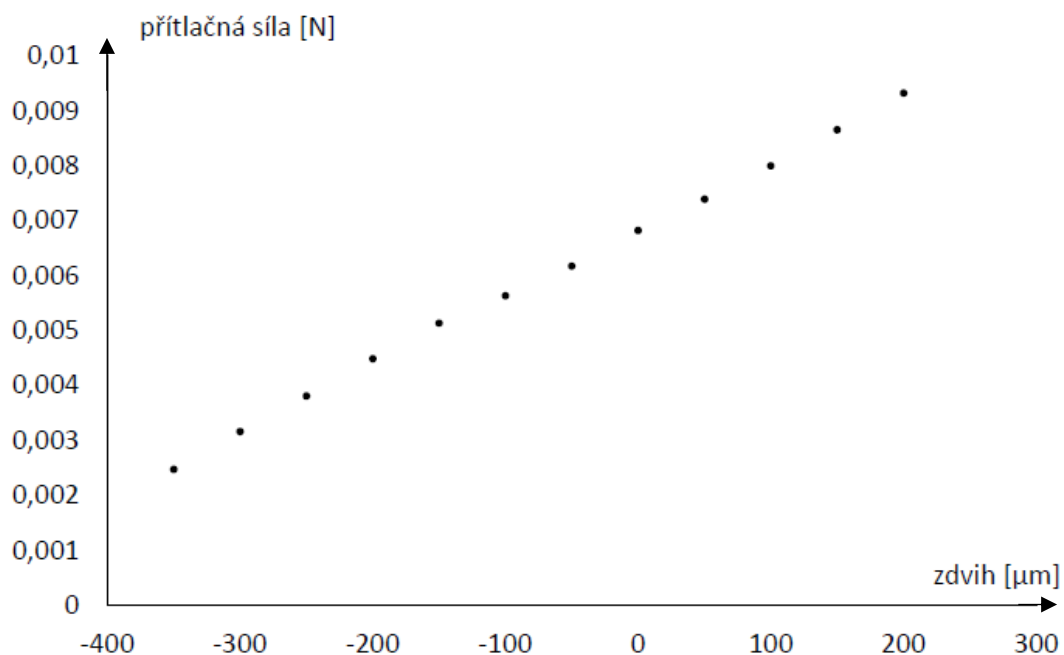


Obr. 13) Snímač s malou přítlačnou silou

5.3 Zhodnocení metrologických vlastností snímače

Jednou z vlastností snímače, která se ověřovala experimentálně, byla přítlačná síla v závislosti na zdvihu snímače při pracovním rozsahu od -350 do +200 μm (obr. 14). Přítlačná síla se měřila pomocí sestavy s mikrováhou (2) znázorněné na obrázku 15.

Při experimentu docházelo k měření síly snímače působící na váhu v několika bodech pracovního rozsahu. Výsledkem je graf na obrázku 14. Ten ukazuje, že měřicí síla 0,01 N nebyla v celém rozsahu překročena a zároveň ukazuje lineární průběh závislosti. Hmotnost zobrazená na mikrováze byla převáděna na sílu pomocí vzorce pro výpočet tíhové síly v gravitačním poli Země.



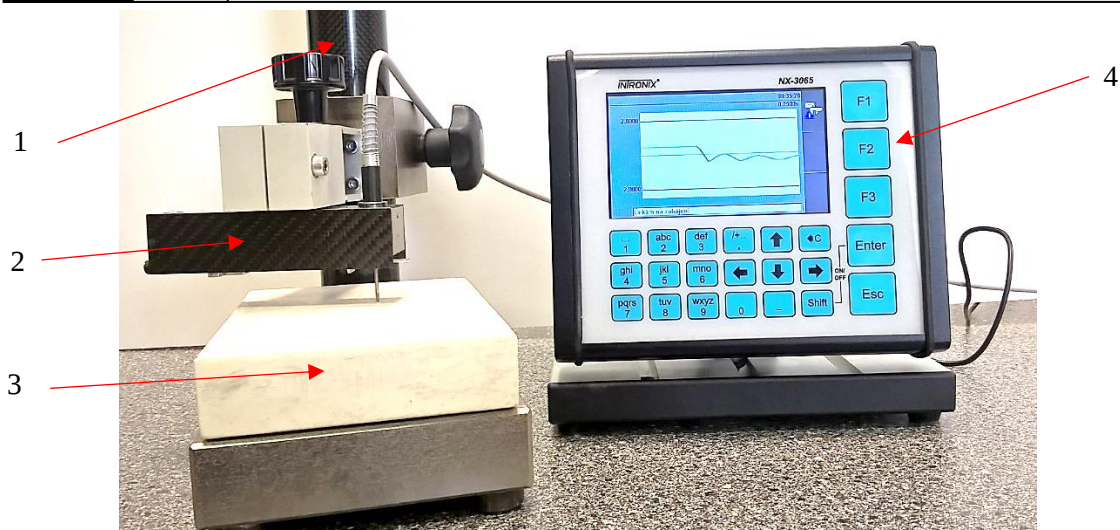
Obr. 14) Graf závislosti přítlačné síly na zdvihu



1 – stojan, 2 – mikrováha, 3 – snímač

Obr. 15) Sestava pro měření přítlačné síly

Dalším testovaným parametrem byla doba dokmitu snímače, tj. času t potřebného k ustálení kmitání doteku na přijatelnou úroveň. Doba dokmitu byla testována pomocí sestavy na obrázku 16. Snímač (2) byl upevněn do stojanu (1) a pod snímač byla umístěna kamenná deska (3), která má schopnost minimálně absorbovat nárazy. Snímač byl připojen k řídicí jednotce (4), jenž je schopná zaznamenávat a znázorňovat velikost výchylky snímače v řádech ms.

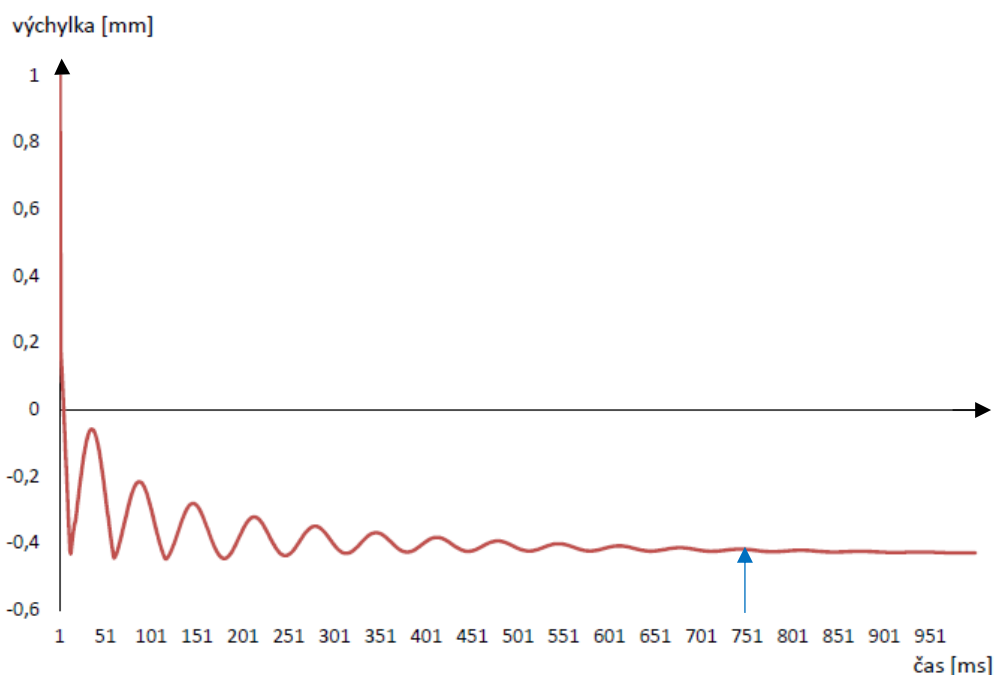


1 – stojan, 2 – snímač, 3 – kamenná deska, 4 – řídicí jednotka

Obr. 16) Sestava pro měření dokmitu snímače

Po připojení k počítači byl dotek vychýlen do maximální výšky rozsahu a poté volným pádem spuštěn na desku. Displej počítače znázornil amplitudu kmitání, která se za nějaký čas ustálila na přijatelnou „klidovou“ hodnotu.

Na obrázku 17 je znázorněn graf výchylky, přičemž modře je vyznačená oblast přijatelného útlumu kmitání. Vidíme, že doba dokmitu po spuštění doteku snímače na měřený objekt je přibližně $t = 0,750$ s.



Obr. 17) Graf dokmitu snímače s malou přitlačnou silou

5.4 Doporučení pro praxi

Navrhovaný indukčnostní snímač s malou přitlačnou silou je vhodným řešením pro atypické měření povrchově citlivých, nebo měkkých součástek, kde by hrozilo poškození způsobené samotným dotekem při větší přitlačné síle. Zároveň půjde o objekty, u kterých potřebujeme znát opravdu malé rozměry. Příkladem využití právě tohoto snímače můžou být poloautomatické a automatické měřicí stanice pro kontrolu přípravků pro optické výrobky (forem na kontaktní čočky), nebo elektrotechnických součástek (waferů). Dalším možným uplatněním snímače je při měření rozměrů napařené vrstvy kovů, laků apod.

6 SNÍMAČ PRO OPERATIVNÍ KONTROLU

Kromě samozřejmé kontroly snímače výrobcem před expedicí je nutná i pravidelná kontrola po určité době používání, stejně tak po jakékoli poruše snímače nebo havárii měřicího zařízení. Interval pravidelné kontroly je obvykle jeden rok. Snímače jsou ručně testovány v laboratoři provozovatele, nebo častěji v externí akreditované laboratoři. V druhém případě musí provozovatel řešit logistické a organizační problémy způsobené absencí snímače někdy i několik týdnů. To způsobuje finanční ztráty. Navrhovaným řešením, jak tyto ztráty minimalizovat, je vyvinout velice přesný, avšak jednoduchý snímač přímo do provozních podmínek (provozních měřících středisek, podnikových laboratoří ...). Stačí komparační metodou kontrolovat opakovatelnost, rozlišení a linearitu. To je pro kontrolu běžného snímače dostatečné a zároveň nejsou kladeny velké nároky na kontrolní snímač.

6.1 Analýza modelu

Navrhovaným řešením je komparační kontrola rozlišení a nelinearity, která by se prováděla pomocí inkrementálního snímače s jednotkou s velmi malou nelinearitou. Běžná komparační měřidla dosud používají systémy s rozlišením 0,1 μm . To však pro nově vyvíjené snímače nestačí, zde je třeba pracovat s rozlišením několik nm. Použít běžné indukčnostní snímače není možné z důvodu jejich nelinearity. Bylo třeba navrhnout odměřovací systém s nanometrickým rozlišením za přijatelnou cenu. Navržený prototyp kombinuje tělo indukčnostního snímače s kuličkovým vedením a optický snímač polohy s 2,5 nm rozlišením.

Použitím optického snímacího zařízení VIONiCplus jsme získali jednotku se schopností pracovat s rozlišením až 2,5 nm a s chybou linearity, kterou je možné v konečné fázi korigovat matematicky. Bylo třeba navrhnout nenáročný přístroj, kterým je možné konvenční snímače kontrolovat. Úkolem bylo navrhnout tělo prototypu snímače, ve kterém jsou umístěny všechny prvky optického snímače a zároveň je možné seřizovat polohu všech těchto prvků. Důležité také bylo zajistit přenos měřené veličiny na pohyb pravítka vůči měřící hlavici. O ten se postarala část indukčnostního snímače s předepnutým kuličkovým vedením. [21]

6.1.1 VIONiCplus

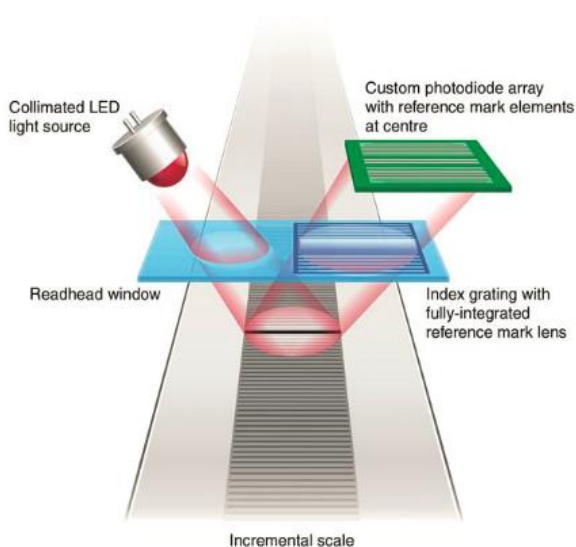
Optický snímač polohy VIONiCplus (obr. 18) od firmy Renishaw je měřící zařízení s rozlišením 2,5 nm. Jde o optoelektronickou součástku malých rozměrů. Aby plnila svou funkci, musí se nacházet v přesně specifikované vzdálenosti od stupnice, kterou představuje nerezové pravítko (obr. 20). Na něm se v daných intervalech střídá odrazná a neodrazná vrstva. S využitím optických vlastností světla zaznamenáváme změnu polohy čtecí hlavičky (enkodéru) vůči pravítku. [21]



Obr. 18) Enkodér VIONiCplus [22]

Čtecí hlava je pomocí optického signálu schopna převést jednotlivé dílky stupnice na analogový signál 1 V pp (špička-špička) a následně pomocí interpolace dosáhnout rozlišení 2,5 nm. [21]

Enkodér je vybaven LED diodou jako zdrojem záření a filtrační optikou (obr. 19), která dokáže eliminovat nečistoty a výrobní nepřesnosti stupnice. Odražený paprsek prochází přes filtrační mřížku na pole detektorů, které převádí optický signál na analogový elektrický 1 V pp. Výstupem enkodéru jsou dva digitální signály A a B fázově posunuté o 90°. Díky tomuto fázovému posunu dokáže elektronika uživatele vyhodnotit směr posuvu. [21]



Obr. 19) Schéma filtrační optiky a pravítka [23]

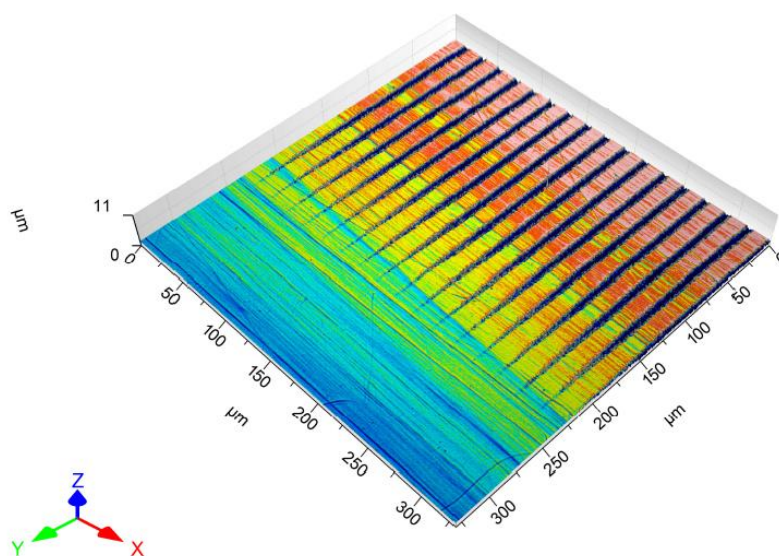
Na přesnost snímacího zařízení má zásadní vliv dodržení instalačních tolerancí, které jsou dány výkresovou dokumentací výrobce. [21]

6.1.2 Nerezové pravítko

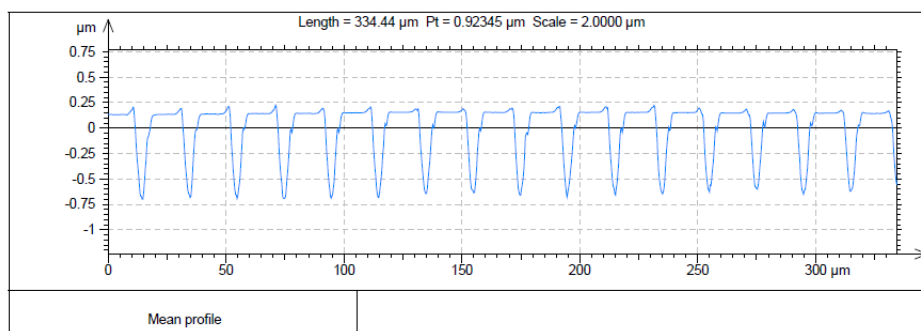
Odměřovací stupnice nebo také lineární kovové pravítko (obr. 14) je nezbytná součást snímacího zařízení. Jde o nerezový profil s povrchovou úpravou, která zaručuje vysokou odrazivost optického signálu. Zde jsou na jedné straně v pravidelných rozstupech pomocí laseru vytvořeny pruhy o šířce 20 μm , které tvoří neodrazné plochy. To lze vidět na obrázcích 21 a 22 získaných pomocí přístroje Taylor Hobson Talysurf CCI Lite. Na prvním z nich pozorujeme střídání odrazné a neodrazné plochy a na druhém šířku a rozestupy neodrazivých ploch. V případě navrhovaného modelu, kde se počítá se zdvihem 40 mm, bylo použito lineární pravítko o šířce 15 mm a délce 20 mm.



Obr. 20) Nerezové pravítko [24]



Obr. 21) Povrch pravítka



Obr. 22) Profil plochy pravítka

6.1.3 Renishaw Advanced Diagnostic Tool (ADT)

ADT je diagnostické zařízení skládající se z interfaceu (obr. 23) a softwaru vyvinutých firmou Renishaw. Jde o rozhraní, pomocí něhož jsme schopni připojit enkodér k počítači. Díky ADT

lze provádět kalibraci, diagnostiku těchto optických snímačů a testovací měření těchto optických snímačů.

Pokud konektor enkodéru připojíme na vstup interfaceu (obr. 17), který je USB kabelem propojen s počítačem. Jsme pomocí ADT schopni:

- zjistit úroveň odraženého signálu,
- monitorovat AGC, což je funkce vyrovnávání signálu
- a sledovat Lissajoux graf, zrychlení, polohu snímače, polohu referenční značky a další detaily snímače jako je rozlišení, teplota apod.

6.1.4 Dotek a kuličkové vedení

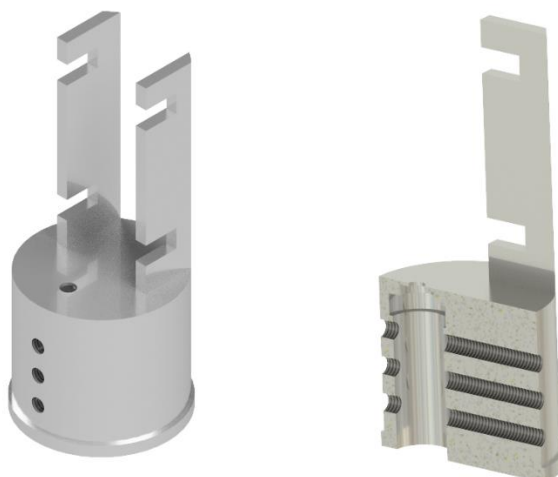
K přenosu pohybu doteku na pohyb pravítka vůči měřicí hlavici byla použita část těla standardního vysokozdvížného indukčního snímače (popsáno v kapitole 4.1.2) o průměru 8 mm s předepnutým kuličkovým vedením švýcarského výrobce Peter Hirt. Ze snímače byla využita spodní část pláště s dotekem. Byly vyjmuty obě cívky a horní část pláště, která je chrání, byla odstraněna. Feromagnetické jádro ztratilo svou původní funkci a stalo se pouze nosičem odměřovacího pravítka a přenašečem pohybu od měřeného objektu k optické měřicí hlavici (obr. 25). Díky konstrukci indukčního snímače s kuličkovým vedením, která je vybavena systémem proti protáčení měřicího trnu, jsme navíc získali způsob, jak omezit naklápění pravítka vůči enkodéru. Výsledkem tedy je enkodér staticky upevněný v těle modelu a pohyblivé pravítko umístěné na vodícím trnu, respektive na feromagnetickém jádru.

6.1.5 Tělo navrhovaného snímače

Aby bylo možné uvést model snímače do provozu, bylo nutné vytvořit konstrukci, do které se umístí všechny výše uvedené prvky. Proto bylo ve spolupráci s firmou MESING navrženo kruhové duralové tělo, jehož model je na obrázku 24. Dva ploché rovnoběžné výstupky jsou určeny pro instalaci enkodéru a do dolní části je uchyceno vedení snímače Peter Hirt. Důležitým faktorem při vývoji konstrukce byla podmínka přesně daných vzdáleností a tolerancí enkodéru vůči pravítku předepsaných výrobcem. Výkresová dokumentace týkající se návrhu těla prototypu snímače a instalačních tolerancí enkodéru [9] se nachází v přílohách 20 a 21.



Obr. 23) ADT interface [25]

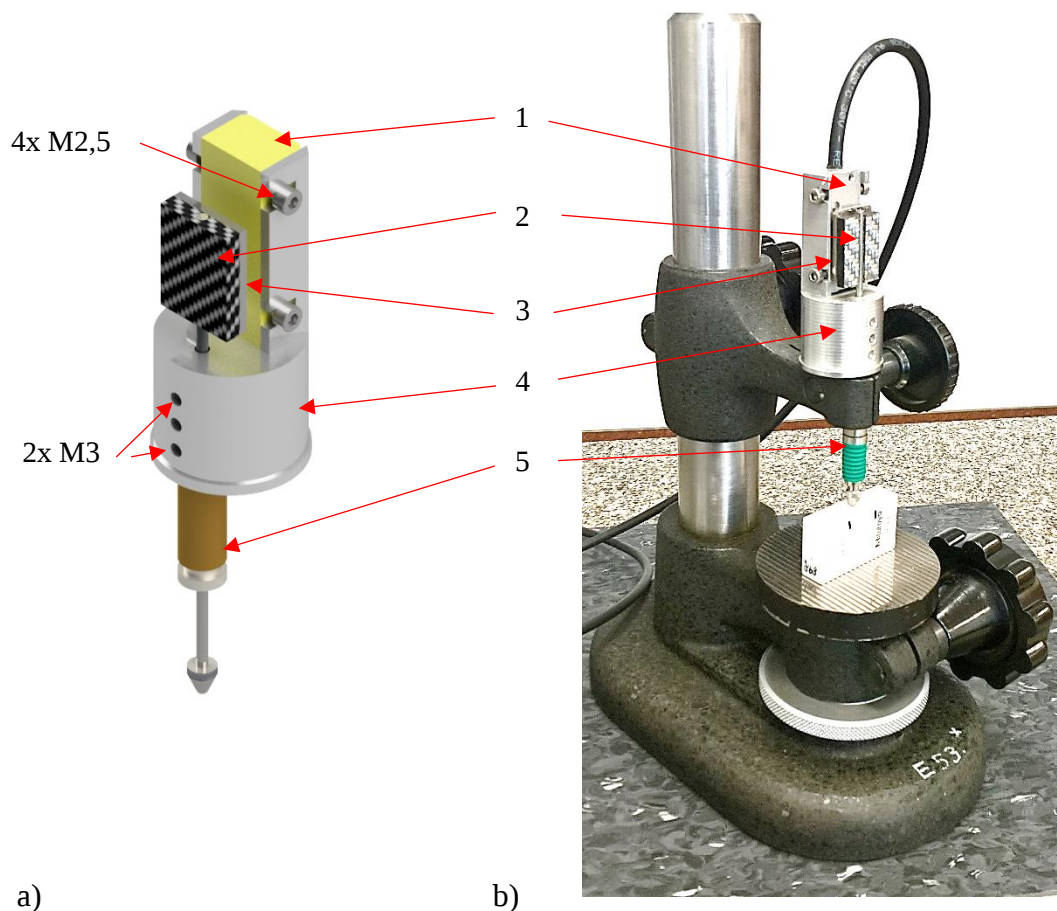


Obr. 24) Tělo navrhovaného modelu a jeho řez

6.2 Montáž snímače a uvedení do provozu

Do navrženého skeletu (4) na obrázku 25 bylo dvěma šrouby M3 upevněno tělo indukčnostního snímače s kuličkovým vedením (5). Mezi dva ploché výstupky se pomocí čtyř stavěcích šroubů M2,5 umístil enkodér VIONiCplus (1). Díky vyfrézovaným drážkám pro šrouby je možné regulovat vzdálenost snímací hlavice od pravítka (3). Na pohyblivé jádro jednotky indukčnostního snímače se epoxidovým lepidlem přilepila destička z uhlíkového vlákna (2). Kompozitní materiál byl vybrán z důvodu své nízké hmotnosti. Na destičku bylo upevněno nerezové pravítko oboustrannou lepicí páskou, která se pro tyto účely běžně používá. Před nalepením nerezového pravítka na karbonový podklad je nutné obě plochy důkladně očistit a odmastit lihem. Model prototypu je znázorněn na obrázku 25.

Zprovoznění prototypu probíhá v několika krocích. Nejprve se ujistíme, že snímací plocha enkodéru i pravítko jsou čisté. Následně snímač připojíme k počítači pomocí ADT. Po tomto kroku se dioda na enkodéru rozsvítí červeně, nebo oranžově. Dále je třeba vymezit vůli mezi enkodérem a pravítkem, k čemuž slouží plastová pomůcka, jejíž tloušťka odpovídá předepsanému rozměru vůle. Ta se vloží mezi snímací hlavici a pravítko, dojde k doražení enkodéru k vymezovacímu přípravku přes plastový přípravek a hlavici zajistíme dotažením stavěcích šroubů. Na obrazovce počítače, nebo pouze pomocí světelných signálů diody enkodéru, pak sledujeme, zda má optický signál požadovanou sílu. Po vyjmutí přípravku zkontrolujeme, že síla signálu zůstala nezměněná a můžeme pokračovat dalším krokem, kterým je kalibrace snímače.



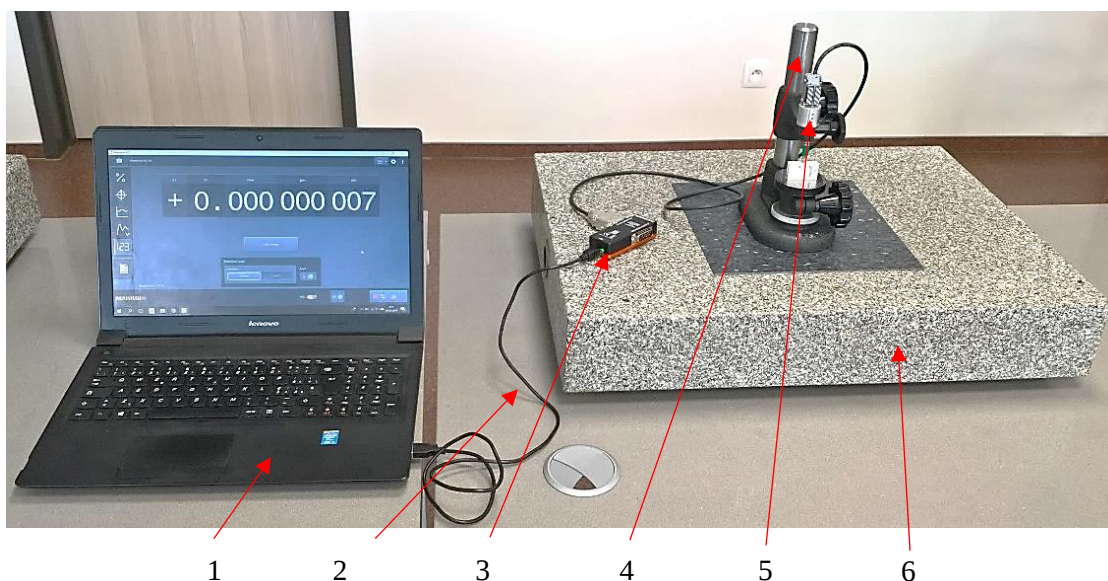
1 – enkodér VIONiCplus, 2 – karbonová destička, 3 – odměřovací pravítko, 4 – duralové tělo, 5 – vedení indukčního snímače

Obr. 25) a) 3D model snímače
b) Fotografie sestaveného snímače

Kalibraci optického zařízení můžeme provádět, pokud síla signálu dosahuje alespoň 70 %. V tom případě bude dioda blikat modře. Pak enkodérem pomalu přejedeme po celé délce pravítka, přičemž dioda začne dvojité modře blikat. Dalším krokem kalibrace je pomalé přejetí referenční značky na pravítku z obou stran. To z toho důvodu, aby snímač obdržel informaci o nulové hodnotě měření. Tím referenční značku zkalibrujeme, dioda na snímací hlavici přestane blikat a přístroj je připravený k měření.

6.3 Zhodnocení metrologických vlastností snímače

U sestaveného prototypu byla za podmínek opakovatelnosti experimentálně vyhodnocována série měření koncové měrky 20 mm. Sestavu vidíme na obrázku 26. Prototyp (5) byl upnut do stojanu (4) a usazen na kamennou desku (6) v laboratoři. Po připojení přes ADT interface (3) USB kabelem (2) k počítači (1) proběhlo samotné měření. Jelikož jde o inkrementální snímač, fungoval v tomto případě na podobném principu jako úchylkoměr. Na obrazovce počítače uvidíme výchylku od nulové hodnoty, kterou je keramická koncová měrka o délce $20,0000 \pm 0,0001$ mm.



1 – počítač, 2 – USB kabel, 3- ADT interface, 4 – stojan, 5 – snímač, 6 – kamenná deska

Obr. 26) Měřicí sestava

V tabulce 1 vidíme hodnoty série dvaceti měření stejného místa jedné koncové měřky.

č. m.	1	2	3	4	5
d [mm]	20,000 000	20,000 003	20,000 000	20,000 005	20,000 005
č. m.	6	7	8	9	10
d [mm]	20,000 005	20,000 005	20,000 003	20,000 003	20,000 000
č. m.	11	12	13	14	15
d [mm]	20,000 003	20,000 002	20,000 000	20,000 003	20,000 000
č. m.	16	17	18	19	20
d [mm]	20,000 000	20,000 005	20,000 003	20,000 003	20,000 003

Tab. 1) Rozměry naměřené prototypem

Podle rovnice 7 vypočítáme aritmetický průměr $\bar{x}$:

$$\bar{x} = 20,000\,00255\text{ mm.}$$

Systematickou chybu Δ podle rovnice 8:

$$\Delta = 2,55e^{-6}\text{ mm.}$$

A nakonec vyhodnotíme náhodnou chybu pomocí rozptylu R (rovnice 9) a variačního koeficientu V (rovnice 10):

$$R = 5\text{ nm,}$$

$$V = 9,417e^{-6}\%$$

6.4 Doporučení pro praxi

Navrhované řešení splnilo požadavky na rozlišení v řádu nanometrů, a také se povedlo navrhnout prototyp, který se na českém trhu běžně nevyskytuje. Po dokončení vývoje prototypu by bylo možné využívat model jako snímač pro operativní kontrolu a ověřování snímačů s nižším rozlišením. Dalším možným uplatněním je například cejchování úchylkoměrů, kalibrace délkových etalonů (kalibry, koncové měrky, kostky apod.). Je třeba dodat, že z důvodu vysokého rozlišení je při měření nutné dodržovat přísné laboratorní podmínky.

7 ZÁVĚR

Předložená bakalářská práce je příspěvkem ke speciálním indukčnostním snímačům a perspektivním optickým snímačům s rozlišením řádově v nanometrech. Všechny zadané cíle práce byly splněny takto:

Ve třetí kapitole byla provedena rešerše z dostupných zdrojů v oblasti strojírenské metrologie a měření délky s přihlédnutím k historickému vývoji uvedené problematiky. V této kapitole byly také popsány metodiky pro hodnocení přesnosti měření v praxi založené na nejistotovém a chybovém přístup.

Další kapitola analyzuje současný stav zvolených druhů snímačů délky. Vybrány byly kontaktní indukčnostní snímače využívané například v automobilovém průmyslu a optické snímače, které představují budoucnost bezkontaktního měření. Zde byly detailně popsány typy konstrukcí jednotlivých snímačů, princip funkce a využití v praxi.

V páté kapitole je zpracován návrh páčkového indukčnostního snímače s malou přitlačnou silou. Návrh řešení konstrukce byl realizován ve spolupráci s firmou MESING, spol. s r. o. a poté podroben testovacímu měření. První experiment ověřil splnění limitní přitlačné síly 0,01 N v celém rozsahu zdvihu snímače. Dalším experimentem byl zjištěn čas potřebný k ustálení snímače před začátkem měření. Výsledkem je hodnota čas ustálení $t = 0,750$ s. Tento snímač by se v praxi mohl využívat při měření součástek s měkkým nebo citlivým povrchem, například kontaktních čoček v optice, waferů v elektrotechnice apod.

Šestá kapitola popisuje návrh snímače pro operativní kontrolu, ověřování a kalibraci délkových měřidel, používající optickou jednotku s rozlišením 2,5 nanometrů. Prototyp byl ve spolupráci s výše uvedenou firmou vyroben a odzkoušen. Měřením byla potvrzena funkčnost navrženého prototypu a rozlišení v řádu nanometrů. Také byla dle zadání vyhodnocena systematická a náhodná chyba měření. Tento snímač by po dokončení vývoje mohl být řešením pro přesnější ověřování a kalibraci úchylkoměrů, koncových měrek, kalibrů apod. Je důležité poznamenat, že z důvodu vysokého rozlišení snímače je nutné dodržovat přísné laboratorní podmínky při měření.

Je možné považovat za vhodné pokračovat v započaté práci na vývoji nových typů snímačů a řešit například následující úkoly:

1. Návrh a ověření konstrukce snímačů s optickou jednotkou pro konkrétní aplikace.
2. Zařazení jednotky vakuového odstavování do konstrukce snímače.
3. Navržení jiného způsobu vedení pravítka uvnitř snímače s optickou jednotkou.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ZEHNULA, Karel. *Snímače neelektrických veličin*. 2., uprav. a dopl. vyd. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1983. Automatizace a regulace.
- [2] KŮR, Jan a CHAMRÁD, Michal. Délkové indukčnostní snímače pro kontrolu ve zdravotnictví. *Technický týdeník* [online]. 2014, 1. 8. 2014, (2), 1 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv-medicinska-technika/delkove-indukcnostni-snimace-pro-kontrolu-ve-zdravotnictvi_25959.html
- [3] KOKTAVÝ, Bohumil a KOKTAVÝ, Pavel. *Fyzika II: Elektřina a magnetismus*. Brno: FAST VUT v Brně, 2006.
- [4] KŮR, Jan a CHAMRÁD, Michal. Indukční délkové snímače tvoří základ novodobé provozní měřicí techniky pro automobilovou výrobu. *TechMagazín* [online]. 2002, **2002**(5), 2 [cit. 2018-03-27]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/571>
- [5] Indukční snímače slaví 50 let od svého vzniku. AUTOMA [online]. 2008, 2008(8-9), 2 [cit. 2017-11-21]. Dostupné z: http://automa.cz/cz/casopis-clanky/indukcni-snimace-slavi-50-let-od-sveho-vzniku-2008_08_37779_5346/
- [6] PERNIKÁŘ, Jiří a TYKAL, Miroslav. *Strojírenská metrologie II*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN isbn80-214-3338-8.
- [7] KŮR, Jan. V kontrole autodílů převládají kontaktní měřicí metody. *AutomobilIndustry* [online]. 2014, **2014**(2), 3 [cit. 2017-11-14]. Dostupné z: <http://infocube.cz/cs/v-kontrola-autodilu-prevladaji-kontaktne-merici-metody/>
- [8] ČECH, Jaroslav, PERNIKÁŘ, Jiří a PODANÝ, Kamil. *Strojírenská metrologie*. Vyd. 4., přeprac., V Akademickém nakl. CERM 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN isbn80-214-3070-2.
- [9] *Installation guide M-6195-9232-01-D* [online]. Wotton-under-Edge, United Kingdom: Renishaw, 2017 [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/vionic-downloads--38977>
- [10] TNI 01 0115 (010115): Mezinárodní metrologický slovník – Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny (VIM). Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [11] ČSN ISO 11462-2 (010275): Směrnice pro uplatňování statistické regulace procesu (SPC) - Část 2: Katalog nástrojů a postupů. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [12] PERNIKÁŘ, Jiří a POSPÍŠIL, Miroslav. Vyjadřování přesnosti měření ve strojírenské praxi. *Metrologie* [online]. 2015, **2015**(4), 5 [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <http://www.unmz.cz/files/metrologie/casopis/Metrologie%204-15%20-%20small%20-%20WWW.pdf>
- [13] Peter Hirt Inductive Sensor. In: *MEITEC MESS- & REGELTECHNIK* [online]. [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <https://meitec-gaging.com/distribution-products/peter-hirt-products/>
- [14] NAMUR Inductive Sensors. In: *RS Components* [online]. [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <https://cz.rs-online.com/web/p/indukcni-bezdotykove-snimace/7638312>
- [15] VYLEGALA, Pavel. *ROBOTI: Senzory a snímače* [online]. 2013. Ostrava: SŠE Ostrava [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: http://www.sse-najizdarne.cz/projekty/roboti/dokumenty/v_prez_ss_1.pdf

- [16] Optický snímač absolutní vzdálenosti / pohybu = CEDES APS. In: *Automatizace.hw.cz* [online]. [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/bezpecnost-stroju-komponenty-mereni-a-regulace/opticky-snimac-absolutni-vzdalenosti-pohybu-cedes-aps.html>
- [17] Optické metody měření 3D objektů. *Elektrorevue* [online]. 2005, **2005**(23) [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05023/index.html>
- [18] *Electronic Length Measuring Equipment* [online]. TESA [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: http://www.merici-pristroje.cz/files/ckeditor/5_Produkty/5-31_tesa/3-komunalni_meridla/294_%C3%BAheln%C3%ADky%2C%C3%BAhlom%C4%9Bry.pdf
- [19] *Doteky a příslušenství* [online]. Renishaw [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/typy-doteku--6627>
- [20] SEDLÁČEK, Vladimír. *Neželezné kovy a slitiny*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1979. Řada hutnické literatury.
- [21] Operating Principles of Renishaw optical encoders: Incremental. UK. Renishaw, 2011.
- [22] *VIONiC series encoder system: Data sheet L-9517-9678-02-E* [online]. Renishaw, 2017 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/vionic-downloads--38977>
- [23] Jak fungují optické snímače. In: *Renishaw* [online]. Renishaw [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/jak-funguji-opticke-snimace--36979>
- [24] *RELM high accuracy linear scale: Data sheet L-9517-9219-05-C* [online]. Renishaw, 2017 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/vionic-downloads--38977>
- [25] *Advanced Diagnostic Tool (ADT) – A-6195-0100: Data sheet L-9517-9699-01-B* [online]. Renishaw, 2017 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/vionic-downloads--38977>
- [26] JANKOVÝCH, Róbert. Přednášky z předmětu: Průmyslová metrologie (DPM). Vysoké učení technické v Brně, 2017.

9 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

9.1 Seznam tabulek

TAB. 1) ROZMĚRY NAMĚŘENÉ PROTOTYPEM	45
---	----

9.2 Seznam obrázků

OBR. 1) SCHÉMA MĚŘÍCIHO ŘETĚZCE [8]	21
OBR. 2) SCHÉMA CHYBOVÉHO PŘÍSTUPU – UPRAVENO [12] [26]	25
OBR. 3) A) KONTAKTNÍ INDUKČNOSTNÍ SNÍMAČ PETER HIRT [13] B) BEZKONTAKTNÍ INDUKČNÍ SNÍMAČ BAUMER [14]	27
OBR. 4) INDUKČNOSTNÍ SNÍMAČ S MALOU VZDUCH. MEZEROU [3]	28
OBR. 5) INDUKČNOSTNÍ SNÍMAČ S OTEVŘENÝM MAGNETICKÝM OBVODEM [1]	29
OBR. 6) DIFERENCIÁLNÍ USPOŘÁDÁNÍ SNÍMAČE S OTEVŘENÝM MAGNETICKÝM OBVODEM [1]	29
OBR. 7) TUŽKOVÝ SNÍMAČ TESA [18]	30
OBR. 8) SCHÉMA OPTICKÉHO SNÍMAČE [15]	31
OBR. 9) ABSOLUTNÍ OPTICKÝ SNÍMAČ S KÓDOVÝM PRAVÍTKEM [16]	32
OBR. 10) LASEROVÝ INTERFEROMETR [17]	32
OBR. 11) TĚLO NAVRHOVANÉHO PÁČKOVÉHO SNÍMAČE	34
OBR. 12) MODEL CÍVKOVÉ JEDNOTKY PÁČKOVÉHO SNÍMAČE	34
OBR. 13) SNÍMAČ S MALOU PŘÍTLAČNOU SILOU	35
OBR. 14) GRAF ZÁVISLOSTI PŘÍTLAČNÉ SÍLY NA ZDVIHU	36
OBR. 15) SESTAVA PRO MĚŘENÍ PŘÍTLAČNÉ SÍLY	36
OBR. 16) SESTAVA PRO MĚŘENÍ DOKMITU SNÍMAČE	37
OBR. 17) GRAF DOKMITU SNÍMAČE S MALOU PŘÍTLAČNOU SILOU	37
OBR. 18) ENKODÉR VIONICPLUS [22]	39
OBR. 19) SCHÉMA FILTRAČNÍ OPTIKY A PRAVÍTKA [23]	40
OBR. 20) NEREZOVÉ PRAVÍTKO [24]	41
OBR. 21) POVRCH PRAVÍTKA	41
OBR. 22) PROFIL PLOCHY PRAVÍTKA	41
OBR. 23) ADT INTERFACE [25]	42
OBR. 24) TĚLO NAVRHOVANÉHO MODELU A JEHO ŘEZ	43

OBR. 25)A) 3D MODEL SNÍMAČE	B) FOTOGRAFIE SESTAVENÉHO SNÍMAČE.....	44
OBR. 26)MĚŘÍCÍ SESTAVA.....		45

9.3 Seznam použitých zkratk a symbolů

ACG	Automatic Gain Control
ADT	Advanced Diagnostic Tool
C	cívka
d	vzdálenost
I	elektrický proud
k_s	koeficient studentova rozdělení
k_u	koeficient rozšíření
l	délka
L	indukčnost cívky
mm	milimetr
MO	magnetický obvod
nm	nanometr
μm	mikrometr
n	počet měření
N	newton
r	poloměr
R	rozptyl
s	sekunda
s_x	směrodatná odchylka
$s_{\bar{x}}$	výběrová směrodatná odchylka
t	čas
U	standardní rozšířená nejistota
u_A	nejistota typu A
u_B	nejistota typu B
u_{AK}	nejistota typu A při počtu měření $n < 10$
u_{BZj}	nejistota typu B každého zdroje nejistoty
u_c	kombinovaná standardní nejistota
V	variační koeficient
x	poloha
$\bar{x}$	aritmetický průměr
x_i	naměřená hodnota

X_R	referenční hodnota
Z_i	zdroj nejistoty typu B
Δ	systematická chyba

10 SEZNAM PŘÍLOH

CD s výkresovou dokumentací