



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A
ROBOTIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND
ROBOTICS

NÁVRH NESTANDARDNÍCH INDUKČNOSTNÍCH A INKREMENTÁLNÍCH MĚŘÍCÍCH SNÍMAČŮ

DESIGN OF NON-STANDARD INDUCTIVE AND INCREMENTAL MEASURING SENSORS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. MARTIN WEIGL

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

DOC. ING. JIŘÍ PERNIKÁŘ, CSC.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Akademický rok: 2012/13

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Martin Weigl

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Metrologie a řízení jakosti (3911T032)**

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 diplomové práce:

Návrh nestandardních indukčních a inkrementálních měřicích snímačů

v anglickém jazyce:

Design of non-standard inductive and incremental measuring sensors

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Měřicí snímače představují základní článek měřicího systému, který má zásadní vliv na přesnosti celého měřidla. Stále vyšší požadavky na rozlišení, linearitu, opakovatelnost a další metrologické parametry vyžadují použití nestandardní typy měřicích snímačů, které musí splňovat vysoké požadavky.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je navrhnout měřicí snímače, které budou splňovat předem stanovené požadavky.

Seznam odborné literatury:

1. PERNIKÁŘ,J.-TYKAL,M.-VAČKÁŘ,J.: Jakost a metrologie, část metrologie. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. 2001 151s. ISBN 80 – 214 – 1997 – 0.
 2. ČECH,J.-PERNIKÁŘ,J.-JANIČEK,L.: Strojírenská metrologie.1. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. 2001 188s. ISBN 80 – 214 – 2252 – 01
 3. ČSN 01 0115 Mezinárodní slovník základních termínů v metrologii
 4. PERNIKÁŘ,J: Hodnocení způsobilosti kontrolních prostředků, in Sborník přednášek z mezinárodní konference „Kvalita a GPS 2005“ FSI VUT Brno září 2005 ISBN80-214-3033-8
 5. Způsobilost kontrolních procesů, Svaz automobilového průmyslu (VDA), Česká společnost pro jakost Praha 2004 ISBN 80-02-01656-4
- PERNIKÁŘ, J., TYKAL, M., VAČKÁŘ, J. Strojírenská metrologie II: 1. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 180s. ISBN 80-214-3338-8.


Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jiří Pernikář, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/13.

V Brně, dne 27.11.2012




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


prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

Abstrakt

Tato diplomová práce obsahuje přehled metod snímání polohy a především se zabývá návrhem nestandardního indukčního a inkrementálního snímače. Specifikace snímačů vychází ze zadání společnosti MESING, pod jejíž záštitou je tato práce vyhotovena. Taktéž obsahuje ověření navržených snímačů a zkušební měření.

Klíčová slova

Indukční snímač, Inkrementální snímač, chyba linearity, návrh snímače, snímače polohy, metrologické pojmy.

Abstract

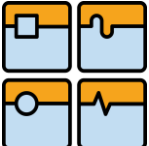
This diploma thesis consist of overview for position measuring methods and is mainly focused on design of non-standard inductive and incremental sensor. Specifications of those sensors is based on requirements set by MESING company. Also contains verification and testing measurement of completed sensor.

Key words

Inductive sensor, incremental sensor, linearity error, design of sensor, position sensor, metrological terminology.

Bibliografická citace

WEIGL, M. Návrh nestandardních indukčních a inkrementálních měřicích snímačů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 83 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Pernikář, CSc..

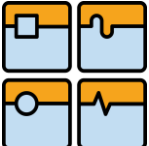
	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 7
DIPLOMOVÁ PRÁCE		

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto závěrečnou práci na zadané téma "Návrh nestandardních inkrementálních a indukčnostních snímačů" vypracoval samostatně. Práce byla zhotovena na základě poskytnutých informací zaměstnanci firmy MESING a INTRONIX, uvedených zdrojů a doporučené literatury. Při vypracování diplomové práce jsem respektoval ustanovení a předpisy pro diplomové práce. Jsem si vědom toho, že v případě jejich hrubého porušení nebude vedoucím tato práce akceptována.

V Brně dne 24.5.2013

.....
Bc. Martin Weigl

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 9
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

Poděkování

Rád bych tímto způsobem poděkoval všem, kteří mi ochotně poskytli informace k této nesnadné problematice. Jedná se především o pana doc. Ing. Jiřího Pernikáře, CSc., vedoucího této práce. Stejně tak děkuji za sdílení svých zkušeností panu Ing. Janu Kůrovi, který je jedním ze zakladatelů společnosti MESING a velký vizionář v oblasti indukčnostních snímačů. V neposlední řadě i Ing. Michalovi Chamrádovi z firmy MESING a Ing. Tomáši Růžičkovi ze společnosti INTRONIX.

Za podporu a pochopení pak děkuji rodině i všem svým blízkým.

Děkuji

OBSAH

Obsah	11
Úvod.....	13
1 Historie	14
1.1 Historie společnosti MESING.....	14
1.2 Historie měření vzdálenosti.....	15
1.3 Současný trend měření vzdálenosti ve strojírenství	16
2 Teorie snímačů délek	17
2.1 Rozdělení snímačů	17
2.2 Parametry snímačů	18
2.3 Principy funkce snímačů	20
2.3.1 Mechanické snímače (úchylkoměry).....	20
2.3.2 Potenciometrické snímače	20
2.3.3 Magnetostrikční snímače	21
2.3.4 Kapacitní snímače	23
2.3.5 Magneto-indukční snímače.....	25
2.3.6 Laserové snímače	25
2.3.7 Indukční snímače (s potlačeným magnetickým polem).....	26
2.3.8 Ultrazvukové snímače	28
2.3.9 Indukčnostní snímače (elektromagnetická indukce)	30
2.3.10 Inkrementální snímače.....	37
3 Konstrukce polomostových Indukčnostních snímačů	41
3.1 Popis konstrukce snímače s kuličkovým vedením	41
3.2 Popis konstrukce snímačů s planžetovým vedením.....	44
3.3 Konstrukce základních prvků snímače.....	45
3.4 Návrh a konstrukce nestandardních indukčních snímačů	48
3.5 Ověření navrženého indukčního snímače.....	53
3.6 Zkušební měření	61
4 Konstrukce optických inkrementálních snímačů	65
4.1 Popis konstrukce optického inkrementálního snímače	66
4.2 Konstrukce základních prvků inkrementálního snímače	67
4.3 Návrh a konstrukce nestandardního inkrementálního snímače MIS I	68
4.4 Ověření navrženého inkrementálního snímače.....	72
4.5 Navržení alternativní konstrukce inkrementálního snímače	73

5	Závěr	75
	Seznam použitých zdrojů	77
	Použitá literatura	77
	Použité obrázky	79
	Použité zkratky.....	81
	Seznam jednotek	81
	Seznam příloh	82



ÚVOD

S technologickým pokrokem se vyvíjí i podoba strojírenství. Strojní průmysl se již nezabývá pouze výrobou velkých strojů a mechanismů, jako tomu bylo dříve. Míra personalizace různých zařízení nebo nároky na prostor vedou k potřebě vyrábět stále menší součásti. Jsou kladeny vyšší nároky na kvalitu zpracování součástí, na cenu výroby i přesnost výroby. V době, kdy je trh zaměřen na zákazníka, nemůže si výrobce dovolit projevy "nekvality" svých výrobků, mezi které patří například: hluk, nepříjemné vibrace, nízká životnost, vysoká spotřeba, špatné lícování součástí atd. K těmto trendům se přidává i vysoká míra automatizace výroby všude tam, kde je to možné. Mezi tyto náročná odvětví patří například automobilní průmysl, hodinářský, výroba ložisek, ale i medicína a zbrojní průmysl. Jestliže chceme vyrábět takto přesné součásti musíme být schopni jejich parametry měřit. Ale nejde pouze o výrobu součástí. Kvalitu celku ovlivňují i součásti, které nám dodává třetí strana a u takových součástí mnohdy musíme provádět kontrolu, zda odpovídají smluvním parametrům. V minulosti proto vznikla spousta společností, které se zabývají nejen komplexní výrobou měřících zařízení, ale i pouze dílčími částmi měřících automatů. Mezi nejznámější patří jistě Renishaw, Hexagon Metrology, Mitutoyo, Mahr, TESA, Peter-Hirt, Micro-Epsilon, atd.

Českou společností zabývající se touto problematikou je MESING, spol s.r.o., která se zaměřuje na návrh a výrobu vlastní délkové techniky a měřících poloautomatických i automatických linek. Pod záštitou této společnosti je vypracována tato diplomová práce.

Cílem této práce bylo navrhnout a zkonstruovat nestandardní indukčnostní a inkrementální snímače v úzké spolupráci s firmou MESING. Snímače musí vyhovovat požadavkům stanoveným firmou MESING. Tyto požadavky jsou specifikovány v patřičných kapitolách [kap.3.4] pro indukčnostní a [kap.4.3] pro inkrementální snímač.





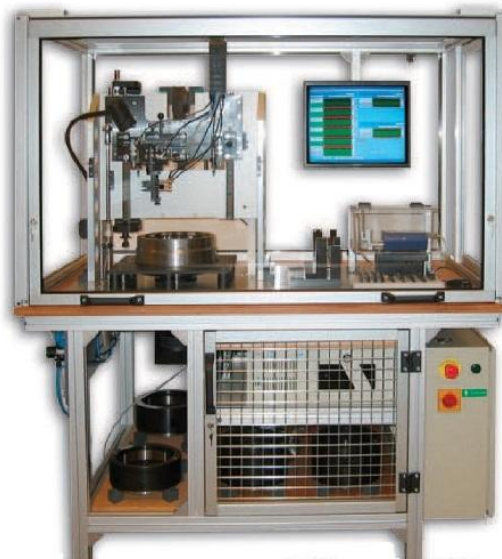
1 HISTORIE

1.1 Historie společnosti MESING

Značka MESING se na českém trhu objevila v polovině roku 1990. Výzkumný ústav společnosti ZVL, zabývající se výzkumem a vývojem měřicí techniky pro ložiskový průmysl, byl oddělen a převeden do státního podniku stejného jména - MESING. Další dělení vzniklého státního podniku podle jednotlivých činností v oblasti měřicí techniky a následná privatizace umožnila vznik finální podoby firmy MESING, spol. s r.o.

Z počátku se společnost zabývala výrobou a konstrukcí měřicích prostředků pro ložiskový průmysl. V minulosti celkový útlum ložiskového průmyslu v zemích RVHP (Rada vzájemné hospodářské pomoci) přinutil společnost zaměřit se na další obory a možnosti uplatnění. V současné době se stal hlavním zájmem společnosti návrh, konstrukce a výroba zakázkových stanic s různými stupni automatizace. Stanice jsou určeny především na třízení a kontrolu součástí. Jejich návrh probíhá dle požadavků a potřeb zákazníka. K realizaci využívá společnost především vlastních snímačů, ať už inkrementálních, indukčnostních, ale i laserových.

Více než polovina produkce společnosti se v současné době odehrává mimo území České republiky, na Slovensku, ve Švýcarsku, Turecku, Polsku, Anglii, Indii i Lichtenštejnsku.

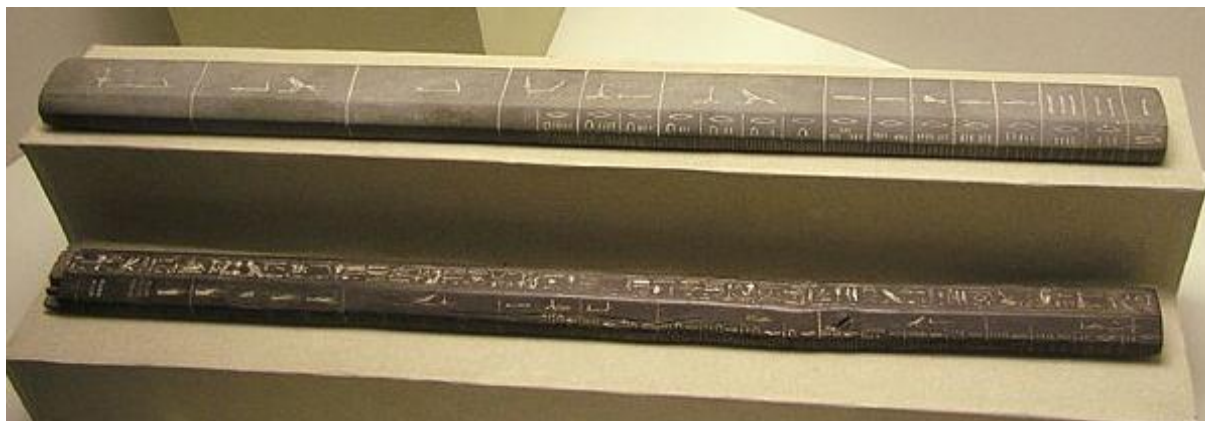


Obr.1.1 - Ukázka poloautomatického měřidla firmy MESING



1.2 Historie měření vzdálenosti

Měření vzdálenosti bylo první měření, kterému se lidstvo naučilo. Bez pochyb bylo první technikou porovnávání předmětů pro určení, zda jsou stejně velké a budou tudíž vykazovat stejné vlastnosti a funkčnost. Toto tvrzení se opírá především o anglosaské dělení vzdáleností na palce, stopy, lokty a míle. Následovalo vytvoření prvních měrek, ne však v pravém slova smyslu, jak jej vnímáme nyní. Jejich rozdělení na stejně velké části, označení atd. jsou pouze další logické kroky, které umožnily vzniknout prvnímu měřidlu na určování vzdálenosti. Za to se považuje Egyptská tyč, která určovala vzdálenost jednoho loktu, její stáří se datuje do třetího tisíciletí př.n.l. [Obr.2].



Obr.1.2 - Podoba nejstaršího měřidla

Za další milník se dá považovat zavedení metrické soustavy. Ta byla navržena poprvé ve Francii. Po zhruba osmdesáti pěti letech, v roce 1875 podepsalo 18 zemí tzv. Metrovou konvenci. Z původního archivního metru bylo zhotoveno několik kopií, tak aby měl každý členský stát konvence svůj etalon. Metrická soustava nabyla postupem času vysoké obliby a v současné chvíli existuje pouze několik málo států, které ji nepoužívají, mezi které patří například i Spojené Státy Americké.

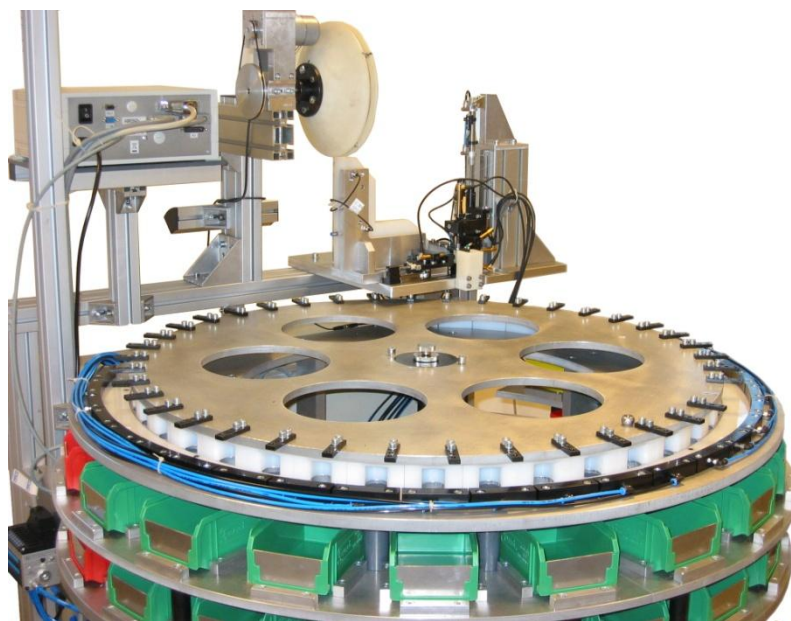
Přes skládací a svinovací metry, pásma, posuvná měřidla, mikrometrická měřidla a stojanové výškoměry se dostáváme k současným trendům určování přesných rozměrů v krátkých časových intervalech. To pochopitelně neznamená, že se odpouští od zmíněných měřidel. Tato budou mít vždy své uplatnění, protože vyhovují požadavkům na přesnost a použitelnost pro danou situaci.



1.3 Současný trend měření vzdálenosti ve strojírenství

V současné době je jednoznačným trendem změřit velmi přesně co nejvíce součástí - a to co nejrychleji. Stále častěji se používají vysoce automatizované měřicí automaty, které jsou schopny špatné a dobré kusy rozdělit i do několika kategorií. Dělení produktu na vyhovující a nevhovující je v mnoha odvětvích a aplikacích nedostatečné. Čím dál častěji je třeba dělit měřené objekty do kategorií dle velikosti, aby bylo umožněno správné párování s dalšími součástmi a tím byla zajištěna správná funkce. Právě u takovýchto třídících automatů hrají nejdůležitější roli konstrukce, snímače a vyhodnocovací jednotka.

Zatímco konstrukce automatu je originální a vždy reflektuje konkrétní požadavky, vyhodnocovací jednotka vykazuje vysokou míru univerzálnosti a lze ji tedy použít i ve zcela odlišných případech. Snímače však musí být vybrány velmi citlivě především kvůli svým metrologickým charakteristikám tak, aby byly pro daný výkon a způsob měření automatu použitelné. Každý princip snímání má jiné charakteristiky, zároveň i snímače na stejném principu se liší rozsahem, přesností, citlivostí apod. Tato diplomová práce se zabývá inkrementálními a indukčnými snímači. Ovšem i ostatní metody budou zmíněny, aby bylo jasné, jaké jsou v současné době možnosti snímání délek.



Obr. 1.3 - Třídící automat na ložiskové kuličky



2 TEORIE SNÍMAČŮ DÉLEK

2.1 Rozdělení snímačů

Pro rozdělení snímačů je dobré si nejdříve představit snímač obecně. Jedná se v podstatě o zařízení, které detekuje určitou fyzikální vlastnost, případně jev. Známe tedy snímače pohybu, zrychlení, teploty, polohy, intenzity osvětlení atd. Nejčastějším označením je právě snímač, ale můžeme se setkat i s názvem senzor, nebo čidlo, vždy se ale jedná o stejné zařízení. Většinou nelze měřit fyzikální veličiny a jevy přímo. Musíme využít nějakého jevu, který je s měřenou veličinou spjat. Například v případě určování teploty se měří odpor vodiče. V případě hluku jde o chvění vzduchu snímané pomocí pružné membrány, cívky a jádra. Zaměřením této práce jsou snímače určující délkové parametry. Proto jsou v rozdělení uváděny pouze ty způsoby, které umožňují měření rozměrů.

Pro účely automatizovaného určování rozměrů postačí snímače rozdělit na dvě základní skupiny podle toho, zda-li měřené těleso přichází při měření do styku se snímačem, nebo měření probíhá bezkontaktně. Další podkategorie pak reflektují jednotlivé funkční principy.

- a) mechanické snímače
 - mechanické, číselníkové (úchlykoměry)
 - indukčnostní (elektromagnetická indukce)
 - inkrementální optoelektronické
 - inkrementální magnetické
 - potenciometrické
 - magnetostrikční

- b) bezkontaktní snímače
 - kapacitní
 - magneto-indukční
 - laserové
 - indukční (oscilátorové)
 - ultrazvukové



Obr.2.1 - Indukčnostní snímače



2.2 Parametry snímačů

Pro vzájemné srovnávání snímačů je třeba se zaměřit na jejich metrologické parametry. Jsou zde objasněny nejzákladnější pojmy spojené s měřením dle technické normalizační informace TNI 01 0115.

Citlivost - Schopnost přístroje reagovat za daných pracovních a okolních podmínek na změnu hodnoty měřené veličiny. Jde o podíl změny hodnoty Δy , kterou ukazuje přístroj a požadovanou změnou měřeného parametru Δx . U přístrojů s lineární charakteristikou je citlivost konstantní a odpovídá tedy

$$c = \frac{dy}{dx} [-]$$

V případě nelineární charakteristiky bývá nejčastěji závislost ve tvaru

$$y = x_0 + k \cdot x^2 \implies dy = 2k \cdot x$$

Nejistota měření - Nezáporný parametr charakterizující rozptýlení hodnot veličiny přiřazených k měřené veličině na základě použité informace. Standardní nejistota měření je pak nejistotou měření vyjádřena jako směrodatná odchylka.

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

Preciznost měření - Jedná se o těsnost shody mezi indikacemi, nebo naměřenými hodnotami veličiny získanými opakovanými měřeními na stejném objektu, nebo na podobných objektech za specifických podmínek.

Podmínka opakovatelnosti měření - Zahrnují stejný postup měření, stejný personál, stejný měřicí systém, stejné pracovní podmínky a stejné místo, a opakování na stejných, nebo podobných objektech v krátkém časovém úseku.

Opakovatelnost - Jde o preciznost měření za souboru podmínek opakovatelnosti měření.

Reprodukovatelnost - Jedná se o těsnost výsledky více měření, za různých podmínek, jiná laboratoř, operátor, jiné měřidlo atp.



Přesnost měření - Jde o těsnost shody mezi naměřenou hodnotou veličiny a pravou hodnotou veličiny měřené veličiny.

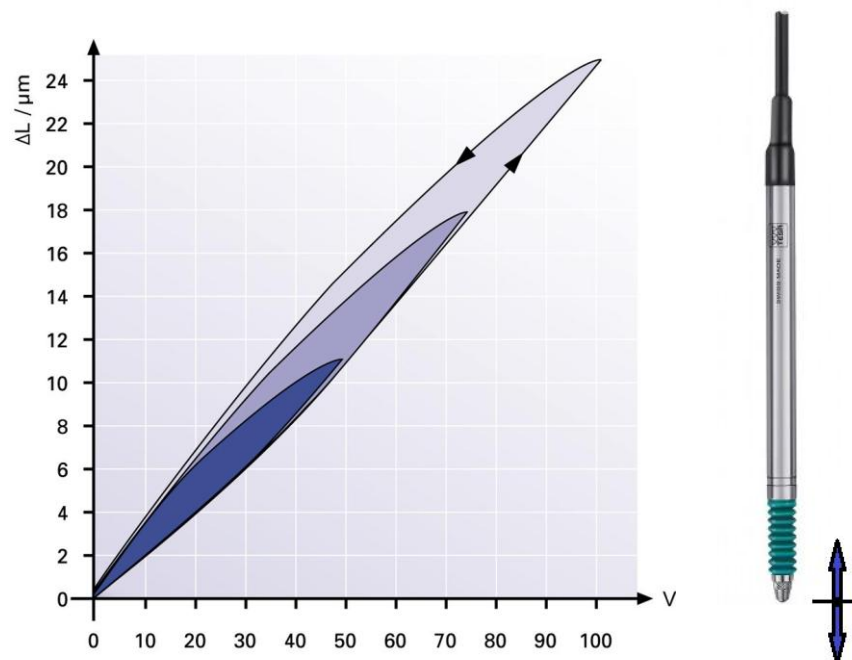
Pravá hodnota - Jde o hodnotu, která je shodě s definicí veličiny. V praxi se jedná o skutečnou, jedinečnou a nepoznatelnou hodnotu

Rozlišení - Je nejmenší možná změna měřené veličiny, která se projeví změnou na indikaci měřidla.

Linearita - Jedná se o maximální odchylku od myšlené přímky, která prochází nulovým bodem a koncovým bodem rozsahu.

Měřicí rozsah - Jde o rozsah naměřených hodnot, kde jsou dodrženy ostatní parametry snímače, jako přesnost linearita atd.

Hystereze - Jde o chování, kdy výstup měření nezávisí pouze na vnější změně, ale i na předchozím stavu systému. Dá se tedy říct, že snímač naměří jinou hodnotu polohy, jestliže se na ni dostane přírůstkem nebo úbytkem viz. [Obr.2.2]. Hystereze je pak největší hodnota tohoto rozdílu.



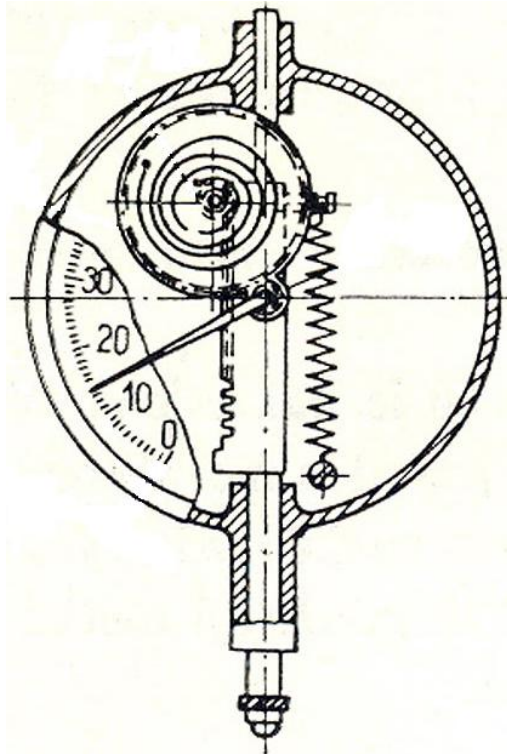
Obr.2.2 - Ukázka hysterezní křivky



2.3 Principy funkce snímačů

2.3.1 Mechanické snímače (úchylkoměry)

Princip funkce mechanických snímačů je všem zřejmý viz. [Obr.2.3]. Jedná se o převod posunutí na určitou odečitatelnou stupnici. Primárně neukazují skutečný rozměr kontrolované součásti, ale pouze rozdíl od nastavené hodnoty v kladném i záporném směru. Pro nasazení v měřících automatech jsou více než nevhodné, ale jsou to stále nejrozšířenější způsoby určování úchylek rozměrů v dílenském prostředí, právě proto jsou zahrnuty do členění. U automatických měřících stanic potřebujeme na výstupu ze snímače analogový nebo digitální signál. To nám standardní mechanické úchylkoměry nejsou schopny poskytnout.



Obr.2.3 - Princip číslicového úchylkoměru

2.3.2 Potenciometrické snímače

Jedná se o nejjednodušší snímače polohy, které využívají lineárního proměnného odporu. Princip funkce je velmi jednoduchý: jazýček jezdcy se pohybuje po odporové dráze a zkracuje, případně prodlužuje délku dráhy, po které se napájecí napětí šíří. Tím se mění odpor a tím pádem i výstupní napětí, které je měřeno a na jehož základě se určuje právě poloha jazýčku a tím i poloha samotná. Jedná se primárně o analogové snímače, pakliže nejsou vybaveny digitálním převodníkem, ale to nebývá běžné. Odporové dráhy už nejsou pouze kovové, ale stále častěji se využívají vodivé plasty, které dosahují vyšší rozlišitelnosti a vyšších rychlostí měření až 10 m s^{-1} . V praxi jsou schopny tyto snímače snést kolem 10^7 cyklů. Přičemž nelinearita bývá udávána od 0,05% do 0,3% z rozsahu.



Obr.2.4 - Potenciometrický snímač



V praxi tyto snímače dosahují rozlišitelnosti kolem 0,01mm. Nevýhodou potenciometrických snímačů je vysoký vliv teploty. Také nejsou vhodné pro rychle oscilující pohyby, nebo pro prostředí s vyšší mírou vibrací. Jedná se o měření absolutní, takže i při výpadku napájecího napětí bude následně hodnota stejná.

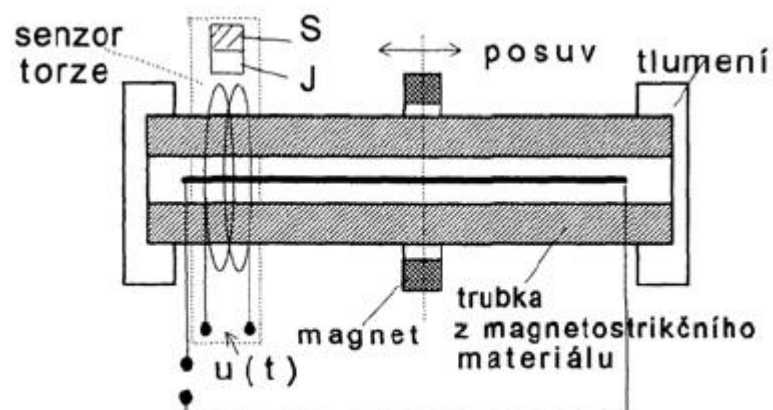
2.3.3 Magnetostrikční snímače

Magnetostrikční snímače jsou často nasazovány pro určování polohy ve větších rozsazích. Vyznačují se odolností vůči nečistotám, vibracím, teplotním vlivům, vlhkosti a nízkou údržbou. Někteří výrobci deklarují rozlišitelnost 0,1% z měřícího rozsahu a linearitu 0,01%. Česká společnost Balluff uvádí rozlišitelnost až 0,001mm u svých snímačů. Magnetostrikční snímače jsou vhodné spíše na určování polohy, než do měřících automatů. Často se používají v hydraulických válcích, tlumičích, a odměřování vzdáleností u lisů a podobně. Pracují s většími rozsahy a to 50mm - 7m i více.

Princip funkce magnetostrikčních snímačů není jednoduchý, ale za to je velmi robustní a odolný vůči vnějším vlivům. Magnetostrikce vychází ze dvou fyzikálních jevů - Wiedermannova a Villariho.

Wiedermannův jev říká, že pokud je feromagnetická tenká tyč umístěna v magnetickém poli a prochází jí proud, dochází k namáhání této tyče krutem.

Villariho jev naopak tvrdí, že dochází ke změně magnetických vlastností feromagnetického materiálu vlivem působení podélné deformace.

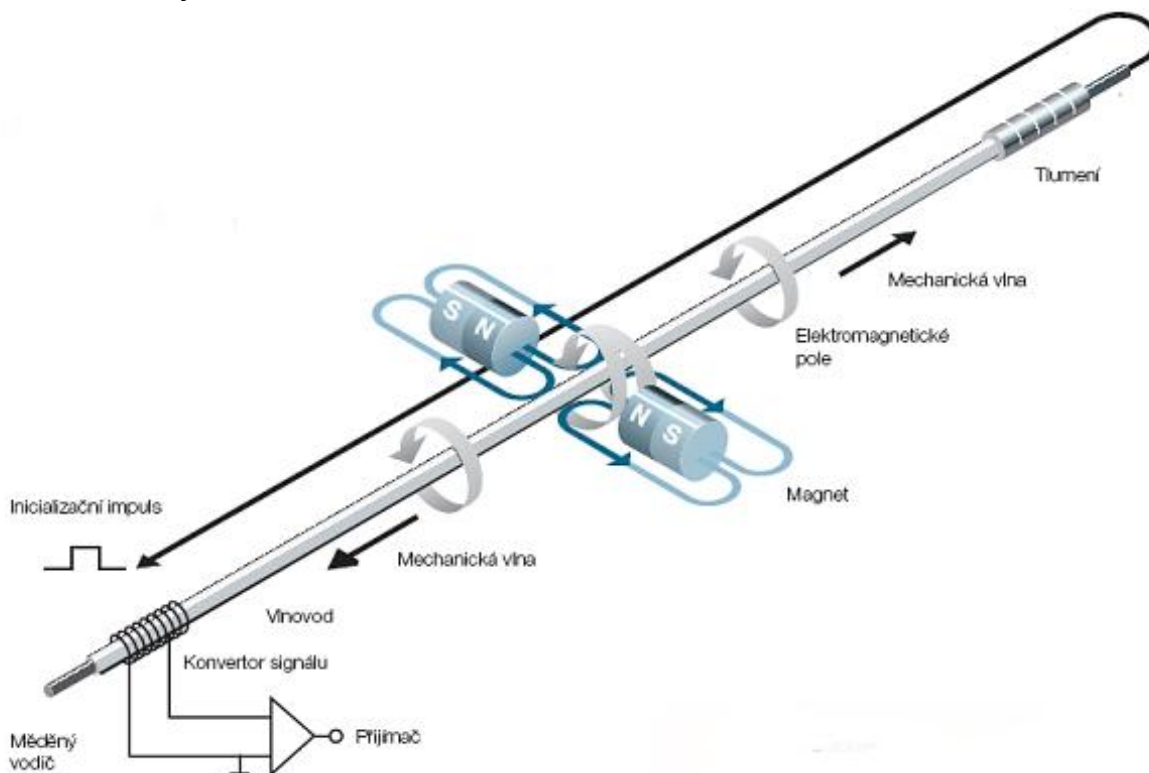


Obr.2.5 - Schéma magnetostrikčního snímače



Jak je naznačeno schematicky na [Obr.2.5] a [Obr.2.6] je těleso snímače tvořeno vlnovodem z feromagnetického materiálu, kterým prochází tenký, většinou měděný, vodič. Vlnovod je uzavřen v obalu, po kterém se pohybuje permanentní magnet.

Na volném konci vlnovodu je umístěný tlumič, který zachycuje příčnou vlnu šířící se z místa iniciace. Existují i řešení, které naopak vzniklou vlnu šířící se od snímače odráží zpět, pro zpřesnění výsledku. Na druhém konci vlnovodu je pak umístěn snímač, který na základě Villariho jevu zaznamenává příchozí příčné vlny. Celý proces měření je rozdělen do několika kroků.



Obr.2.6 - Znáznornění magnetických siločar

- 1) Prvním krokem je iniciace krátkodobého proudového impulsu, který se šíří měděným vodičem uvnitř vlnovodu rychlostí světla. Tento impuls vytváří kruhové magnetické pole otáčející se kolem vlnovodu.
- 2) V místě, kde se nachází snímací permanentní magnet, jsou siločáry navzájem kolmé viz [Obr.2.6]. Na základě Wiedermannova jevu dojde v tomto místě k elastické deformaci vlnovodu, která se šíří rychlostí zvuku oběma směry.
- 3) Na volném konci vlnovodu je tato příčná vlna tlumena. Na druhém konci u přijímače je zaznamenána na základě Villariho jevu.



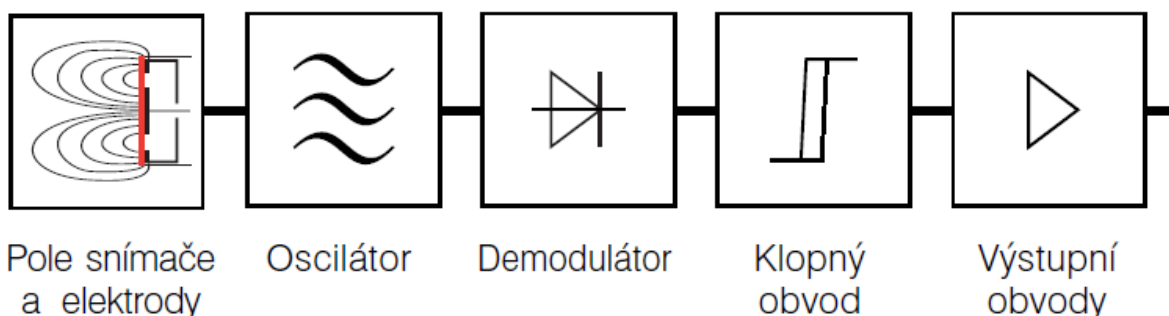
- 4) Vzdálenost permanentního magnetu, a tím i poloha, se následně určí na základě doby, kdy vyšel inicializační proudový impuls a kdy se vrátila vzniklá příčná vlna. Vzhledem k rychlosti proudového impulsu se čas jeho cesty k permanentnímu magnetu zanedbává, jelikož se impuls šíří rychlostí světla.



Obr.2.7 - Magnetostrikční snímač

2.3.4 Kapacitní snímače

Již z názvu snímačů je jasné, že využívají principu kondenzátoru a jeho kapacity. Tyto snímače se nejčastěji používají pro určování hladiny různých hmot, přítomnost předmětů na výrobních pásech nebo otáčky ozubených kol, ale i k určování vzdálenosti. Vyznačují se velmi vysokou rozlišitelností v řádu nanometrů a vysokou mírou linearitu. Je to však na úkor měřicích rozsahů, které jsou pro jednotlivé snímače velmi malé. Jsou také citlivé na okolní prostředí, kdy především vlhkost a znečištění měřených předmětů hraje velkou roli.

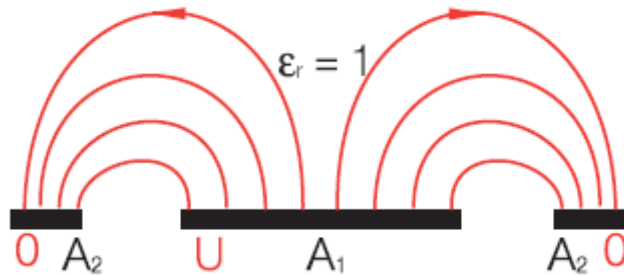


Obr.2.8 - Blokové schéma kapacitního snímače

Funkce kapacitních snímačů je založena na principu kondenzátoru, kdy se jedná v podstatě o zvláštní typ kondenzátoru, tzv. "otevřený kondenzátor". Na snímací části senzoru jsou dvě soustředné kruhové elektrody, které mezi sebou



vytváří obloukové siločáry. Dále od středu jsou siločáry delší. Jestliže není ve snímané oblasti přítomen žádný předmět, je relativní permitivita dielektrika rovna hodnotě pro vzduch, což je $\epsilon_r = 1$. V takovém případě mají siločáry tvar jako na [Obr.2.9].



Obr.2.9 - Siločáry bez přítomnosti předmětu

Samotné měření začíná u oscilátoru, kterým je na elektrody přivedeno střídavé napětí. Mezi elektrodami se pak vytvoří zmíněné siločáry. Jakmile se v oblasti siločar objeví předmět s jinou relativní permitivitou, dojde ke změně kapacity. Na základě kapacitní reaktance pak dojde k fázovému posunutí výstupního proudu vůči vstupnímu. Tuto změnu vyhodnotí demodulátor a srovná s výchozí hodnotou. Právě proto jsou kapacitní snímače citlivé na vlhkost vzduchu při měření a na čistotu měřeného předmětu. Pokud by byl měřený předmět znečištěný, změnila by se i jeho permitivita a hodnoty měření by nebyly správné.



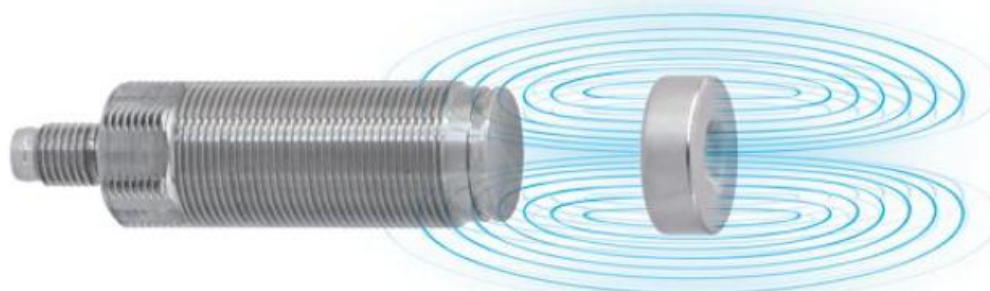
Obr.2.10 - Kapacitní snímače

Standardní měřicí rozsahy, uváděné výrobci jsou 0,05 - 10mm. Vždy se ale odvíjí od rozměru konkrétního snímače. Rozlišitelnosti, kterých dosahují, se pak pohybují až do hodnot 0,001% z měřicího rozsahu. V případě nejpřesnějších senzorů se dostaneme na hodnotu nelinearity 0,05% z měřicího rozsahu. Při výběru kapacitního snímače je také třeba brát v potaz materiál, který potřebujeme měřit. Měřicí rozsahy jsou totiž zjišťované pomocí referenční kovové destičky. Nekovové materiály mají nižší relativní permitivitu a tudíž se měřicí rozsah musí upravovat pomocí redukčního činitele. Laicky řečeno kov bude detekován dříve (v delší vzdálenosti), než například sklo.



2.3.5 Magneto-indukční snímače

Další skupinou snímačů pro určení polohy, jsou magneto-indukční snímače. Jejich zařazení do bezkontaktních snímačů je však sporné. Pro měření je totiž nezbytné připevnit permanentní magnet na součást, jejíž polohu chceme určovat. Následné měření již probíhá bezkontaktně. Magneto-indukční snímače nejsou příliš rozšířené. Společnost, která se jimi více zabývá je MICRO-EPSILON.



Obr.2.11 - Magneto-indukční snímač (Micro-Epsilon)

Rozsah měření se pohybuje do 55mm a dá se upravit pomocí velikosti permanentního magnetu, přičemž udávaná linearita měření je do 3% z měřicího rozsahu. Rozlišitelnost tohoto systému je pak maximálně 0,05% z měřicího rozsahu.

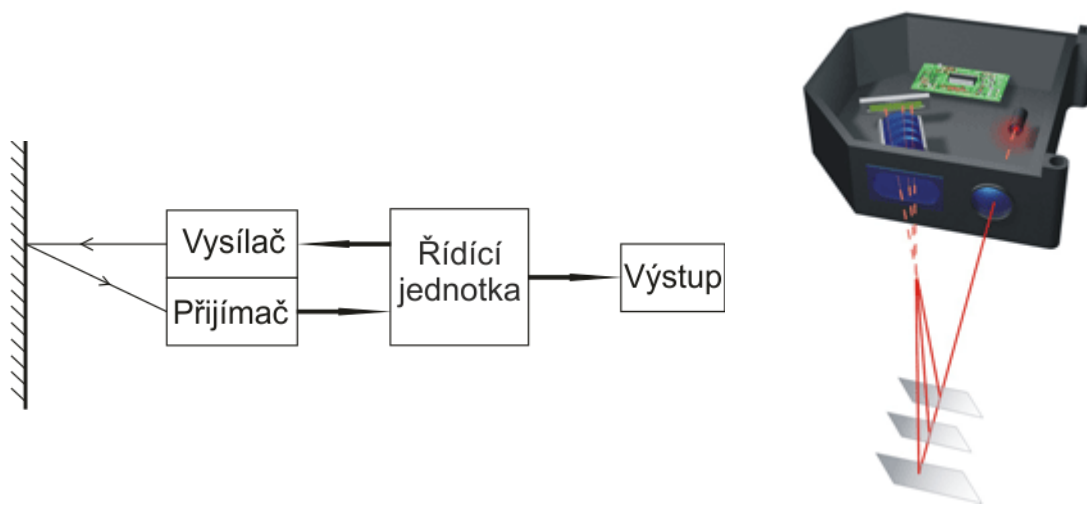
Na měřenou součást se upevní permanentní magnet a snímací část se umístí do potřebné vzdálenosti od magnetu. Ve snímači se detekuje intenzita magnetického pole, vyvolaného magnetem. Na základě této intenzity se pak určí vzdálenost magnetu od snímače. Senzor je schopen pracovat skrz neferomagnetické materiály, proto je toto řešení vhodné pro snímání polohy v uzavřených systémech nebo v systémech s vyšší mírou znečištění. Jediné možné ovlivnění vzniká jiným magnetickým polem.

2.3.6 Laserové snímače

Laserové určování polohy je optická metoda. Existují i jiné metody, např. stínová, ale pro určení polohy nebo vzdálenosti se jeví laser jako vhodnější. Principiálně je to velmi jednoduchá metoda, ale vyžaduje pečlivý výběr konkrétního snímače vzhledem k měřenému materiálu, jeho drsnosti a odrazivosti světla. Jedná se o přesnou metodu schopnou pracovat i s vysokou frekvencí. Měřicí rozsahy jsou



velmi dobře škálovány. Začínají na hodnotách kolem 1mm a maximální hodnoty jsou i přes 1m. Díky velkým měřicím rozsahům vychází hodnoty rozlišitelnosti vyšší než u konkurenčních neoptických metod vyjma magnetostrikce, ale je třeba mít na paměti, že ostatní metody neposkytují tak veliký rozsah. V praxi se tak můžeme setkat s rozlišitelností až 0,005% z měřicího rozsahu, což by v případě rozsahu 50mm znamenalo hodnotu 3 μ m. Vezmeme-li v úvahu, že v případě měřicích automatů nepotřebujeme tak vysokou přesnost, neřkuli tak vysoký rozsah, jsou tyto snímače velmi vhodné.



Obr.2.12 - Blokové schéma a náhled do laserového snímače

Princip funkce laserového odměřování je založen na triangulaci. Z laserové diody vychází skrz čočku viditelný paprsek 670nm světla. Ten dopadá na měřený předmět a odráží se zpět do přijímací části skrz filtr, který odstraní světlo nepocházející z vysílače. Přijímací část se skládá ze soustavy čoček, které koncentrují odrazem rozptýlený paprsek na plochu fotosensitivního CCD čipu. Následně z polohy promítnutého bodu se určí úhel mezi dopadajícím paprskem a odraženým. Posledním krokem je z daného úhlu určit vzdálenost předmětu.

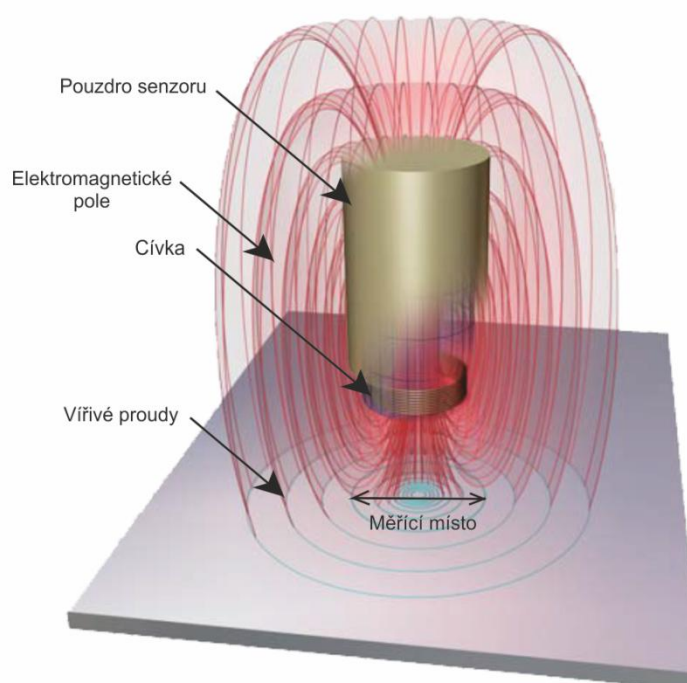
2.3.7 Indukční snímače (s potlačeným magnetickým polem)

Dalším druhem bezkontaktních snímačů jsou snímače indukčnosti s potlačeným magnetickým polem, pracující na principu vířivých proudů (angl. eddy current). Vnější konstrukce je velmi podobná jako u magneto-indukčních a kapacitních snímačů. Jde se o současně nejpřesnější metodu určování polohy



vzhledem k pořizovacím nákladům. Způsob měření vychází z Faradayova zákona elektromagnetické indukce a z objevu Léona Foucaulta o vířivých proudech.

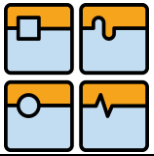
V těle snímače je cívka, na kterou je přiveden střídavý proud generovaný oscilátorem. Dle Faradayova zákona se kolem cívky indukuje proměnlivé elektromagnetické pole. Jakmile je v dosahu snímače nějaký vodivý (feromagnetický i neferomagnetický) předmět, vytvoří se v něm vířivé proudy objevené právě Léonem Foucaultem, které mají tvar smyček viz. [Obr.2.13]. Tyto proudy opět utvoří elektromagnetické pole. Slabší a opačné, než je pole tvořené cívkou, aby tak zabránili změně, která je vyvolala.



Obr.2.13 Princip měření pomocí vířivých proudů

Vzniklá pole se navzájem ruší a tato změna ovlivňuje impedanci cívky. Impedance se počítá ze změn amplitudy a fázového posunutí proudu, který vychází z oscilátoru a který se vrací z cívky do demodulátoru. Na tomto základě je pak určena vzdálenost měřeného objektu.

Rozlišení této metody dosahuje opravdu pozoruhodných hodnot. Pokud je brán v potaz snímač s měřícím rozsahem 1mm, uvádí společnost Micro-Epsilon rozlišitelnost 0,000033% z m.r., což jsou zhruba 0,2nm. Je třeba si ale uvědomit, že nedokáže v těchto řádech přesně měřit, protože hodnota opakovatelnosti je znatelně vyšší a to 0,001% z m.r.. Linearitu pak výrobce uvádí kolem 5%. Tento typ snímačů je citlivý na teplotu, ale s teplotní kompenzací je hodnota 0,02%·°C⁻¹ přijatelná.



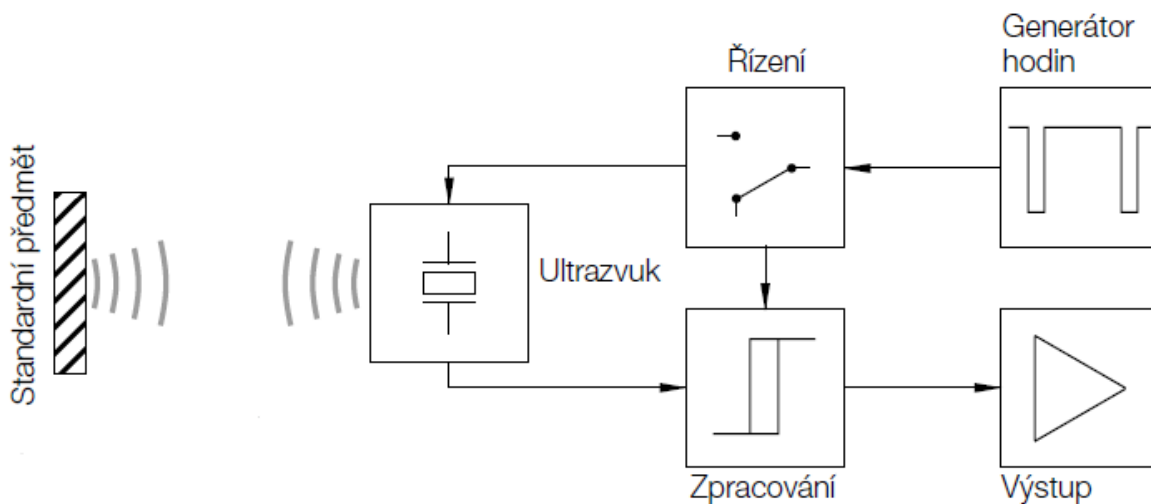
2.3.8 Ultrazvukové snímače

Ultrazvukové snímání je ze všech uvedených metod nejméně přesné a při jeho nasazení se projevuje několik úskalí spojených s měřícím principem. Rozlišitelnost se pohybuje od 0,2mm výše. Nasazení ve strojírenství pro přesné měření je tedy vyloučené a uplatnění nachází převážně při snímání hladiny kapalin a sypkých materiálů. Měřicí rozsahy jsou u vybraných senzorů 600mm - 6000mm. Jde vidět, že ultrazvukové snímače nejsou schopny měřit ve velkých rozsazích od nízkých počátečních hodnot. V tomto nabízí výhodu magnetostrikční snímače, které jsou ovšem nákladnější a konstrukčně složitější.



Obr.2.14 - Ultrazvukový snímač

Princip vychází ze šíření vysokofrekvenčního zvuku materiály. Frekvence vysílaného ultrazvuku má velký vliv na tvar zvukového kužele. Zatímco se nízkofrekvenční zvuky šíří kulově o kolo snímače, vysokofrekvenční zvuky od 20kHz výše se šíří kuželově a jsou tedy vhodné pro určování vzdáleností. Používají se i velmi vysoké frekvence, přes 80kHz.



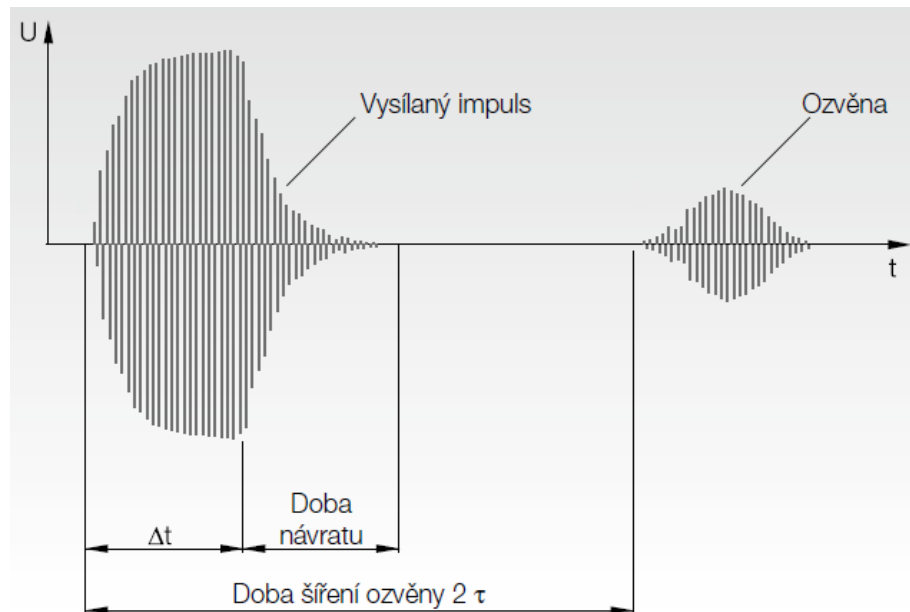
Obr.2.15 Blokové schéma ultrazvukového snímače

Existuje více konstrukčních přístupů, ale převážně se používá kombinace vysílače a snímače v jednom těle. Snímač vyšle krátký sled vysokofrekvenčních vln, které se šíří směrem ke snímanému materiálu. Po vyslání signálu se přepne vysílač do pozice přijímače a očekává návrat ozvěny. Ta je zaznamenána, zesílена zesilovačem a následně zpracována doba mezi vysláním signálu a návratem ozvěny.



V konfiguraci vysílač/přijímač ovšem vzniká "slepé místo".

Slepé místo je minimální vzdálenost od měřeného povrchu. Je způsobena délkou vysílaného signálu, kdy snímač vysílající signál nemůže zároveň přijímat ozvěnu. Bude-li měřený předmět blízko a ozvěna se vrátí dříve, než skončí vysílání signálu, nebude zaznamenána.



Obr.2.16 - Časový průběh signálu při měření

Na měření má největší vliv samotný snímaný povrch. Je třeba brát v úvahu, co potřebujeme měřit a dle toho zvolit adekvátní snímač.

Kulaté povrchy (vypouklé, cylindrické, sférické) - Odraz signálu probíhá na kulové ploše v každém místě předmětu jiným směrem, dosah snímače je tím částečně redukován. Čím menší poloměr má sférická plocha, tím méně signálu se odrazí zpět.

Drsnost povrchu - Při snímání hrubozrnných materiálů dochází ke stejnému efektu jako v případě měření kulových ploch. Signál je rozptýlen mimo snímač.

Měkké materiály - Ty pohltnou většinu energie a jsou tak velmi špatně měřitelné. Mezi takové patří různé tkaniny, molitany, plstě atd. Zvláštním druhem jsou i tenké fólie, které se chovají jako měkké materiály a signál jimi projde.

Horké objekty - Silné tepelné proudění okolního vzduchu může ovlivnit signál natolik, že nemusí být ozvěna přijata vůbec, nebo velmi špatně.



2.3.9 Indukčnostní snímače (elektromagnetická indukce)

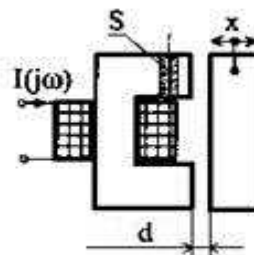
Indukčnostní snímače je označení širší skupiny snímačů, které k měření využívají elektromagnetickou indukci. Většinou tím pádem obsahují jednu nebo více cívek a využívají indukci magnetického pole. Můžeme se tak setkat se čtyřmi nejrozšířenějšími druhy.

- se vzduchovou mezerou
- s otevřeným magnetickým polem
- s potlačeným magnetickým polem
- bez feromagnetika

Indukční snímače s potlačeným magnetickým polem byly představeny viz **kap. 2.2.7**.

Indukčnostní se vzduchovou mezerou

Základní typ indukčnostních snímačů. Je založen na změně impedance cívky vlivem zmenšení nebo zvětšení vzduchové mezery mezi feromagnetickým jádrem cívky a tělesem. Tělo snímače je tvořeno cívkou, umístěnou okolo feromagnetického jádra, ve tvaru písmene C. Mezi snímaným tělesem a feromagnetickým jádrem je vzduchová mezera velikosti d . Feromagnetické jádro má na koncových částech plochu magnetického obvodu S . Předpokládáme cívku s počtem závitů n_z o odporu R , který ovšem zanedbáme.



Obr.2.17 - Schéma snímače se vzduchovou mezerou

Pro indukčnost takovéto cívky platí vztah

$$L = \frac{n_z^2}{R_m} [H],$$

kde R_m je magnetický odpor, který lze vyjádřit pomocí rovnice

$$R_m = \frac{2 \cdot d}{\mu_v \cdot S} [\Omega].$$

Hodnota μ_v je permeabilita vzduchu, jde tedy o konstantu, tudíž se nemění, stejně jako plocha magnetického obvodu S . Z výše uvedených rovnic je zřejmé, že jediný parametr, který se mění, je velikost vzduchové mezery d a tím pádem lineárně



i magnetický odpor R_m . Na základě toho se změní celková indukčnost cívky. Vezme-li se v potaz vzorec pro impedanci cívky

$$Z = R + j\omega L [\Omega],$$

kde j představuje označení imaginární složky a ω je úhlová frekvence, musí se dojít k závěru, že jedinou proměnnou je hodnota indukčnosti L . Odpor cívky R se zanedbává. Teď už pouze stačí převést tyto fakta na veličinu, kterou jsme schopni měřit a dle toho vyhodnocovat vzdálenost d . K tomu poslouží obecný vzorec pro impedanci, ze kterého vyplývá, že stačí měřit změnu proudu I .

$$Z = \frac{U}{I} [\Omega]$$

Pakliže se podíváme na tento proces z hlediska posloupnosti a návaznosti jednotlivých vzorců, zjistíme, že s větší vzdáleností d se zvýší magnetický odpor R_m . Vyšší magnetický odpor sníží indukčnost cívky L a tím se sníží i impedance Z . Dle posledního uvedeného vzorce se pak musí zvýšit proud I . Dá se tedy říci, že pokud při měření roste proud I , roste i vzdálenost d .

Existuje i diferenciální zapojení takového snímače. Rozdíl je v tom, že feromagnetické jádro s cívkou je umístěnou z obou stran viz. [Obr.2.18]. Měření se takto zpřesňuje, je snížena chyba nelinearity a zvětšen rozsah snímače.

Snímače se vzduchovou mezerou mají velmi malý pracovní rozsah, jelikož závislost indukčnosti na velikosti vzduchové mezery je hyperbolická a v malém rozsahu lze použít přibližně lineární převodní charakteristiky. Rozsah se tak pohybuje kolem $3\mu\text{m}$ až $5\mu\text{m}$.

Jejich konstrukční provedení může být obojího druhu, ale častější a přesnější provedení je dotykové. Konstrukce snímače zajišťuje rovnoběžný posuvy středního prvku tak, aby byl vždy kolmý k oběma feromagnetickým částem.



Obr.2.18 - Schéma diferenciálního snímače se vzduchovou mezerou

**Indukčnostní s otevřeným mag. polem - polomostové**

Polomostové indukčnostní, nebo také diferenční cívky i snímače s otevřeným magnetickým polem, mohou označovat stejný typ snímačů. Pojmenování těchto snímačů není úplně striktně dané a tak je třeba zaměřit se na konstrukci a princip funkce snímače, aby bylo jasné, o jaký typ jde.

Princip měření vychází ze změny indukčnosti a tím i indukovaného napětí U_i v cívce vlivem různé polohy feromagnetického jádra. Na cívku se přivede střídavý proud I . Ten však ihned neodpovídá hodnotě odporu cívky, ale postupně roste až do svého maxima, tím se zvětšuje i magnetické pole tvořené kolem cívky. Toto pozvolné sílení magnetického pole způsobí na základě Lenzova zákona vznik indukovaného napětí U_i , které působí proti změně, která ho vyvolala, tedy proti připojenému zdroji. Velikost indukovaného napětí U_i lze určit ze vztahu

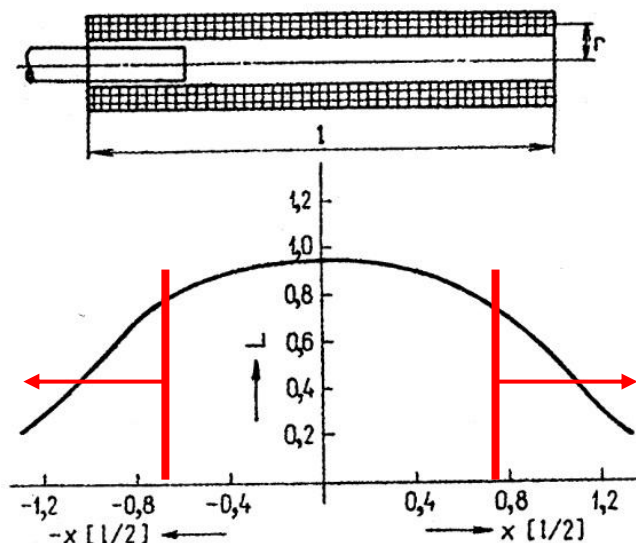
$$U_i = -L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} [V].$$

Že indukované napětí působí proti připojenému zdroji, vyplývá ze záporného znaménka na pravé straně rovnice. Změna proudu ΔI za jednotku času Δt je konstantní a je generovaná oscilátorem vyhodnocovací jednotky, tudíž musí být indukovaný proud nepřímo úměrný indukci cívky.

Je-li do cívky vloženo feromagnetické jádro, dojde k velkému zesílení magnetického pole a tím i indukčnosti. Z uvedených faktů plyne, že s přítomností feromagnetického jádra se významně zvyšuje indukované napětí U_i . Toto se děje s ohledem na velikost jádra a velikost jeho vnoření do cívky. Indukčnost cívky L s jádrem lze určit ze vztahu

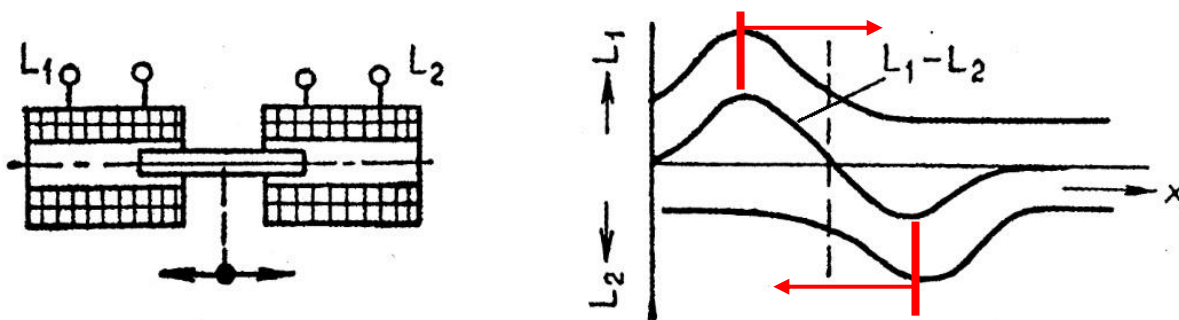
$$L = \frac{N^2}{l} [r^2 + (\mu_r - 1)r_0^2] [H],$$

kde $\mu_r [-]$ je relativní permeabilita jádra. Hodnota N pak představuje počet závitů, r_0 je poloměr jádra, r je poloměr cívky a l představuje délku cívky. Hloubka vnoření jádra do cívky je určující pro výslednou velikost indukčnosti. Hodnota L určená pomocí výše uvedeného vzorce počítá s feromagnetickým jádrem o stejné délce jako má cívka.



Obr.2.19 - Závislost indukčnosti na poloze jádra a hranice linearity

Uspořádání viz. [Obr.2.19] slouží pouze pro vysvětlení principu funkce a pro představu, jak se mění indukčnost v závislosti na poloze jádra. Problémem je, že změna indukčnosti je v tomto uspořádání lineární pouze v určitých polohách jádra, především na začátku a na konci cívky. Proto se v praxi používá diferenciální zapojení dvou cívek, které umožní přibližně lineární změnu indukčnosti ve větší části zdvihu snímače viz. [Obr.2.20].



Obr.2.20 - Závislost indukčnosti na poloze jádra a hranice linearity u diferenciálního zapojení

Z obrázků [2.19] a [2.20] je zřejmé, že diferenciální zapojení cívek ve snímači si bere "to nejlepší" z průběhu indukčnosti obou cívek a jádro se tak pohybuje v místě začátku jedné cívky a konce druhé. Přesně v místech, kde je průběh indukčnosti přibližně lineární viz. [Obr.2.19].

Změna indukčnosti diferenciálního zapojení se tak dá spočítat ze vzorce

$$L + \Delta L = \frac{N^2}{l^2} [lr^2 + (\mu_r - 1)r_0^2(l_0 + \Delta l_0)].$$

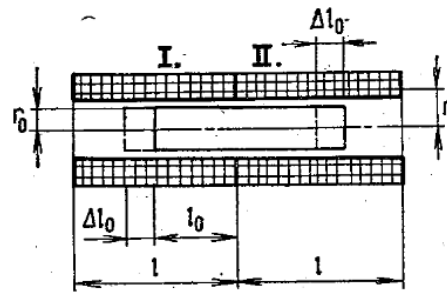


DIPLOMOVÁ PRÁCE

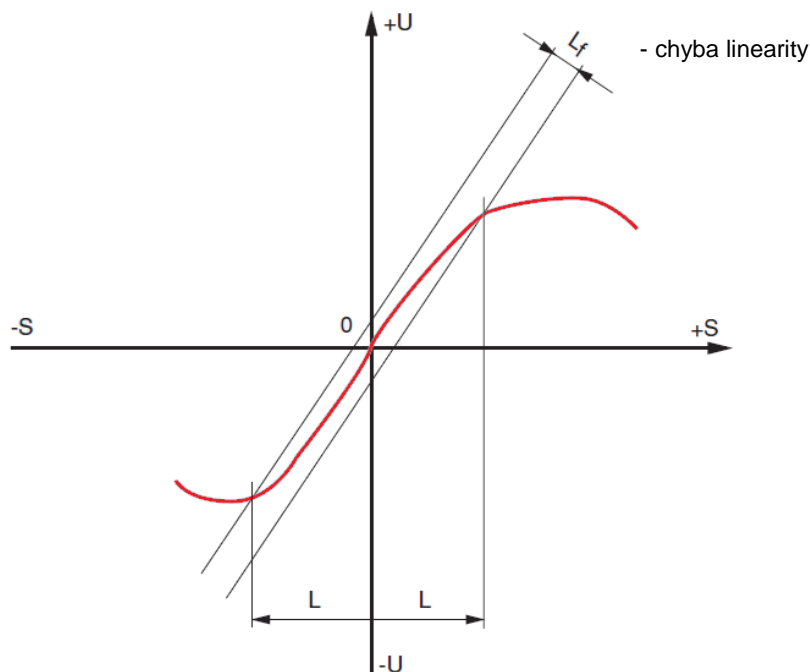
Jde ovšem o přírůstek pouze u jedné cívky. Pro druhou cívku jde o stejnou hodnotu, ale pouze s opačným znaménkem. Hodnoty ve vzorci vychází z [Obr.2.21].

Napájecí napětí je u obou cívek stejné, pouze fázově posunuté o 180° . Toto posunutí umožňuje získat uprostřed mezi cívkami hodnotu napětí rovnou nule. Následně je

výchylka feromagnetu určována velikostí amplitudy napětí a znaménko určuje, kterým směrem je feromagnet vychýlen. S diferenciálním zapojením je spojen i termín S-křivka, která znázorňuje právě průběh napětí v závislosti na výchylce. Na [Obr.2.22] je znázorněna chyba linearity L_f a rozsah, ve kterém se dá závislost považovat za lineární, tzv. Linearity range $2L$.



Obr.2.21 - Parametry diferenciálního uspořádání cívek



Obr.2.22 - S-křivka pro polomostový snímač

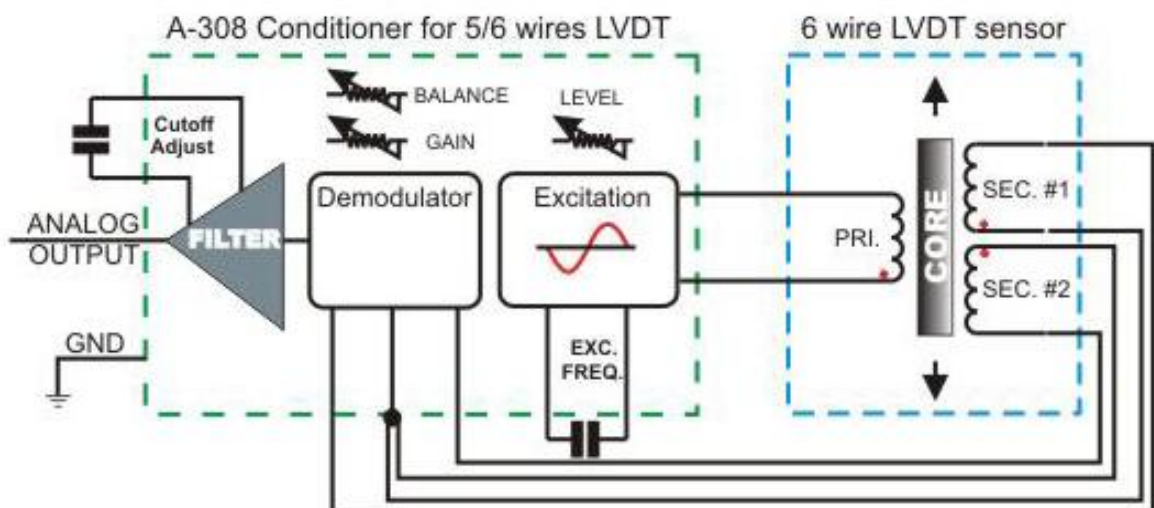
Indukční polomostové snímače se vyznačují velmi jednoduchou konstrukcí, jsou levné a mají dobré parametry linearity, opakovatelnosti i rozlišitelnosti. Pracovní rozsahy jsou přizpůsobitelné dle požadavků a to až k hodnotám 100mm. Firma Mesing u svých snímačů uvádí při zdvihu $\pm 2\text{mm}$ opakovatelnost $0,01\mu\text{m}$. Nosná frekvence je 13kHz při napětí 3V a chyba linearity odpovídá 0,25% na $\pm 1\text{mm}$ při teplotě 20°C . Je vidět, že pro většinu strojních aplikací jsou tyto parametry



dostačující. Ve firmě Mesing mají tudíž své opodstatněné místo a jsou upřednostňovány při nasazování do měřících automatů, vyráběných touto firmou.

Indukční s otevřeným mag. polem - LVDT

Další skupinou indukčních snímačů s otevřeným magnetickým polem jsou transformátorové LVDT - Linear Variable Differential Transformer. Jak již z názvu vypovídá, pracují na podobném principu jako transformátory. Tento typ je rozšířený především v západní Evropě a Spojených státech, ale používá se i u nás. Jeho konstrukce je složitější než v případě polomostových snímačů, ale výstupní charakteristiky dosahují lepších parametrů jak v oblasti linearity, tak v rozlišení snímače.



Obr.2.23 - Blokové schéma LVDT snímače a měřící jednotky

Funkce snímače vychází částečně ze stejných zákonitostí jako v případě polomostových. Primární cívka je umístěna mezi dvě sekundární cívky. Do cívek je vloženo feromagnetické jádro. Napětí o konstantní frekvenci se sinusovým průběhem je přivedeno pouze na primární cívku. Díky jádru se vytvoří v okolí magnetický tok, který indukuje napětí v sekundárních cívkách. Ty jsou zapojeny tak, aby výstupní napětí bylo rozdílem napětí z obou cívek. Pakliže se nachází jádro ve střední poloze a délka jeho zasunutí je u obou sekundárních cívek stejná, bude měřené výstupní napětí rovno nule, protože napětí generované v sekundárních cívkách se vyruší. To je způsobeno vzájemným fázovým posunutím indukovaných napětí. S pohybem

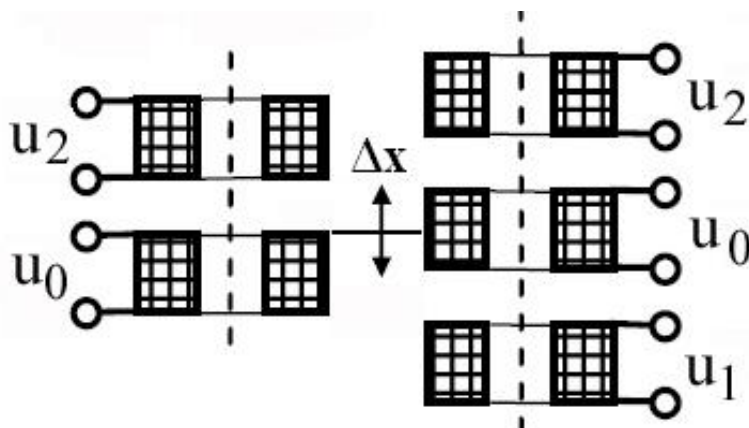


jádra více do středu jedné ze sekundárních cívek poroste i amplituda napětí a směr pohybu bude udávat kladná, nebo záporná hodnota.

Polomostové snímače a LVDT bývají velmi často zaměňovány právě proto, že vychází přibližně ze stejného principu funkce. V obou případech se jedná o indukčnostní s otevřeným polem, při bližším pohledu je však rozdíl patrný.

Indukčnostní bez feromagnetika

Poslední kategorií indukčních snímačů jsou bez feromagnetika. Jak název vypovídá, nevyskytuje se ve snímači žádný feromagnet, čím jsou odstraněny jeho veškeré parazitní vlivy. Fungují na stejném principu jako transformátor. V zapojení jsou přítomny minimálně dvě cívky, které umožňují vzájemné souosé posunutí. Častěji se ale používá diferenciální zapojení s buzenou cívkou mezi dvěma nebuzenými viz. [Obr.2.24].



Obr.2.24 - Jednoduché zapojení (vlevo), diferenciální zapojení (vpravo)

Na buzenou cívku je přivedeno střídavé napětí, které vytvoří magnetické pole. To pak indukuje napětí na druhé cívce, případně na obou vedlejších cívkách při diferenciálním zapojení. Při vychýlení živené cívky ze středové polohy je indukováno větší napětí na cívce, ke které se živená přiblížila. Ve středové poloze je opět výstupní měřené napětí rovno nule, protože se navzájem odečtou díky diferenciálnímu zapojení.

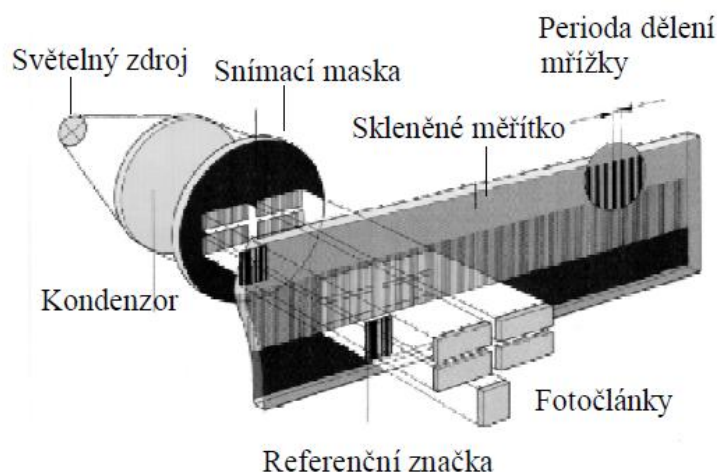
Vlivem nepřítomnosti feromagnetika je magnetický tok tvořený buzenou cívkou mnohem menší a tím se pochopitelně sníží i pracovní rozsah snímače, který se pohybuje maximálně kolem hodnot 3mm. Za to dosahuje velmi dobrého rozlišení, přesnosti i opakovatelnosti. Tyto snímače nejsou příliš rozšířené.



2.3.10 Inkrementální snímače

Optoelektronické inkrementální snímače

Optoelektronické snímače jsou inkrementální (přírůstkové) snímače jak posunutí, tak i natočení. Jedná se o velmi rozšířený způsob snímání posunutí měřicích strojů, obráběcích center a různých manipulátorů. Jak z názvu vypovídá, jedná se o přírůstkové snímání, takže při zapnutí se stanoví nulová (výchozí) poloha a snímačem jsou měřeny a vyhodnocovány pouze přírůstky od této hodnoty a to v kladném i záporném směru. V případě větších měřicích rozsahů jsou na měřítku umístěny referenční body, které umožní určit polohu v prostoru i po vypnutí a opětovném zapnutí. Přístroje využívající inkrementální snímače jsou typické svým najížděním do referenční polohy.



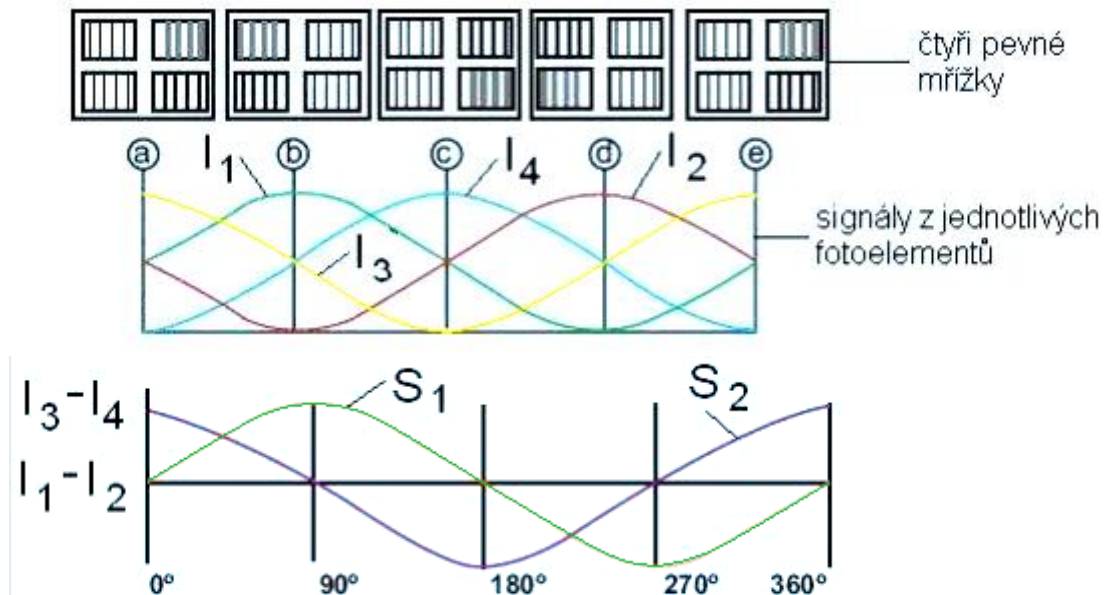
Obr.2.25 - Princip funkce optoelektronického snímače

V případě optoelektronických snímačů emituje světelný zdroj rozbíhavé světelné paprsky, které jsou kolimátorem převedeny na rovnoběžný svazek. Ten prochází skrze masku a následně skrz měřítko. Měřítko je průsvitné s nanesenými neprůsvitnými dílky. V případě referenčních značek bývá měřítko dvou a víceřadé. Když projde světlo skrze měřítko, dopadá na fotočlánky, které jej detekují a převádí na výstupní signál sinusového průběhu. Fotodetektory bývají čtyři, které jsou vzájemně fázově posunuty o 90° elektrických. Když je přítomna referenční značka, je tam umístěn i fotodetektor právě na ni. Signály ze dvou fotodetektorů se od sebe odečtou a získáme tak pouze dva sinusové signály, vzájemně fázově posunuté o 90° . Sinusové jsou, protože při vzájemném pohybu mřížky a masky



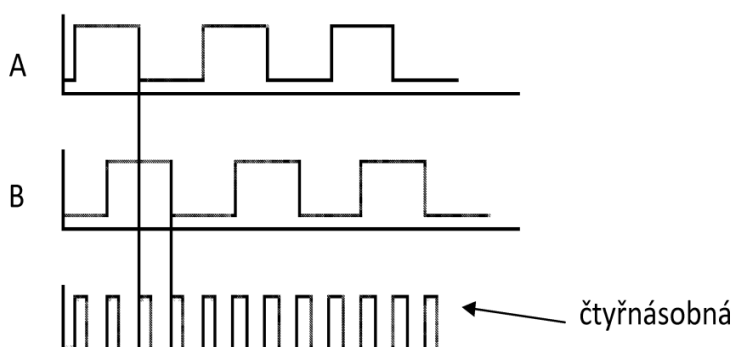
DIPLOMOVÁ PRÁCE

dochází střídavě k maximalizaci procházejícího světla a poté opět k minimalizaci, až úplnému zastínění fotodetektoru. Tento průběh je patrný viz. [Obr.2.26].



Obr.2.26 - Průběh signálu z fotodetektorů

Vzniklé signály S_1 a S_2 se převedou pomocí napěťových komparátorů na pravoúhlé signály, kdy kladná perioda značí osvit a záporná značí stínění. Tyto obdélníkové signály jsou opět fázově posunuty o 90° , jak vyplývá z posunutí signálů S_1 a S_2 . Tento fázový posun umožňuje identifikovat směr pohybu měřítka. Pro zvýšení přesnosti lze zmenšit rozestup mezi jednotlivými inkrementy, ale pouze do hodnoty $4\mu\text{m}$, pak už dosáhneme fyzické hranice. Pro další zpřesnění lze vytvořit další signály, například dvouřadým měřítkem. Případně analogovou interpolací, kdy je jeden pravoúhlý signál rozdělen na více kratších impulsů. Čtyřnásobná interpolace pak funguje viz. [Obr.2.27]. Použitím interpolace můžeme získat přesnost až $0,001\text{mm}$.



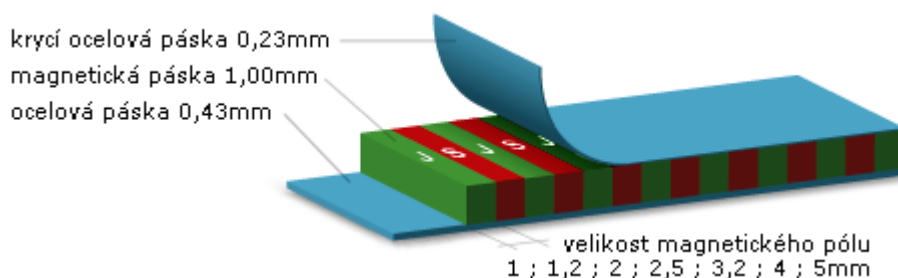
Obr.2.27 - Ukázka čtyřnásobné analogové interpolace



Magnetické inkrementální snímače

Magnetické inkrementální snímače se liší od optoelektronických především použitým přístupem k měření. Zatímco v případě optoelektronických snímačů byla použita maska, průsvitné měřítko a fotosensitivní členy, je v případě magnetických snímačů potřeba pouze magnetické pásky a čtecí hlavy.

Princípem magnetického lineárního měření je snímání polarity magnetického pásku, který tvoří pevné měřítko. Čtecí hlava se pohybuje nad tímto magnetickým páskem a pomocí Hallových snímačů generuje několik sinusových signálů.

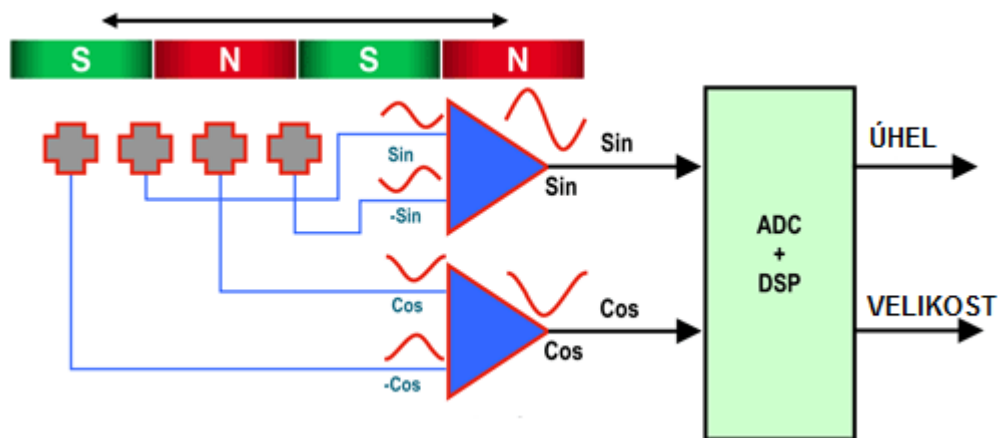


Obr.2.28 - Schéma provedení magnetického pásku

Hallův snímač je jednoduchá elektronická součástka detekující magnetické pole. Jedná se o tenký polovodič na který je přiveden proud. V případě přítomnosti magnet. pole se náboje přeskupí na jednu stranu, a tím se na součástce vytvoří hallovo napětí U_h .

$$U_h = k \cdot I \cdot B \text{ [V]}$$

Hodnota k představuje konstantu a vyjadřuje vodivost destičky a její tloušťku. I je proud přivedený na snímač, který je taktéž konstantní a konečně B je velikost magnetické indukce kolmé na snímač. Z toho vyplývá průběh signálu (hallova napětí) vystupujícího ze snímače, který je sinusový a přímo závislý na poloze magnetického pole viz. [Obr.2.28]. Ve čtecí hlavě jsou čtyři Hallovy snímače vzájemně fázově posunuté o 90° elektrických. Dostáváme tak čtyři signály, jejichž další zpracování odpovídá principiálně optoelektronickému snímání. Dva signály se opět navzájem sloučí, z čehož vzniknou pouze dva fázově posunuté, které se následně vyhodnocují viz. [Obr.2.29].



Obr.2.29 - Princip funkce magnetického inkrementálního snímání


ADC - Analog/Digital Converter - převodník analogového signálu na digitální
DSP - Digital Signal Processor - procesor pro zpracování digitálního signálu

I v případě magnetických snímačů lze využít principu interpolace, která zvýší rozlišení přístroje až na hodnoty kolem 0,001mm.

Magnetické inkrementální lineární snímače polohy jsou méně náročné na údržbu. Svou konstrukcí a principem jsou téměř bezúdržbové. Celý systém není tak náročný na výrobu a jsou také levnější než optoelektronické, jsou tedy vhodnější pro širší nasazení v průmyslu. Naopak optoelektronické snímače mají vyšší přesnost.



Obr.2.30 - Magnetický inkrementální snímač polohy

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 41
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

3 KONSTRUKCE POLOMOSTOVÝCH INDUKČNOSTNÍCH SNÍMAČŮ

Základními dvěma konstrukčními přístupy jsou indukční snímače s předepjatým kuličkovým vedením a s planžetovým vedením. Valivé vedení vyžaduje složitější konstrukci snímače a je také náročnější na výrobu, ale velikou výhodou jsou větší zdvihy, kterých snímač dosahuje. Oproti tomu jsou planžetová vedení konstrukčně podstatně jednodušší, levnější na výrobu, ovšem rozsah takového snímače je menší.

Další způsob rozdělení snímačů zahrnuje možnost vzduchového odstavování, případně přítlaku. Velikost přítlaku snímače je nastavena přivedeným tlakem vzduchu a to až do hodnoty 4,5bar. Snímače jsou tak upraveny, aby mohly pracovat v měřících automatech a mohly být ovládány automaticky pomocí pneumatického systému.

Další odlišností je pak způsob vyvedení kabeláže. To se řeší především dvěma způsoby. Axiálním vyvedením, což je patrné viz. [Obr.3.1]. A druhý způsob je pak radiální vyvedení kabeláže, který šetří místo za snímačem.

3.1 Popis konstrukce snímače s kuličkovým vedením

Jak již bylo předesláno, ložiska s předepnutým ložiskem poskytují větší rozsah pohybu a jsou odolnější vůči silám působícím v jiném než axiálním směru, především pak tečným. Další velikou výhodou je plynulý chod měřícího hrotu. Ovšem díky kuličkovým ložiskům může dojít při velmi malých posuvech k diskrétnímu skoku. To je způsobeno nedokonalostí při výrobě valivých prvků, tedy kuliček. Jejich tvar není ideální a odvalování tak probíhá po malých ploškách, což může mít za následek právě ony "skoky". Ty se pak projeví jako nepřesný výsledek měření. Snímače této konstrukce jsou velmi odolné a nabízí vysoký počet měřících cyklů a velmi dobrou rychlost měření.

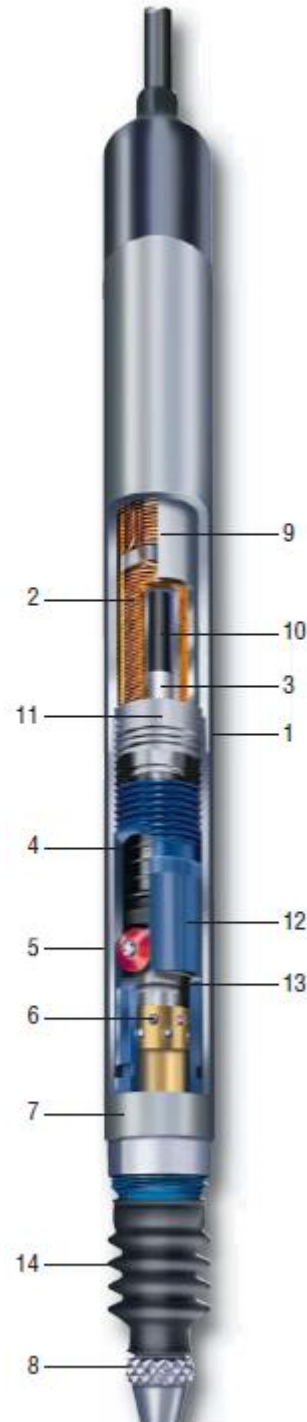
Kuličkové snímače dosahují velmi dobrých hodnot krytí IP64, což prakticky znamená, že jsou prachotěsné a odolné vůči stříkající vodě. Tyto snímače se vyhotovují i s pneumatickým ovládáním, což u planžetových není běžné. Vzhledem ke zdvihům planžetových snímačů by pneumatické ovládání nemělo příliš veliký význam.



DIPLOMOVÁ PRÁCE

- 1) Upevňovací plášť
- 2) Snímací cívky
- 3) Člen pro upevnění jádra
- 4) Přítlačná pružina
- 5) Vodící systém
- 6) Kuličkové ložisko
- 7) Omezující kroužek
- 8) Snímací dotek
- 9) Stínící obal cívek
- 10) Feromagnetické jádro
- 11) Upevnění přítlačné pružiny
- 12) Vodící pouzdro pro kuličkové vedení
- 13) Měřicí trn
- 14) Těsnění

Kovové tělo snímače [1] je tvořeno pouzdem, které mívá nejčastěji vnější průměr 8h6. Lze se však setkat i s provedením s průměrem 6mm. K tělu je přiveden kabel, kterým se přivádí budící signál a zároveň nese signál výstupní. Je veden až do těla snímače a upevněn vázacím drátem, který zabraňuje vysunutí. V místě, kde vstupuje do snímače, je utěsněn gumovým těsněním, který zároveň kabel chrání při ohybu. Blíže konci jsou umístěny dvě cívky [2] v diferenciálním zapojení a jsou obaleny stínícím obalem [9], aby bylo zajištěno minimální ovlivnění okolním prostředím. Uvnitř cívek je umístěna dutá trubička, která slouží pro vedení feromagnetického jádra [10]. Je vytvořena z materiálu, který neovlivňuje magnetický tok, aby tím nedocházelo k útlumu signálu. Jedná se především o keramiku, sklo-laminát, sklo. Tento materiál musí být dostatečně tvrdý, aby nedocházelo k jeho opotřebení pohybem jádra. Poloha cívek a upevnění přítlačné pružiny je zajištěna upevňovacím kroužkem vešroubovaným do těla snímače. Feromagnetické jádro je



Obr.3.1 - Řez snímačem s valivým vedením



upevněno skrz přechodový člen [3] k měřicímu trnu [13], který je opatřen vedením [5] zabraňující rotaci trnu. Toto vodící vedení a vedení pro valivá ložiska [12] je vyhotoveno z jednoho materiálu a je taktéž vešroubováno do těla snímače. Na trnu je umístěna zarážka, do které se opírá přitlačná pružina. Na měřicím hrotu je nalisováno vnitřní vedení pro lineární kuličkové ložisko. Celý systém je pak ukončen na straně doteku pružnou manžetou, která těsní celý systém. Na konci měřicího hrotu je pak našroubovaný dotek skrz závit M2,5 s kuličkou o průměru 3mm.

Toto byl klasický snímač s kuličkovým vedením bez pneumatického odstavení, nebo přitlaku. V případě pneumatických snímačů se jedná vždy o snímače s kuličkovým vedením. Takový snímač je opatřen pouze jiným výstupním členem, který má navíc výstup pro pneumatický systém. Konstrukce snímače jako takového není nijak více upravena. V případě vakuového odstavení je ve snímači umístěna tlačná pružina. Naopak v případě tlakového přistavení je třeba použít vratnou pružinu, nebo změnit orientaci tlačné. Přestavba je tudíž velmi jednoduchá. Odstavení snímače probíhá vakuově a přistavení přetlakem. Důležité je, že tyto snímače, ovládané pneumaticky, mohou být buď s odstavením, nebo přistavením. Ale nemohou obsahovat kombinaci obou funkcí. Na [Obr.3.2] je axiální i radiální provedení vyvedení kabelu. Tyto snímače jsou převážně rozebíratelné a opravitelné, pokud nedojde k velkým deformacím pláště, nebo jiným výraznějším poškozením.

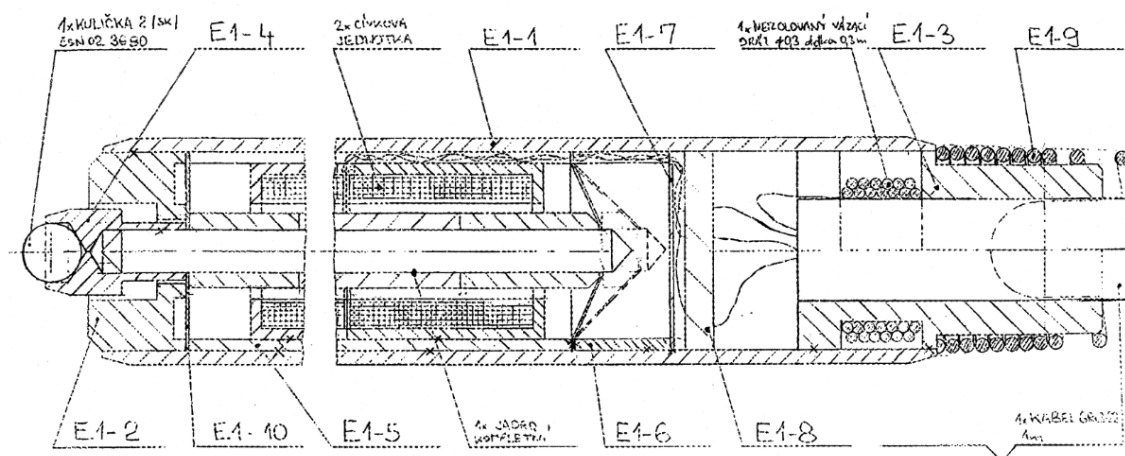


Obr.3.2 - Radiální (nahore) a axiální (dole) pneumatické snímače



3.2 Popis konstrukce snímačů s planžetovým vedením

Planžetové snímače jsou konstrukčně v mnohém jednodušší, ale jejich parametry jsou velmi omezené. Jejich nasazení v průmyslu není tím pádem tak rozšířené. Nejen vzhledem k jejich nižšímu měřicímu rozsahu, ale i problémovému odstavování v případě automatizované výměny měřených předmětů. Do měřících stanic se montují zcela výjimečně, většinou do poloautomatických. Jedná se o specialitu firmy MESING, proto je ostatní výrobci v portfoliu nemají.



Obr.3.3 - Sestava planžetového snímače

Kabel snímače je prostrčen skrz koncovku snímače E1-3 a zajištěn vázacím drátem proti nechtěnému pohybu. Koncovka je vlepena, případně vlisována, do válcovitého pouzdra snímače E1-1. Další součást E1-8 umožňuje provlečení a upevnění vstupních a výstupních vodičů cívek, aby nepřišly do kontaktu s měřícím hrotem případně planžetami. Cívky jsou umístěny ve skrouženém plechu z permalloye, který stíní vystupující magnetické pole. Následujícím krokem je vsunutí hotových cívek do dalšího skrouženého plechu E1-5, který je delší než cívky a vymezuje polohu planžet E1-10. Na jádro s feromagnetickým prvkem, měřícím hrotem E1-4 a vodičím prvkem E1-2 je nasunuta planžeta, umístěná blíže měřicímu doteku. Takto zkompletovaná součást je prostrčena skrz cívky a na druhém konci opatřena druhou planžetou, která je na místě upevněna lepením a její poloha je vymezena taktéž skrouženým plechem E1-6. Takto zkompletované součásti jsou celé umístěny v kovovém obalu a styčné plochy jsou lepeny pro zajištění polohy. Konstrukce planžetových snímačů je tudíž nerozebíratelná a tedy neopravitelná.



3.3 Konstrukce základních prvků snímače

Snímací cívky

Cívky jsou základním prvkem funkce snímače a na každý snímač jsou potřeba dvě v diferenciálním zapojení. Pro výrobu snímačů ve větším měřítku je tedy logickým krokem vlastní výroba cívek. Výroba cívek je principiálně velmi jednoduchá.

Na rotující osu se navíjí měděný drát o stále stejné délce, závit vedle závitu. Měděný drát se odvíjí z velké cívky, prochází skrz soustavu vodičích. Povrch drátu je opatřen samozapékací vrstvou, která se zapéká horkým vzduchem při navíjení. Cívka tak drží tvar. Po postupném navinutí obou cívek je první vsunuta do skrouženého permalloye. Dalším prvkem je oddělovací kroužek, většinou plastový, poté následuje druhá cívka. Posledním krokem je opatření obou konců plastovými průchodkami.

Parametry cívek se určují na základě požadovaného měřicího rozsahu a linearity snímače. Aby bylo dosaženo potřebné linearity, volí se délka jediné cívky 5 až 15 krát větší, než potřebný pracovní rozsah. S rostoucí délkou cívek tedy klesá hodnota nelinearity v měřicím rozsahu. Ze vztahů pro indukčnost diferenciálního uspořádání vyplývá, že s rostoucím vnitřním průměrem cívky se lineárně zmenšuje citlivost snímače, čímž klesá vliv nepřesností, vzniklých například uložením jádra v ose cívek a nepřesnost jeho rozměrů. Ideálním kompromisem se pak zdá být 55% až 65% využití vnitřního prostoru cívky.

Feromagnetické jádro

Jádro je tvořeno z více částí, které jsou navzájem spojeny lepením. Na [Obr.3.5] je patrné, že se jádro skládá z tyčinky, na kterou jsou nasunuty postupně jednotlivé díly. Důležité je, aby ostatní součásti neměly



Obr.3.4 - Cívková jednotka



Obr.3.5 - Jádro snímače



feromagnetické vlastnosti. Nosná tyčinka je viditelná viz. [Obr.3.5]. Je zakončena špičkou (vpravo), následně jsou na ni nasunuty prvky postupně zprava:

- vmezovací prvek č.1 (přilepen)
- feromagnetická trubička (přilepena)
- vmezovací prvek č.2 (přilepen)
- vodící planžeta
- E1-2 viz. [Obr.3.3] těsnící a vmezující člen
- E1-4 viz. [Obr.3.3] držák měřící kuličky (přilepen)

Délka feromagnetického prvku se určuje na základě délky cívky. Je dokázáno, že s větší nebo menší délkou jádra, než je délka jedné cívky, se zkracuje lineární oblast. Proto je vhodné volit délku jádra shodnou s délkou cívky.

Planžety

Planžety jsou vyrobené z tenkého plechu leptáním. Jsou velmi tenké a jejich tloušťka se pohybuje pod 1mm. Je tak zachována přijatelná tuhost snímače. S větší tloušťkou by bylo dosaženo většího přitlaku při měření. Konstrukce planžety odráží potřebu rovnoběžného posuvu jádra v ose kolmé na planžetu a rovnoběžné na měřící cívky. Jedná se tedy o zvláštní druh paralelogramu.



Obr.3.6 - Planžeta

Měřící doteky

Měřící doteky u standardních "tužkových" indukčních snímačů bývají především ocelové, protože poskytují dostatečnou tvrdost a odolnost proti otěru a jejich výroba je levná. Ovšem nehodí se pro spojitě měření, což je velmi omezující. Proto fy. MESING využívá i další materiály, jako je oxid hlinitý (Al_2O_3) neboli rubín, který se hodí pro většinu běžných aplikací. Jeho předností je vysoká odolnost proti mechanickému poškození, tvrdost a pevnost v tlaku. Hlavní nevýhodou je adhezní



Obr.3.7 - Dotek Al_2O_3



otěr při spojitém měření hliníkových materiálů. Pro spojitá měření hliníkových součástí se pak využívá především nitrid křemičitý Si_3N_4 . Ten však není vhodný pro spojitá měření ocelových součástí, kde vykazuje vysokou míru opotřebení otěrem. Jeho nasazení je tedy ideální pouze u hliníkových součástí. Třetím nejčastějším materiálem používaným pro výrobu doteků je Zirkonium, neboli oxid zirkoničitý ZrO_2 . jde o keramický materiál, který se hodí zejména pro měření litinových součástí. Jeho parametry se velmi blíží kvalitám rubínu.



Obr.3.8 - Dotek ZrO_2

Průměr samotných kuliček je různý a přizpůsobuje se požadavkům zákazníka, případně snímači a aplikaci. Měřicí kuličky jsou nejprve broušeny a následně leštěny. Nakonec probíhá měření přesnosti jejich rozměrů.

Kuličkové vedení


Pakliže se jedná o snímač s předepjatým kuličkovým vedením, neobsahuje vodící planžety. Je vybaven kuličkovým vedením o různé velikosti, dle požadovaného rozsahu a velikosti snímače. Kuličkové vedení se skládají ze čtyř základních prvků.

- vodící hřídel
- kuličková klec
- kuličky
- vodící pouzdro



Obr.3.9 - Kuličkové vedení fy. Mahr

Kuličková vedení umožňují lineární posuvy, ale i rotaci, která je odstraněna konstrukcí snímače viz. [Obr.3.9]. Jejich velkou výhodou je odolnost vůči radiálnímu zatížení a velké měřicí rozsahy. Plynulost pohybu i pod zatížením, vysoká přesnost vedení měřícího hrotu snímače - i to jsou důvody pro častější nasazení kuličkových vedení před planžetovým.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 48
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

Toto vše jsou základní součásti, indukčních snímačů. Neznamená to však, že v případě návrhu indukčního snímače musí být použity! Přesné vedení jádra nemusí být vždy tvořeno planžetami, nebo kuličkovým vedením. Pouze tři prvky musí být v konstrukci snímače obsaženy vždy, aby byla zajištěna správná funkce.

- měřící cívky
- feromagnetické jádro
- měřící dotek

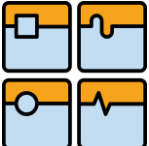
Právě tyto prvky jsou nejčastěji používány ve své "standardní" podobě, v případě návrhu nestandardních snímačů je modifikována konstrukce snímače.

3.4 Návrh a konstrukce nestandardních indukčních snímačů

Konstrukční řešení nestandardních indukčních snímačů vychází vždy ze specifických požadavků na snímač, případně se odvíjí od měřené problematiky. Mezi takové požadavky mohou patřit různá omezení, jak na prostor montáže, tak na celkovou velikost snímače, nebo naopak potřeba dlouhého doteku, nezbytnost spojitého měření, například pro měření kruhovitosti. Tyto podmínky vychází buď od zákazníka, pokud požaduje pouze snímač, nebo jsou šité na míru měřicímu automatu v případě, že nelze použít standardní tužkové snímače.

Vývoj každého snímače se děje v několika krocích, které jsou na sebe úzce navázány.

- zadání požadavků (přesnost, odolnost vůči prostředí, měřené parametry, rychlost měření, atd.)
- přibližný návrh
- vytvoření výkresové dokumentace vč. sestavy (jednotlivé díly snímače, krom standardních součástí)
- zadání do výroby prototypového kusu
- kalibrace snímače (stanovení "nulové polohy", ověření přesnosti vůči etalonu)
- zkušební měření (měření zadaného problému)

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 49
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

Zadání požadavků

Cílem bylo navrhnout nestandardní indukční snímač, použitelný v měřicích stanicích pro spojitě měření kruhovitosti přesných rotačních součástí. Opakovatelnost měření byla stanovena na maximální hodnotu 1 μ m. To prakticky znamená, že skutečné rozlišení snímače musí být ještě menší, abychom byli schopni dodržet tuto opakovatelnost. Stejně tak chyba linearity a hystereze se musí pohybovat v patřičných mezích pro dodržení opakovatelnosti.

Po rozebrání těchto požadavků vyplynou základní parametry pro navrhovaný snímač.

- opakovatelnost 1 μ m
- rozlišitelnost 0,1 μ m
- měřicí rozsah $\pm 0,5$ mm
- zdvih snímače 1,7mm
- snímací dotek by měl být zakončen kuličkou pro hladký pohyb po měřeném povrchu
- rameno nesoucí dotek by nemělo být kolmé na měřený povrch pro zajištění hladkého měření. V případě, že by bylo rameno kolmé mohlo, by docházet k odskokům a trhavému pohybu.
- změna polohy ramena musí být dostatečně plynulá a přitlačná síla konstantní
- díky malým měřicím zdvihům můžeme použít planžetové vedení, případně vedení bez pasivních odporů
- kvůli dosažení co nejlepší linearity je třeba zvolit dostatečnou délku cívky a jádra
- pro dosažení dobré citlivosti, a tím i ostatních parametrů snímače, je potřeba využít co nejlépe vnitřní prostor cívky
- snímač musí být připevnitelný k měřicímu stojanu



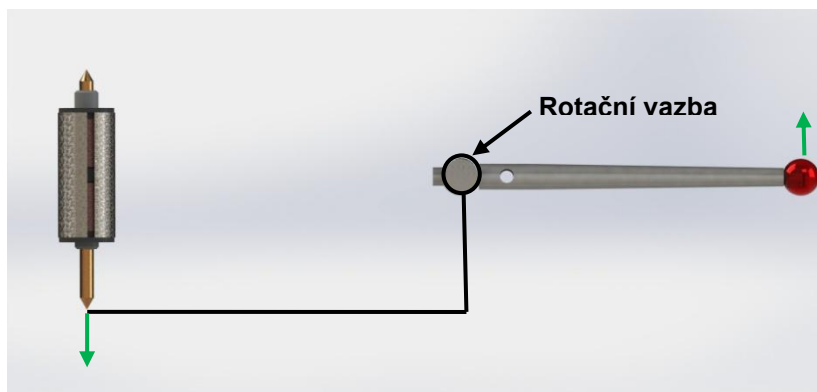
Návrh

Při tvorbě prvního návrhu je vhodné použít metod benchmarkingu, tedy zjistit, jaké snímače se pro danou problematiku hodí, jejich konstrukční řešení a jejich parametry. Takto získané informace se zapracují do finální podoby snímače. Mezi snímače vhodné k zadanému účelu patří především TESA GT31, z jehož konstrukce se vycházelo.



Obr.3.10 - TESA GT31

Prvním krokem bylo určit rozložení základních měřících prvků - cívký a jádra. Jako ideální řešení se jevílo umístit osu cívek kolmo na měřící dotek, aby jsme měli více prostoru pro pohyb jádra a zároveň k získání lepšího poměru změny polohy doteku vůči poloze jádra. Pro přesnější měření a výsledky je nutné při pohybu dotyku získat stejný pohyb jádra.



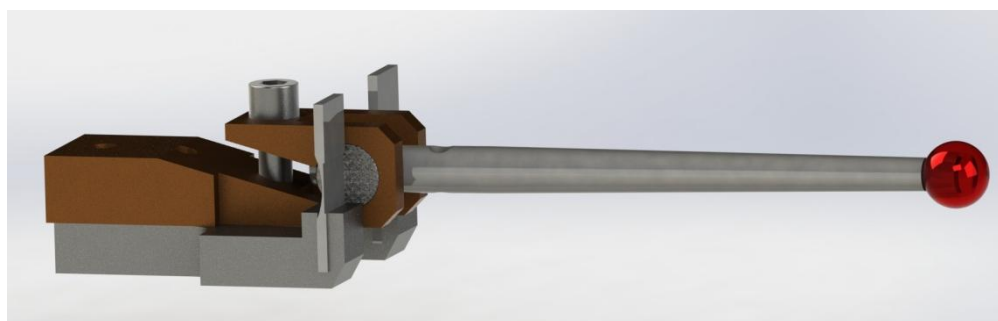
Obr.3.11 - Základní měřící prvky a znázornění vazeb

Na [Obr.3.11] jsou zobrazeny základní měřící prvky a jejich umístění vůči sobě. Z toho rozmístění můžeme vycházet při dalším návrhu jednotlivých součástí snímače. Cívka musí být umístěna v těle snímače dostatečně robustním, aby byla zajištěna stálá poloha těla snímače a tím i cívek s měřícím stojanem. Tím získáme stabilní polohu v prostoru vůči měřené součásti.

Druhým krokem však bylo řešení rotační vazby. Je nezbytné, aby se znázorněná rotace projevila pokud možno lineárním posuvem jádra v patřičném směru, jak naznačuje zelená šipka viz. [Obr.3.11]. Rotační vazba musí být dostatečně pevná, aby nedocházelo k tzv. mrtvému chodu a nevznikaly tak nepřesnosti v měření a další odchylky. To znamená, že nelze použít kluzné vedení,



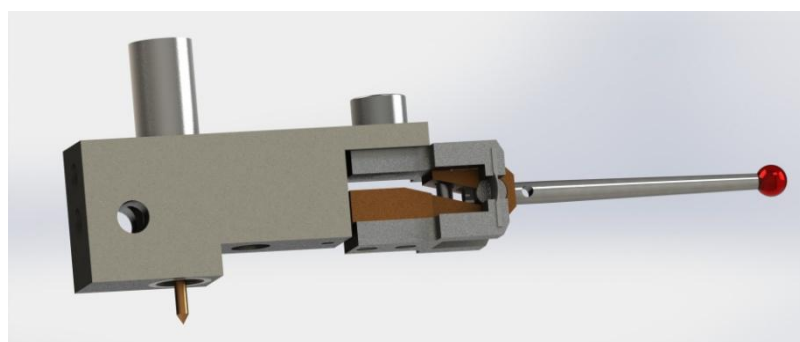
kde určitá vůle existuje, aby vedení plnilo svou funkci. Řešení rotační vazby byla nejnáročnější část návrhu. Nakonec bylo rozhodnuto využít elastické deformace kovových planžet [Př.6]. Ty jsou vlepeny do drážek upevňovacích čelistí [Př.2] a [Př.3]. Horní čelist je nepohyblivě spojena s tělem snímače, zatímco spodní část je pohyblivá. Měřicí dotek je tak pevně spojen s dolní čelistí, aby byla zajištěna měřicí funkce. Pevné spojení měřicího doteku a spodní čelisti je realizováno sevřením čepu, ve kterém je zašroubován dotek viz. [Obr.3.12]



Obr.3.12 - Upevnění doteku se spodní čelistí a planžetami

Spojení mezi jádrem a spodní čelistí je následně realizováno velmi snadno [Př.7]. Další stěžejní částí bylo tělo snímače [Př.4], které muselo odpovídat rozměrově ostatním součástím, aby bylo možné snímač smontovat a měřit s ním.

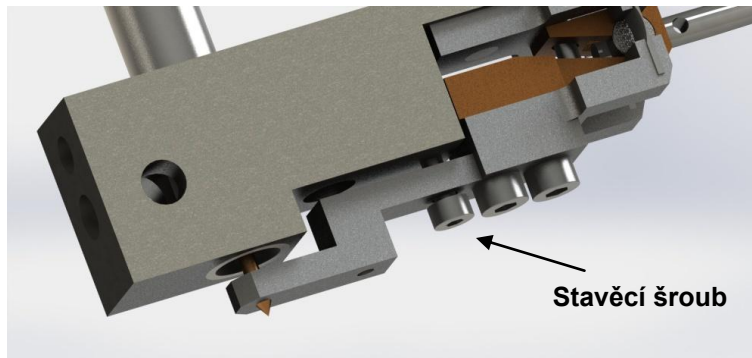
Tělo snímače musí obsahovat dostatek prostoru pro spojení potřebných součástí, měřicích cívek a možnost uchycení ke stojánku. Zároveň musí být dostatečně pevné, aby byl minimalizován vliv elastických deformací. V těle je umístěno několik otvorů, aby byly zajištěny základní funkce, jako omezení rozsahu snímače, přítlak doteku, a samotné snímání. Výsledné těleso je zobrazeno na [Obr.3.13].



Obr.3.13 - Těleso snímače s cívkou, jádrem a čelistmi



Další krok bylo řešení omezení rozsahu snímače tak, aby nemohlo dojít k takovému posuvu jádra, který by znamenal kontakt mezi jádrem a cívkou. To je realizováno stavěcím šroubem, který omezuje pohyb jádra směrem dolů. Ten je prostrčen členem, spojujícím pohyblivou čelist s jádrem, a vešrouben do tělesa snímače. Délka chodu snímače se tak dá velmi snadno korigovat.



Obr.3.14 - Detail nosiče - spojení jádra a spodní čelisti

Na obrázku je také patrný otvor v tělese snímače, který slouží pro provlečení pružinky, jež navrácí snímač do výchozí polohy a zaručuje správný konstantní přítlak měřícího doteku.

Tato konstrukce je velmi zajímavá tím, že umožnila použít standardní vybavení snímačů firmy MESING, především cívku a jádro. Nebylo tedy třeba tvořit nový snímací systém, mohli jsme pracovat s odzkoušenými a dobře zmapovanými součástmi. Další zajímavostí je, že jediné vedení jádra tvoří otvor ve spojovacím členu, což má za následek minimalizování pasivních odporů, které by vznikly použitím planžet. Cívka je naopak vlepena do pouzdra a připevněna šroubem k tělu snímače. Jádro a cívka jsou tedy fyzicky naprosto nezávislé. K pouzdru cívky už je pak pouze přiveden vodič pro odvod měřícího signálu. V případě poruchy cívky je tedy možné tento snímač snadno opravit.

Tato konstrukce taktéž umožňuje v určitých mezích libovolné nastavení sklonu snímacího doteku, což je velmi výhodné, jelikož nemusíme tolik řešit upevnění snímače ve správné poloze.



Tvorba výkresové dokumentace

Výkresová dokumentace byla tvořena pomocí programu SolidWorks na základě vypracovaného modelu. Při vypracování výkresů byla použita šablona firmy MESING. Výkresy tedy podléhají jejich požadavkům. Bylo dbáno především na jejich technickou správnost. Veškerá výkresová dokumentace k tomuto indukčnímu snímači se nachází v příloze.

3.5 Ověření navrženého indukčního snímače

Sestavení, zapojení, kalibrace snímače

Po zhotovení a dodání všech součástí snímače byl snímač sestaven za pomoci pracovníků fy. MESING. Během sestavování nedošlo k problémům, což je dle mého soudu způsobeno tvorbou a analýzou modelu. Ten by případné kolize materiálu odhalil a omezení funkčnosti by bylo viditelné.

Pro zapojení snímače k vyhodnocovací jednotce slouží standardizovaný konektor DIN-5, se stíněným kabelem v obvyklé délce 2m. Snímač je připojen k vyhodnocovací jednotce TESAtronic TTD30, která slouží k vyhodnocení a zobrazení polohy snímače viz. [Obr.3.15].



5-pin DIN

Obr.3.15 - Konektor DIN 5 a jednotka TESAtronic TTD30

Kalibrace snímače se prováděla pomocí etalonu, který byl navázaný na brněnský ČMI včetně ověřovacího listu č. 814-KL-L010-05 ze dne 5.12.2011. Jedná



se o švýcarský délkoměr SYLVAC D25. V současnosti jde již o starší typ měřidla a proto ve firmě MESING pro zkušební měření používají odlišný inkrementální snímač, který slouží jako referenční.

Pro zjištění velikosti chyb v jednotlivých polohách páčkového snímače bylo použito komparační měřidlo MCU 30 viz. [Obr.3.16], konstrukcí pocházející od MESINGu, označováno jako "emcúčko". Zařízení MCU je velmi robustní konstrukce, což eliminuje nepříznivé vlivy elastických deformací. Je umístěno v klimatizované místnosti se stálou teplotou.

Princip kalibrace spočívá ve zjištění odchylek páčkového snímače od referenčního etalonového snímače SYLVAC D25. Etalonový snímač je uchycen v těle MCU a připojen k zobrazovací jednotce. Kalibrovaný snímač byl připevněn proti etalonovému na stojan, který je součástí MCU a připojen k vyhodnocovací jednotce TESA TT80. Mezi doteky obou snímačů byla umístěna koncová měrka uchycena k pohyblivé části přímovodu. Ten je tvořen kompenzovaným zdvojeným membránovým paralelogramem. Pro nastavení polohy měrky je použit velmi přesný mikrometrický diferenciální šroub.



Obr.3.16 - Zařízení MCU 30

Postup měření:

- 1) připevnění páčkového snímače na zařízení MCU
- 2) nastavení nulové polohy páčkového snímače (odečítáme na jednotce TT80)
- 3) vynulování polohy etalonového snímače SYLVAC D25
- 4) najetí do maximální polohy měřicího rozsahu, tedy 700 μ m dle SYLVAC D25
- 5) odečtení hodnoty na jednotce TT80
- 6) s krokem 50 μ m provedeme záznam zobrazených hodnot a to až po polohu -700 μ m

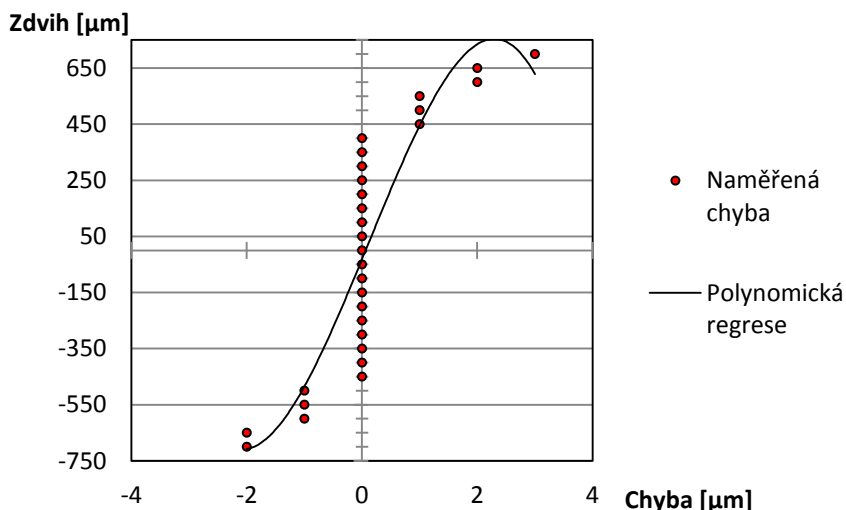


Výsledky měření jsou uvedeny v následující tabulce [Tab.3.1] a zpracovány graficky v [Graf.3.1]. Tabulka porovnává naměřené hodnoty pákového snímače zobrazené na jednotce TT80 s referenční hodnotou ze SYLVAC D25. Poslední sloupek pak udává rozdíl naměřených hodnot označený jako "chyba".

Tab.3.1 - Hodnoty měření zjištěné při kalibraci

č. měření	Zdvih Sylvac D25	naměřená hodnota TESA TTD 30	chyba	č. měření	Zdvih Sylvac D25	naměřená hodnota TESA TTD 30	chyba
	[μm]	[μm]	[μm]		[μm]	[μm]	[μm]
1	-700,0	-698	-2	16	50,0	50	0
2	-650,0	-648	-2	17	100,0	100	0
3	-600,0	-599	-1	18	150,0	150	0
4	-550,0	-549	-1	19	200,0	200	0
5	-500,0	-499	-1	20	250,0	250	0
6	-450,0	-450	0	21	300,0	300	0
7	-400,0	-400	0	22	350,0	350	0
8	-350,0	-350	0	23	400,0	400	0
9	-300,0	-300	0	24	450,0	451	1
10	-250,0	-250	0	25	500,0	501	1
11	-200,0	-200	0	26	550,0	551	1
12	-150,0	-150	0	27	600,0	602	2
13	-100,0	-100	0	28	650,0	652	2
14	-50,0	-50	0	29	700,0	703	3
15	0,0	0	0				

Chyba linearity snímače



Graf.3.1 - Velikost chyb vzhledem k poloze snímače



Z výsledku kalibrace je patrná chyba linearity, která se projevuje ve větších rozsazích chybou vůči etalonovému snímači. Zjištěné chyby odpovídají rozložením tzv. S-křivce. Tato odchylka od linearity může být korigována polynomem třetího stupně viz [Graf.3.1].

$$S = A + By + Cy^2 + Dy^3$$

Kde

S [μm] - korigovaná hodnota snímače

A, B, C, D [-] - koeficienty korekce

y [μm] - nekorigovaná hodnota snímače (naměřená)

Tímto je možné zvýšit rozsah snímače až o 30-50%, nebo snížit odchylku od linearity 2-3 krát.

Kalibrace dle etalonového snímače poskytla standardní informace, tak jako v případě ostatní indukčních snímačů. V tomto ohledu není rozdíl mezi tímto páčkovým snímačem a standardním planžetovým. Pokud se budeme během měření pohybovat v rozsahu $\pm 400\mu\text{m}$, bude odchylka $0\mu\text{m}$ i při opakovaných měřeních. Pro větší rozsahy je už třeba počítat s projevem nelinearity a chyba snímače nebude nulová, avšak neměla by přesáhnout $\pm 3\mu\text{m}$. Pakliže by byly aplikovány korekce, vyšly by odchylky menší.

Výsledky této kalibrace naznačují, že měření indukčních snímačů je nejpřesnější a nejlineárnější v blízkosti "elektrické nuly". Pro potvrzení by byla potřeba provést měření o řád až dva přesnější, tedy $0,0x\mu\text{m}$, bohužel nebyl k dispozici dostatečně přesný navázaný etalonový snímač.

Ověření rozlišitelnosti snímače

Dalším krokem bylo určení, zda je schopen snímač pracovat s dostatečnou přesností i v řádu desetin mikrometru pro velmi malé rozsahy. Bylo proto provedeno měření kruhovitosti vrchlíku etalonové koule, která má přesné rozměry. Tato koule byla měřena i externě na kruhoměru od společnosti Taylor-Hobson. Bylo možno tak srovnat výsledek měření našim indukčním snímačem a patřičně kalibrovaným kruhoměrem Taylor-Hobson Talyrond 131C. Aby se daly výsledná měření vzájemně porovnat, museli jsme zajistit dostatečný počet měřených hodnot s velmi

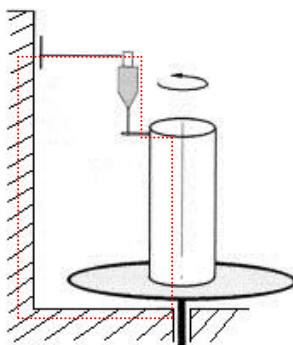


krátkou časovou periodou. K tomu byla použita speciální řídicí a vyhodnocovací jednotka od společnosti INTRONIX NX-3080 viz. [Obr.3.18]. Ta slouží především k měření a vyhodnocování geometrických veličin, ale je schopna i jednoduchého řízení v případě automatizovaných měřicích stanic.

Parametry jednotky NX-3080:

- 1 až 8 kanálů pro měřicí snímače
- měřicí rozsah dif. indukčních snímačů $\pm 2\text{mm}$ (upravitelné)
- vzorkovací frekvence až 5000s^{-1}
- grafický barevný display 6,5" 640 x 480 bodů
- připojení k pc pomocí USB, nebo Ethernetu TCP-IP

Pro účely našeho měření jsme vycházeli ze vzorkovací frekvence 2500 bodů na otáčku, což nám poskytlo dostatečný počet hodnot pro směrodatné vyhodnocení kruhovitosti, vzhledem k průměru měřeného etalonu.



Obr.3.17 - Měřicí smyčka

Měřicí smyčka se skládala z vřetena s velmi přesným rotačním uložením, ve kterém byl upnut kulový etalon. Na stejné podstavě byl umístěn hliníkový profil, který držel stojan pro připevnění snímače. Snímač byl připojen k měřicí jednotce NX-3080. Schéma měřicí smyčky je zobrazeno viz. [Obr.3.17].



Obr.3.18 - Měřicí jednotka INTRONIX NX-3080



Měřicí sestava se sestávala z následujících prvků:

- univerzální upínací stůl
- rotační vřeteno s přesným uložením
- kulový etalon Taylor-Hobson
- jednoduchý páčkový univerzální snímač JPSU I
- jednotka NX-3080
- upínací deska s mikrometrickým posuvem X,Y

Postup měření:

- 1) Uchycení upínací desky s mikrometrickým stavěním ke vřetenu.
- 2) Umístění kulového etalonu [Obr.3.19]
- 4) Přichycení aplikovaného snímače ke stojánku.
- 5) Připojení snímače k jednotce a její spuštění.
- 6) Vycentrování měřeného etalonu pomocí mikrometrických šroubů upínací desky.
- 7) Nastavení polohy snímače, aby byl před začátkem měření blízko své "elektrické nuly".
- 8) Nastavení jednotky NX-3080 na měřený problém a požadované filtry.

Rychlost rotace vřetena byla nastavena na nižší hodnoty tak, aby nedocházelo k odskokům snímače způsobených vyšší rychlostí a snímač mohl přesněji kopírovat povrch etalonu. Jedna otáčka pak trvala přibližně 8s.

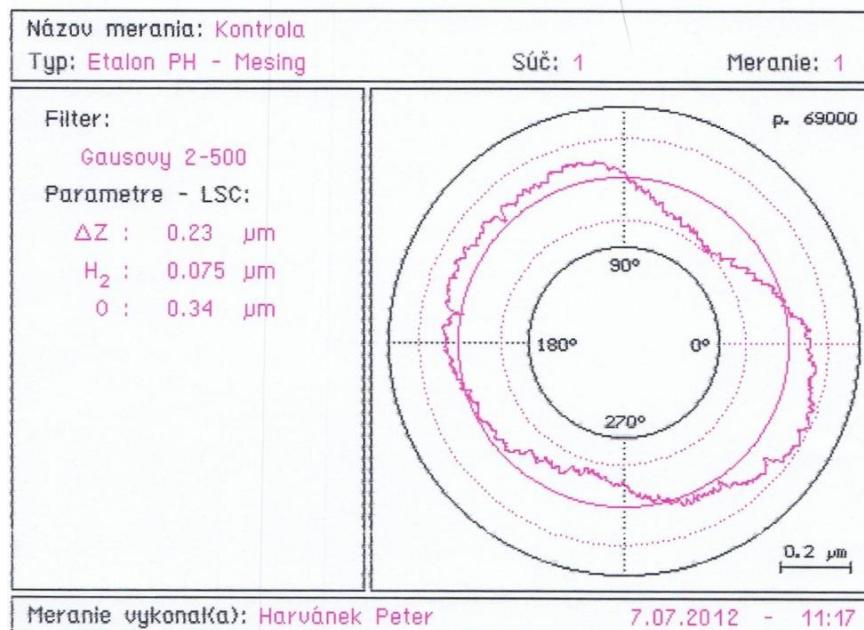
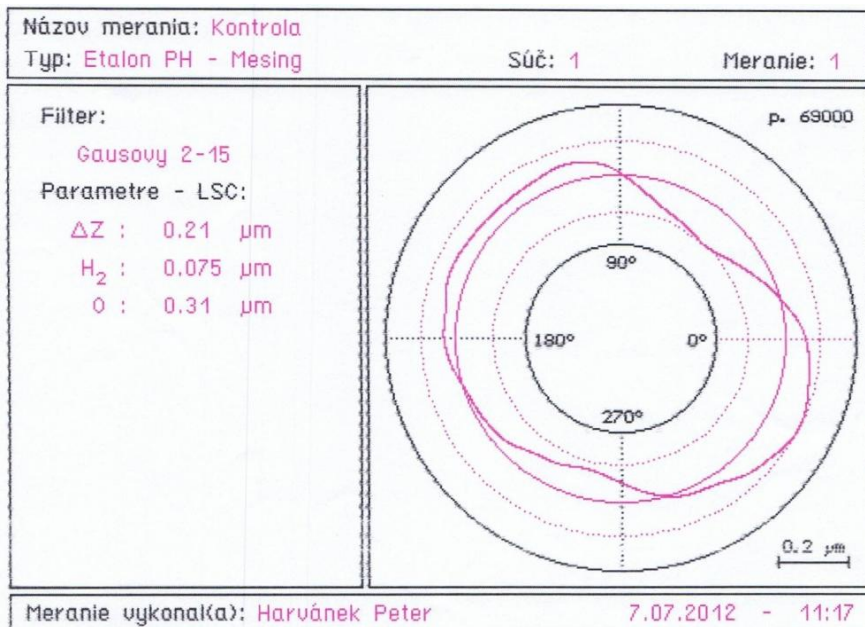


Obr.3.19 - Kulový etalon



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Jednotka následně vyhodnotila kruhovitost na základě změřených hodnot a zpracovala graf viz. [Obr.3.20]



Obr.3.20 - Vyhodnocení kruhovitosti s grafickým zobrazením průběhu měřeno pomocí JPSU I

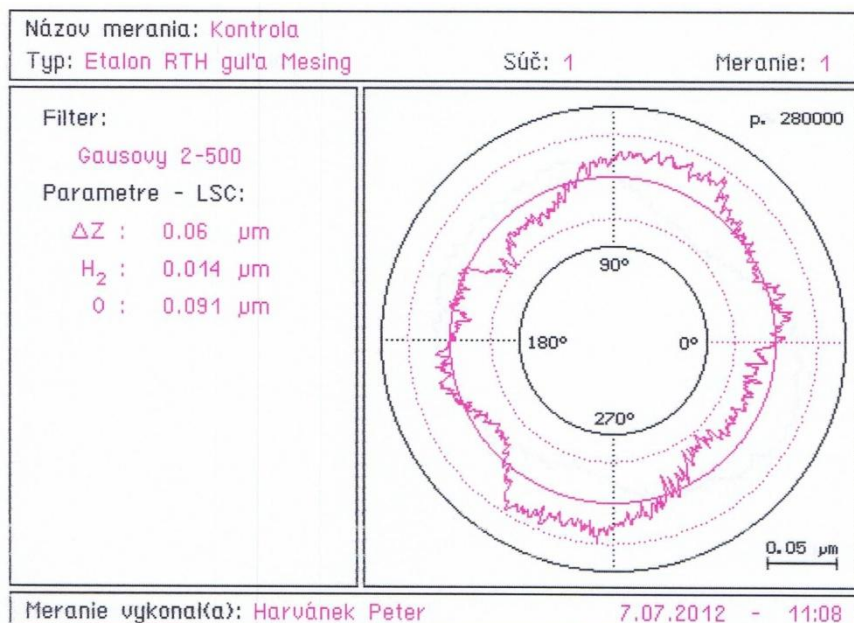
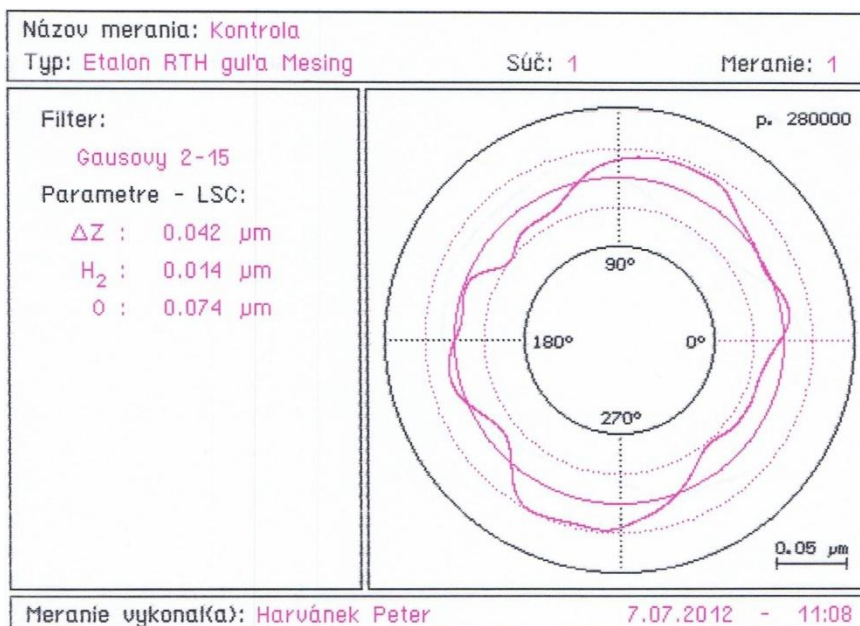
Výsledné grafy kruhovitosti se liší především v aplikovaných filtrech. V prvním případě byl použit Gaussův filtr 15 upr "undulations per revolution". V druhém pak 500 upr.

Rozdíl mezi nimi je v počtu vln, které jsou vyhlazeny na otáčku. V případě filtru 15 upr jsou odstraněny všechny vlny, které se vyskytnou více než 15 krát za




DIPLOMOVÁ PRÁCE

otáčku. Logicky pak filtr 500 upr odstraní pouze ty vlny, které se za otáčku objeví minimálně 500 krát. Tento filtr má za úkol odstranit z dat vysokofrekvenční signál, který je tvořený strukturou povrchu. Zbude pak nízkofrekvenční část signálu, což je požadovaná kruhovitost a ta se následně vyhodnocuje. Prakticky se rozdíl mezi filtry projevuje jako "plynulost" signálu. V případě 500 upr je křivka rozechvěná, protože filtr je benevolentnější a propustí více frekvencí. Naopak při 15 upr je odstraněna velká část frekvencí. Standardním filtrem při měření kruhovitosti je 50 upr.



Obr.3.21 - Vyhodnocení kruhovitosti s grafickým zobrazením průběhu měřeno pomocí kruhoměru Taylor-Hobson

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 61
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

Srovnáním výsledků měření pomocí snímače JPSU I a kruhoměru Taylor-Hobson zjistíme, že rozdíl mezi výsledky je pro 15 μ m filtr

$$\Delta Z_{JPSU} - \Delta Z_{RTH} = 0,21 - 0,04 = \mathbf{0,17} [\mu m]$$

a pro 500 μ m filtr pak

$$\Delta Z_{JPSU} - \Delta Z_{RTH} = 0,23 - 0,06 = \mathbf{0,17} [\mu m].$$

Přihlédneme-li k faktu, že Talyron 131C je měřidlo speciálně pro měření kruhovitosti a poskytuje tudíž zákonitě přesnější výsledky, je odchylka do 0,2 μ m velmi dobrý výsledek.

3.6 Zkušební měření

Posledním krokem bylo změření zadaného předmětu. Jednalo se o změření kruhovitosti doteku o průměru 10mm. I v tomto případě jsme naměřené výsledky srovnávali s dalším snímačem, aby jsme měli jistotu, že náš snímač pracuje jak má a že výsledky, které podává, jsou správné. Pro srovnání byl použit tužkový indukčnostní snímač od společnosti Peter-Hirt.

Měřicí sestava je téměř shodná s předchozím měřením. Pouze kulový etalon od firmy Taylor-Hobson byl nahrazen rubínovým dotekem, který jsme měřili.

Základní prvky jsou tedy:

- univerzální upínací stůl
- rotační vřeteno s přesným uložením
- upínací deska s mikrometrickým posuvem X,Y
- kulový dotek o průměru 10mm
- držák doteku
- jednoduchý páčkový univerzální snímač JPSU I
- tužkový indukčnostní snímač Peter-Hirt
- jednotka NX-3080



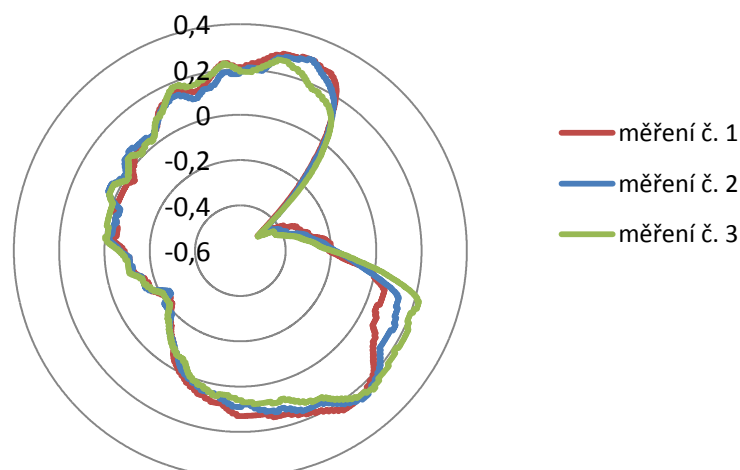
Postup měření:

- 1) Přišroubení držáku doteku k upínací desce.
- 1) Uchytení upínací desky s mikrometrickým stavěním ke vřetenu.
- 2) Našroubení kulového doteku.
- 4) Přichycení aplikovaného snímače ke stojánku.
- 5) Připojení snímače k jednotce a její spuštění.
- 6) Vycentrování měřeného doteku pomocí mikrometrických šroubů upínací desky.
- 7) Nastavení polohy snímače, aby byl před začátkem měření blízko své "elektrické nuly".
- 8) Nastavení jednotky NX-3080 na měřený problém a požadované filtry.

Měření bylo opět prováděno při malé rychlosti rotace vřetena, aby byly eliminovány odskoky snímacího doteku. Počet snímaných bodů byl opět stanoven na 2500 na otáčku vřetena. Při průměru kuličky 10mm je to více než dostačující počet bodů pro vyhodnocení.

Tabulky exportované z jednotky NX-3080 s měřenými body jsou přiloženy v elektronické podobě na CD. Jejich tisk by pokryl zhruba 50 stran a jejich informativní přínos by byl minimální. Samotné měření bylo opakováno třikrát pro oba dva snímače a výsledky vyneseny do následujících grafů .

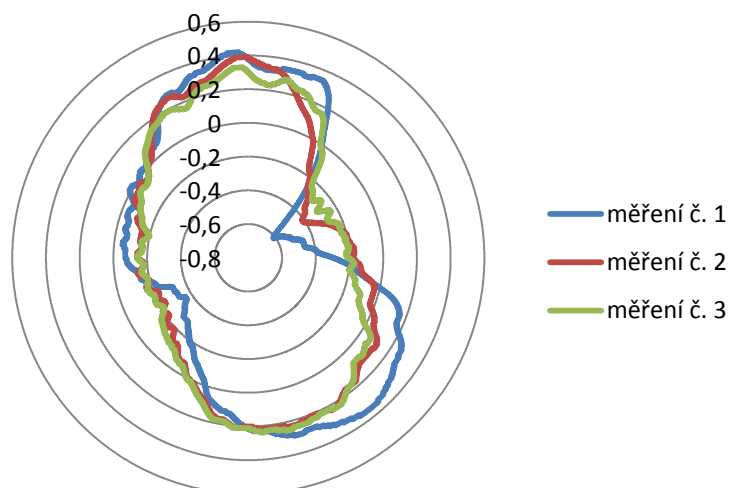
Filtrovaná hodnota 50 upr [μm] MESING



Graf.3.2 - Průběh kruhovitosti, měřeno navrženým snímačem



Filtrovaná hodnota 50 upr [μm] Peter-Hirt



Graf.3.3 - Průběh kruhovitosti, měřeno snímačem Peter-Hirt

Hodnoty kruhovitosti jsou vypočtené jako součet maximální kladné odchylky a absolutní hodnoty největší záporné odchylky.

$$\Delta Z = Z_{max} + |Z_{min}| [\mu\text{m}]$$

Jako další charakteristika bylo zvoleno variační rozpětí. To nám poskytne vhodnější informaci než směrodatná odchylka, neboť máme malý počet měření.

$$R_{\Delta Z} = \Delta Z_{max} - \Delta Z_{min} [\mu\text{m}]$$

Hodnoty jsou tabelárně zpracovány viz. [Tab.3.1].



Tab.3.1 - Vyhodnocení změřených hodnot

Měření č.	JPSU I	
	Kruhovitost ΔZ [μm]	Var. rozpětí $R_{\Delta Z}$ [μm]
1.	0,80	0,80 – 0,76 = 0,04
2.	0,76	
3.	0,76	
průměr	0,77	

Měření č.	Peter-Hirt	
	Kruhovitost ΔZ [μm]	Var. rozpětí $R_{\Delta Z}$ [μm]
1.	1,03	1,03 – 0,64 = 0,39
2.	0,80	
3.	0,64	
průměr	0,82	

Pokud budeme srovnávat zprůměrované hodnoty kruhovitosti naměřené oběma snímači, je rozdíl $0,05\mu\text{m}$, což je velmi dobrý výsledek. Pakliže se zaměříme i na variační rozpětí, dojdeme k závěru, že snímač JPSU I dosahuje výrazně lepší opakovatelnosti, než snímač Peter-Hirt. Pro navržený snímač JPSU I je variační rozpětí rovno $0,04\mu\text{m}$, z čehož vyplývá, že podmínka opakovatelnosti v řádu $1\mu\text{m}$ je splněna.

Z průběhu grafu [Graf.3.3] je zřejmé, že kruhovitost snímaná snímačem Peter-Hirt má rozkmitanější průběh. To můžeme přiřknout na vrub použité tužkové konstrukci snímače, která měla v průběhu měření tendenci uskakovat. Konstrukce snímače JPSU I tedy splňuje podmínky zadání a je vhodná pro aplikaci v zařízení pro měření kruhovitosti.



4 KONSTRUKCE OPTICKÝCH INKREMENTÁLNÍCH SNÍMAČŮ

Princip funkce optických inkrementálních snímačů byl již vysvětlen v kapitole **2.3.10**, proto zde budou rozebrány další atributy. Co se týče konstrukce inkrementálních snímačů, je základní rozdíl ve snímané veličině.

- snímání lineárního posunutí
- snímání úhlového natočení

Druhý případ zde nebude rozebrán, jelikož jeho konstrukce nesouvisí s naší problematikou. My se zaměříme pouze na snímání lineárního posunutí, které se dělí do dvou základních kategorií z pohledu konstrukce.

- páskové optické inkrementální snímače
- dotekové optické inkrementální snímače

Páskové inkrementální snímače jsou používány k odměřování polohy doteku CMM strojů, posuvů obráběcích strojů a vůbec polohy os s automatickým posuvem. Možnosti jejich nasazení jsou pochopitelně širší, tohle jsou pouze nejčastější aplikace.

Dotekové inkrementální snímače jsou postupně se rozšiřující odvětví, které nabízí velmi přesné měření a zachování velmi dobrých měřících rozsahů i kolem 100mm. Další velikou výhodou je nulová chyba linearitu. Ovšem tyto snímače jsou náročné na konstrukci, k čemuž se ale dostaneme.



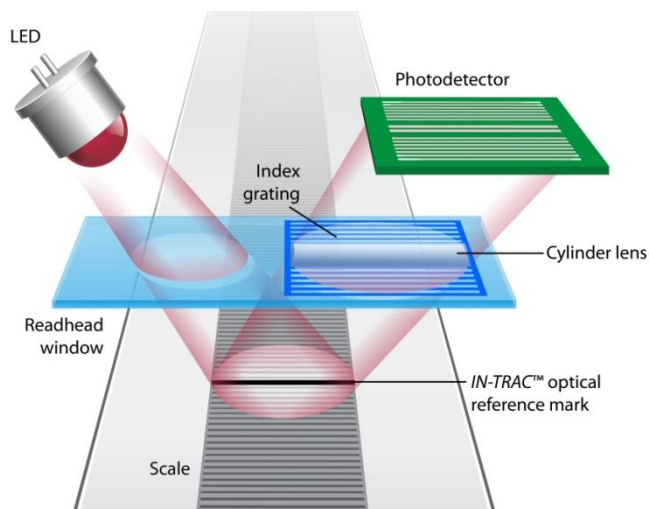
Obr.4.1 - Páskový (vlevo) a dotekový (vpravo) inkrementální snímač



4.1 Popis konstrukce optického inkrementálního snímače

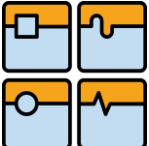
Konstrukce každého optického inkrementálního snímače, který funguje pomocí odrazu, se skládá ze dvou základních částí, které spolupracují bezkontaktně. Jedná se o mikrometrické pravítko, na kterém jsou naleptané světlo odrážející proužky. Nejčastější materiálem je zlato, kterým se pokoví povrch odměřovacích proužků. Nejběžnější dělení stupnice je $20\mu\text{m}$, ale existují i jemnější stupnice, jenž v kombinaci s interpolací dosahují velmi vysokých přesností. Lineární pravítko se dodává v různých délkách a většinou se připevňuje na povrch nalepením.

Druhým prvkem je vysílací a čtecí hlava, která je obsažena v jediné kompaktní součásti. Ta se skládá z LED světelného zdroje, okýnka pro výstup světla, difrakční mřížky na vstupu světla a fotodetektorů. Pásek i čtecí hlava jsou od sebe vzájemně vzdáleny zhruba $0,8\text{mm}$. Tato vzdálenost je velmi důležitá pro vytvoření správných difrakčních obrazců na fotodetektoru. Schematické složení čtecí hlavy je patrné z [Obr.4.2]. Čtecí hlava je přišroubena na protilehlém kusu vedení.



Obr.4.2 - Optický inkrementální snímač

Vzhledem ke složitosti elektronického zapojení snímací hlavičky a její konstrukce byla použita běžně dostupná čtecí hlava od společnosti Renishaw, která nese označení T1011-15A. Cílem práce tedy nebylo zkonstruovat čtecí zařízení, ale pouze nosnou konstrukci, ke které by bylo čtecí zařízení připojeno a tvořilo tak měřící celek.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 67
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

Důležitou součástí optických inkrementálních snímačů jsou jejich chyby. Největší vliv má mimo jiné především teplotní roztažnost stupnice. V případě systémů bez podkladového kovového pásu je teplotní roztažnost shodná s materiálem, na kterém je pásek přilepen. Pokud je použit kovový podkladový materiál, jedná se většinou o ocel s velkým podílem niklu až 36%.

Další chybou, která se vyskytuje, je chyba linearit stupnice. Jedná se o nepřesnost v periodě dělení stupnice. V případě rozsahů větších než 60mm bývají chyby kolem $\pm 3\mu\text{m}$, ovšem do 60mm jsou hodnoty na velmi přijatelné úrovni $\pm 0,75\mu\text{m}$.

Poslední významnější chybou, která se vyskytuje vždy, je tzv. cyklická chyba. Ta vzniká nedokonalostí signálu vycházejícího z fotodetektorů a následné interpolace. Z toho vyplývá, že tato chyba se vyskytuje v rámci jedné periody dělení. Tato chyba je v případě systému Renishaw garantována na hodnotě $\pm 30\text{nm}$.

4.2 Konstrukce základních prvků inkrementálního snímače

Základní prvky inkrementálních snímačů s dotekovou konstrukcí jsou standardní, jako v případě ostatních snímačů. Dalo by se říci, že konstrukčně mohou vycházet inkrementální snímače z indukčních, nebo alespoň některé jejich prvky, např.

- snímací dotek
- kluzné, nebo kuličkové vedení
- těsnění měřidla

Je potřeba použít snímací dotek, který bude odolávat otěru, bude teplotně stálý a dostatečně tvrdý. Stejně tak vedení doteku musí být přesné a mělo by odolávat radiálnímu zatížení atp. Tyto základní vlastnosti však byly popsány v **kap.3.3**.

Mezi základní prvky patří pochopitelně čtecí hlava a lineární měřítko, bez kterých by nebylo měření vůbec možné.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 68
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

4.3 Návrh a konstrukce nestandardního inkrementálního snímače MIS I

Postup pro tvorbu snímače je většinou vždy stejný a proto je rozdělen do stejných kroků jako v případě indukčních snímačů.

Zadání požadavků

Cílem návrhu bylo vytvořit optický inkrementální snímač s měřícím rozsahem do 50mm a dosažení velmi jemného rozlišení. Jako maximální hranice rozlišitelnosti byly stanoveny desítky nanometrů. Bylo nutno použít vhodnou čtecí hlavu, lineární pravítko a rozhraní. Vzhledem k tomu, že se jedná o první produkt fy. MESING pracující s optickým inkrementálním systémem, nejsou požadavky příliš konkretizované. Výsledné metrologické vlastnosti budou vycházet z použitého systému čtecí hlavy, lineárního pravítka a interface. Dá se říci, že se jedná o první testovací snímač. Jsou však parametry, které by měl jako snímač splňovat automaticky, jako je dostatečná tuhost konstrukce, nebo možnost připevnění k měřicímu stojanu.

Návrh

Stejně jako v předcházejícím případě se můžeme inspirovat u konkurence a aplikovat některé jejich konstrukční přístupy na námi vyvíjený snímač. Po zhlédnutí dostupných řešení u společností jako jsou Mitutoyo, Mahr, nebo Heidenhain jsme s pomocí firmy MESING navrhli základní rozložení snímače.



Obr.4.3 - Optický inkrementální snímač Megatron SM 50



Následně byl vybrán nejvhodnější měřicí systém, kterým se díky parametrům a výborné dokumentaci stal systém společnosti Renishaw. Ten obsahuje čtecí hlavu, pravítko a rozhraní. Další výhodou je dostupnost detailní informace o instalaci. Právě díky této dokumentaci byly hned v prvních fázích návrhu dané rozměry a některé parametry, které musíme dodržet pro správnou funkci a instalaci měřicí dvojice hlava-pravítko. Součásti měřicího systému jsou pak následující:

čtecí hlava - T1011-15a
lineární stupnice - RGSZ20
rozhraní (interface) - TI10KDA04A

Očekávané parametry snímací soustavy vychází z dokumentace společnosti Renishaw:

cyklická chyba $\pm 30\text{nm}$
rozlišení 2 nm
certifikovaná přesnost $\pm 1\mu\text{m}$
montážní tolerance $2,1 \pm 0,15\text{mm}$



Obr.4.4 – Měřicí systém Renishaw

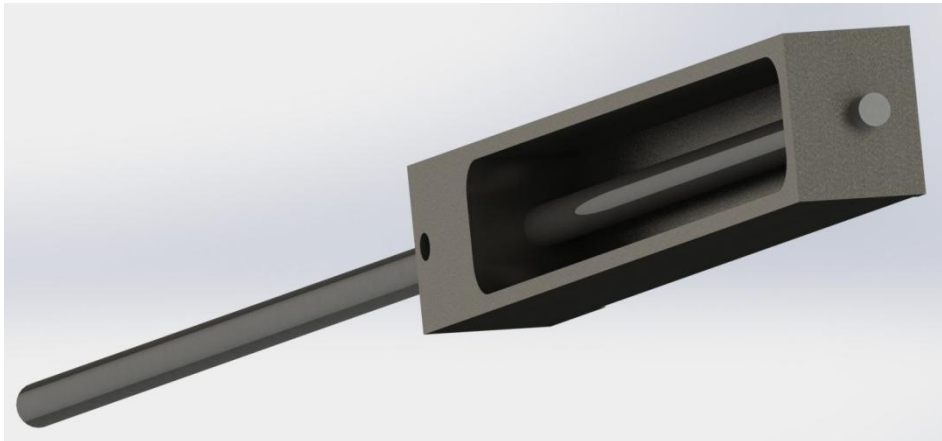
Prvotní návrh tedy počítal s mikrometrickým pravítkem připevněným k doteku snímače a čtecí hlavou připevněnou na nepohyblivou část snímače. Při měření se tedy bude pohybovat pravítko vůči čtecí hlavě. Toto řešení se jeví jako ideální vzhledem k eliminování problému s vedením připojovacího kabelu.

Prvním krokem návrhu byla konstrukce podkladové plochy pro mikrometrickou stupnici. Plocha pod stupnicí musí být rovná a dostatečně dlouhá vzhledem k požadovanému zdvihu snímače. Pakliže rozsah snímače má být do 50mm, musíme použít stupnici s dostatečnou délkou. Délka stupnice byla stanovena na 80mm, čemuž musí odpovídat i podkladová plocha [Př. 13].

Dalším krokem bylo vyřešení spojení měřicího doteku a tělesa se stupnicí, tak aby pohyb doteku vyvolal shodnou změnu polohy stupnice. Spojení bylo realizováno zápichem na snímacím doteku, jenž pasuje do tělesa se stupnicí [Př. 16]. Dotek se následně připevňuje k tělesu zašroubením pomocí závitu M3, který je na vzdálenější

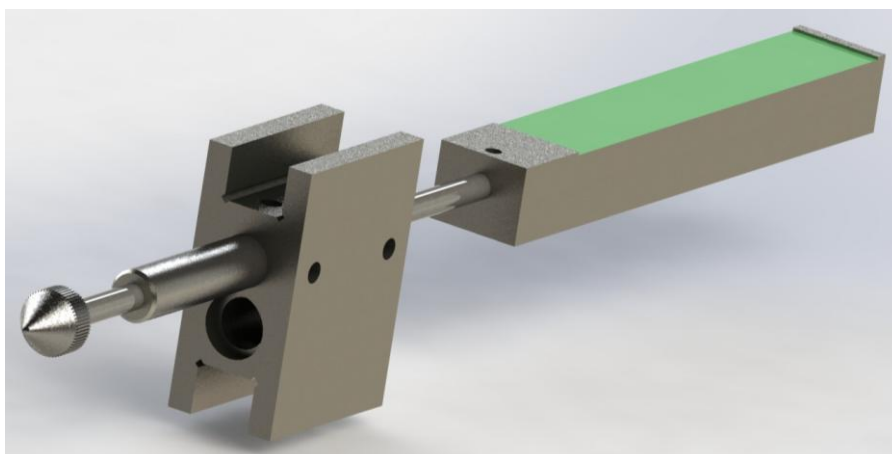


straně tělesa od měřicího hrotu. Přitažením doteku do sebe zapadnou zmíněné zápichy na doteku a na nosiči stupnice. Tak bude zaručeno pevné spojení obou součástí viz. [Obr.4.5]. Stupnice je nalepena na opačné straně tělesa, než je vidět na [Obr.4.5].



Obr.4.5 – Spojení doteku a tělesa se stupnicí

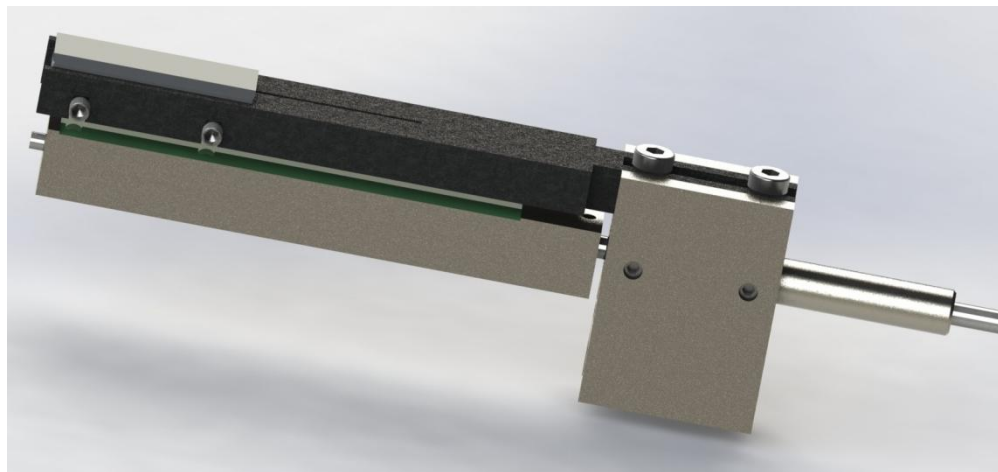
Následně bylo třeba zajistit pohyblivé spojení zbytku snímače se snímacím dotekem. To je realizováno pomocí kluzného vedení o dostatečné délce, aby nedocházelo k odchylce rovnoběžnosti mezi stupnicí a snímací hlavou. Vedení [Př.15] je uchyceno stavěcími šrouby s imbusovou hlavou do členu, který spojuje zbylé důležité části snímače viz. [Obr.4.6]. Spojovací člen [Př.12] obsahuje i průchozí díru pro uchycení pružiny, která bude vracet snímač do výchozí pozice a vyvíjet měřicí sílu snímače.



Obr.4.6 – Kluzné vedení a spojovací těleso

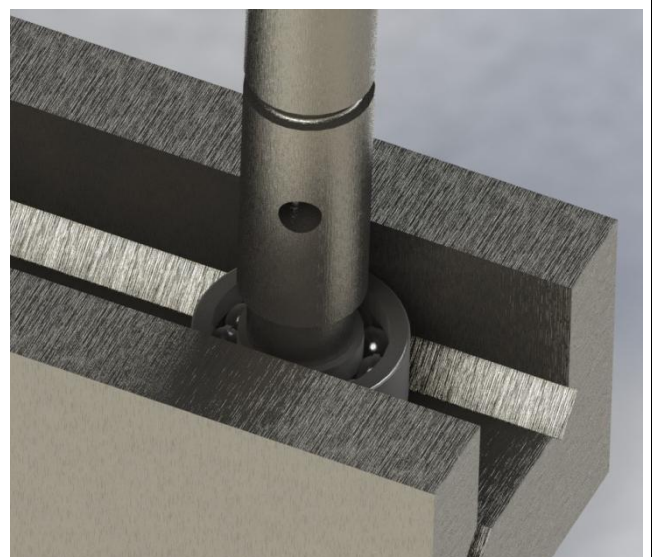


Umístění čtecí hlavy musí být při maximálním vytažení snímače v horní části mikrometrické stupnice, aby při zatlačování snímače byl dodržen měřicí rozsah. Pokud by byla čtecí hlava umístěna příliš blízko měřicímu hrotu, došlo by při zatlačení snímače k přerušení měření, neboť by stupnice byla mimo dosah čtecí hlavy. Díky výkresové dokumentaci k použitému měřicímu systému od Renishaw jsme mohli přesně určit připojovací rozměry čtecí hlavy a zkonstruovat její nosný prvek [Př. 11]. Ten je pevně spojen šrouby se spojovacím členem a tedy i zbytkem snímače viz. [Obr.4.7].



Obr.4.7 – Připevnění čtecí hlavy, nosného členu a spojovacího členu

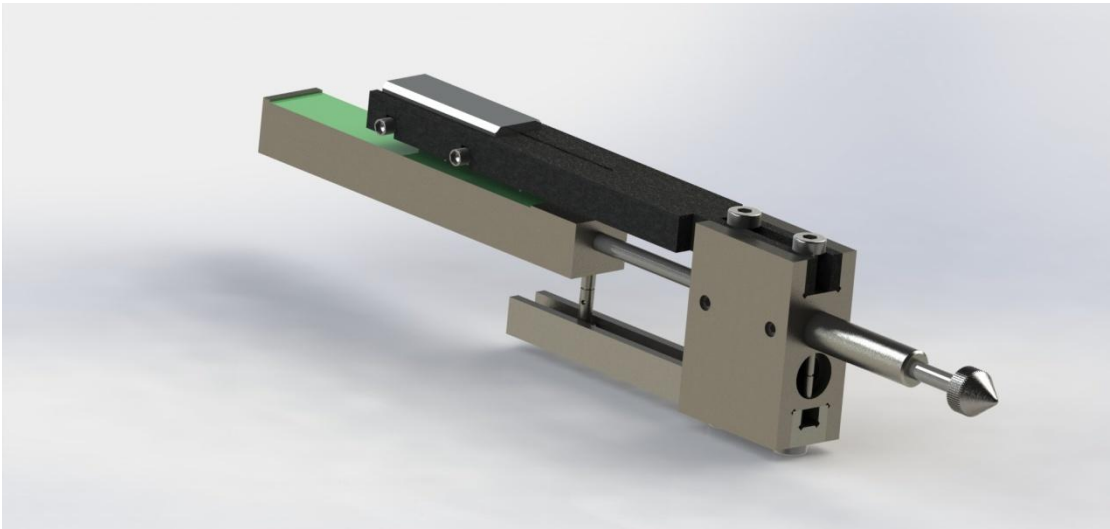
Posledním krokem v návrhu bylo zajistit stupnici proti rotaci kolem osy doteku. Jelikož kluzné vedení dovoluje rotaci, bylo třeba použít další člen, který bude omezovat danou rotaci, ale zároveň bude klást minimální pasivní odpor při měření. Pro minimalizaci těchto odporů bylo po několika návrzích zvoleno velmi malé ložisko, které se bude pohybovat v pevné dráze [Př. 14]. Bude tak zamezeno rotaci doteku a tím i stupnice a zároveň bude dodržen stále hladký chod snímače. Dráha pro ložisko je připevněna ke spojovacímu členu stejným způsobem jako nosný



Obr.4.8 – Ložisko s vodící dráhou



člen čtecí hlavy. Ložisko je pak na čepu [Př.17], který je vešrouben do tělesa se stupnicí. Ten samý kolík je uprostřed opatřen drážkou pro uchycení druhého konce pružiny viz. [Obr.4.8].



Obr.4.9 – Celkový pohled na snímač

Tímto je návrh ukončen a po vyhotovení výkresová dokumentace součástí, které nebyly standardní a bylo třeba je vyrobit.

4.4 Ověření navrženého inkrementálního snímače

Sestavení, zapojení, kalibrace snímače

Jakmile byly vyrobeny a dodány veškeré součásti snímače, byl snímač složen. Během skládání nedošlo k žádným nečekaným problémům.

Po zapojení jednotky snímače k počítači a po instalaci potřebného softwaru dodaného s ostatními prvky Renishaw jsme chtěli provést první měření. Bohužel se však snímač projevil jako velmi nestabilní. Vzhledem k faktu, že snímač je inkrementální, docházelo ke ztrátě předchozích hodnot a snímač se nuloval na nově nastavené polohy. Nedokázal tedy spolehlivě odměřovat inkrementy na požadované délce rozsahu a během změny polohy se občas nuloval.

Po laborování byl stanoven jako hlavní problém nedostatečné dodržování rovnoběžnosti mezi čtecí hlavou a stupnicí, které vedlo ke ztrátě signálu. Jako další možná příčina byl stanoven vliv parazitického světla dopadajícího na fotodetektory



snímače. Toto je snadno odstranitelné dodatečným zapouzdřením snímače tak, aby bylo odstíněno okolní světlo.

4.5 Navržení alternativní konstrukce inkrementálního snímače

Bohužel problém s rovnoběžností stupnice a snímací hlavy byl natolik vážný, že nebylo možné snímač spolehlivě provozovat. Bylo tedy nutné navrhnout alternativní konstrukci snímače tak, aby bylo lépe ošetřeno dodržení rovnoběžnosti. Při návrhu se vycházelo ze současné konstrukce, aby bylo možné použít maximální počet zhotovených součástí s co nejmenšími úpravami. Nebylo možné snímač přepracovat tak, aby nebyly úpravy nutné.

Prvotním krokem úprav bude pochopitelně demontování současného snímače. Následnou změnou na spojovacím tělese [Př.20] je vytvoření dalších děr se závity pro stavěcí šrouby, které budou držet vodící tyč tělesa se stupnicí viz. [Obr.4.10].



Obr.4.10 – Celkový pohled na nový návrh snímače

Další nezbytnou úpravou je vytvoření průchozích děr na součásti se stupnicí [Př.21] tak, aby mohla být nasazena na vodící tyč a přitom se po ní mohla volně pohybovat. Mohlo by stačit zvětšit současné díry na průměr 4,2mm.

Úpravu si vyžádá i dotek [Př.22], který je třeba zkrátit a na vzdálenějším konci od měřicího hrotu opět vytvořit závit M3.

Naopak je velmi dobrá zpráva, že nosič snímací hlavy se nemusí nijak upravovat, pouze se změní jeho pozice vůči spojovacímu členu. Tam, kde byla umístěna dráha pro vedení kuličkového ložiska, bude nyní nosič čtecí hlavy.

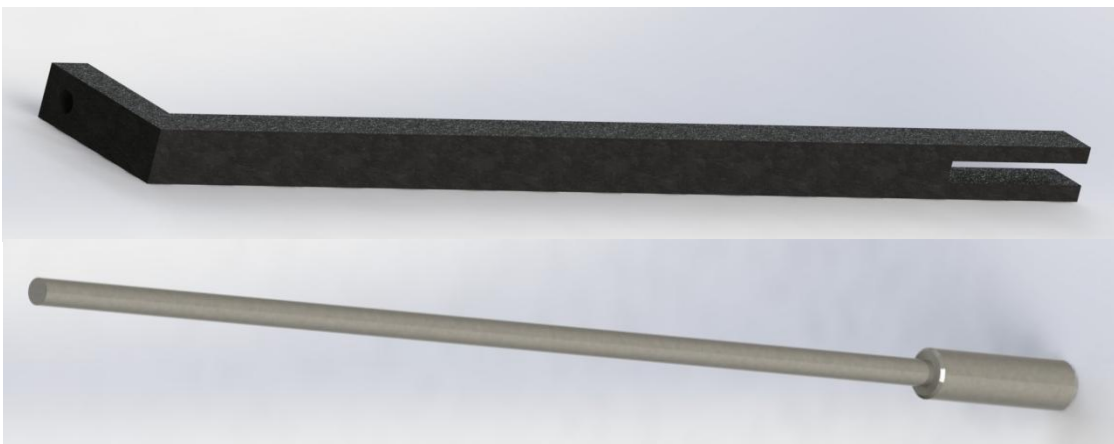


Tato alternativní konstrukce se bohužel nevyhnula tvorbě nových součástí, které jsou kritické pro správnou funkci snímače. První takovou součástí je "šibenice" [Př.23], která je přišroubena ke spojovacímu členu. Její hlavní cíl je upevnit volný konec vodící tyče a tím zajistit rovnoběžnost mikrometrické stupnice a snímací hlavy.

Druhou novou součástí je zmíněná vodící tyč [Př.24], po které se bude pohybovat těleso s nalepenou stupnicí. Tyč je na tenčím konci opatřena závitem M5, který se vešroubí do šibenice a druhý konec je pevně uchycen stavěcími šrouby ve spojovacím členu.

Posledním prvkem je tzv. "poutko" [Př.25], které nahradí čep, na kterém bylo připevněné ložisko. V očku musí být vytvořen závit M3 pro pevné spojení s upraveným dotekem.

Tato alternativní konstrukce má za úkol předejít nastalému problému s rovnoběžností. Její mírnou nevýhodou bude větší hmotnost, především díky "šibenici" a vodící tyči. Určitě se ale jedná robustnější konstrukci a tedy i odolnější vůči vnějším mechanickým vlivům. Výkresová dokumentace nových součástí se nachází v příloze.



Obr.4.11 – Modely nově potřebných součástí pro alternativní konstrukci

Bohužel v současné chvíli nejsou nové součásti dostupné ani zadané do výroby, takže postup do fáze měření je nemožný.





5 ZÁVĚR

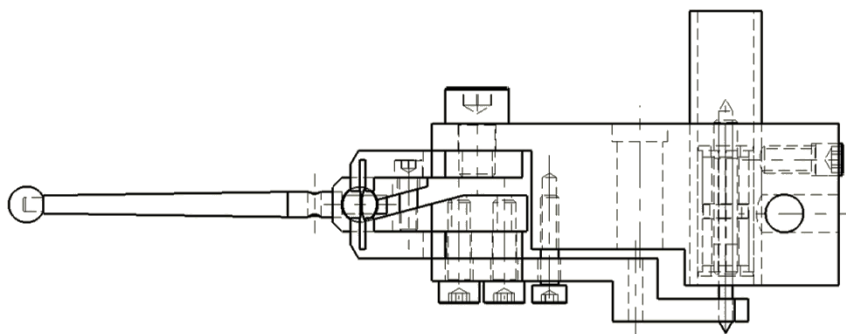
Teoretickou část práce jsem koncipoval jako stručnou příručku nejčastějších způsobů snímání polohy s detailním zaměřením na metody indukčního a inkrementálního snímání. Ačkoli nebylo v zadání práce určeno začlenit i ostatní metody snímání polohy, usoudil jsem, že komplexní seznámení s problematikou snímačů polohy bude jedním z přínosů této práce. Tato teoretická část sloužila jako podklad v dalších fázích návrhu a konstrukce nestandardních snímačů.

Indukční snímač JPSU I

Stěžejním cílem této práce byl návrh a konstrukce nestandardních indukčních a inkrementálních snímačů. Firma MESING vyžadovala zhotovení indukčního snímače s definovanými parametry, které bylo nutné dodržet. Zkrácený výčet hlavních vlastností snímače je následující:

- opakovatelnost snímače, měřicí rozsah, zdvih a rozlišení
- zaměření snímače na měření kruhovitostí
- možnost upevnění k měřicímu stojanu
- využití současných zkušeností firmy s indukčními snímači
- ověření funkce snímače

Co se týče tohoto zadání, **byly veškeré požadavky splněny**. Zhotovený snímač pracuje dle zadání a jeho vhodnost byla ověřena opakovaným měřením v porovnání s odlišnými dostupnými technologiemi. Z výsledků měření můžeme tvrdit, že požadovaná opakovatelnost je splněna s dostatečnou rezervou.



Obr.5.1 – Sestava snímače JPSU I

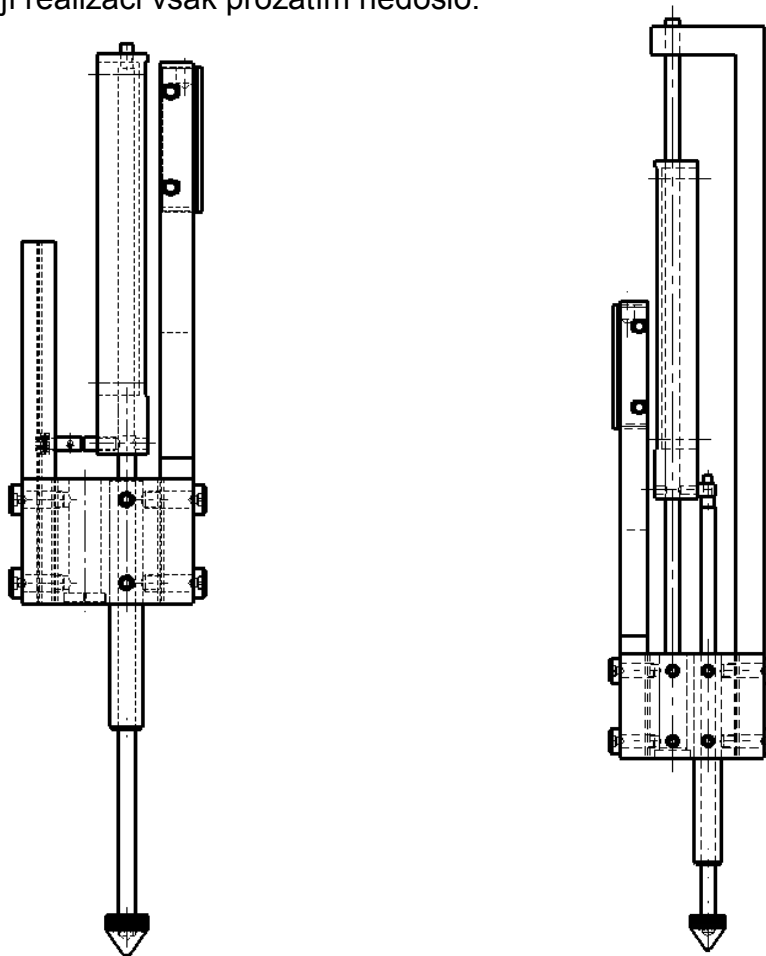


Optický inkrementální snímač MIS I

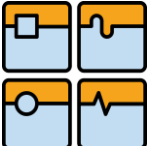
Druhým cílem zadání byla konstrukce inkrementálního snímače. Vzhledem k tomu, že šlo o první pokusy fy. MESING s inkrementálními snímači, byly zadané požadavky nekonkrétní. Cílem tedy bylo:

- dosažení maximálního rozlišení snímače v desítkách nanometrů
- měřicí rozsah snímače 50mm

V případě tohoto inkrementálního snímače MIS I **nebyly cíle zadání naplněny**. Byl dodržen měřicí rozsah a požadovaná rozlišitelnost, ale snímač se projevil jako nestabilní. Tím pádem neplní základní funkci snímače. Důvod tohoto problému byl odhalen, na základě čehož byla navržena alternativní konstrukce snímače. K její realizaci však prozatím nedošlo.




Obr.5.1 – Sestava snímače MIS I (vlevo) a jeho alternativní konstrukce (vpravo)

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 77
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

Použitá literatura

- [1] PERNIKÁŘ.J.-TYKAL.M.-VAČKÁŘ.J.: *Jakost a metrologie, část metrologie*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. 2001 151s. ISBN 80-214-1997-0.
- [2] ČECH,J.-PERNIKÁŘ,J.-JANÍČEK,L.: *Strojírenská metrologie.1. vyd.* Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. 2001 188s. ISBN 80-214-2252-01
- [3] TNI 01 0115 Mezinárodní slovník základních termínů v metrologii.
- [4] PERNIKÁŘ, Jiří. *Kvalita a GPS 2005: sborník přednášek z mezinárodní konference v oboru měření délek, geometrických veličin a struktury povrchu : Brno, 20. a 21. září 2005. 1. vyd.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2005, 112 s. Management jakosti v automobilovém průmyslu. ISBN 80-214-3033-8
- [5] PERNIKÁŘ, Jiří. *Způsobilost kontrolních procesů: použitelnost kontrolních prostředků, vhodnost kontrolních procesů, přihlídnutí k nejistotám měření : 1. vyd. 2003. Vyd. 1.* Praha: Česká společnost pro jakost, 2004, 112 s. Management jakosti v automobilovém průmyslu. ISBN 80-020-1656-4
- [6] PERNIKÁŘ, Jiří. *Strojírenská metrologie II. Vyd. 1.* Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 180 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-3338-8.
- [7] ZELENÝ F.: *Základní vlastnosti měřících přístrojů*, SNTL Praha 1976.
- [8] TESA TECHNOLOGY. *Mehr als 5000 Messgeräte und -systeme. 2003/2004.* Bugon 38 - Switzerland, 2003.
- [9] ŠIMBERSKÝ, M. *Indukčnostní snímače*. Brno, 2011. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce doc. Ing. Ludvík Bejček, CSc.
- [10] Zehnula K.: *Snímače neelektrických veličin*,SNTL,Praha,1988.
- [11] Micro-Epsilon [online]. 1998 [cit. 2011-04-22]. Dostupné z WWW: <<http://www.micro-epsilon.cz>>.
- [12] HEIDENHAIN. [online]. [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: www.heidenhain.cz
- [13] RENISHAW. *Renishaw: zvyšování efektivnosti výroby* [online]. 2001-2013. [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: www.renishaw.cz

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 78
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

- [14] MESING. *Délková měřicí technika MESING* [online]. 2005-2013. [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://mesing.cz>
- [15] MAHR METROLOGY. [online]. [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: www.mahr.cz
- [16] FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ, Vysoké učení technické v Brně. *Indukčnostní snímače* [online]. [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/mereni/Ka03-02.htm>
- [17] VOJÁČEK, Antonín. *Magnetostrikční lineární snímače pohybu* [online]. 2010 [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/magnetostrikcni-linearni-snimace-pohybu>
- [18] AUTOMATIZACE.HW.CZ. *Automatizace.hw.cz: rady a poslední novinky z oboru* [online]. [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz>
- [19] AUTOMA. *Časopis pro automatizační techniku* [online]. [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php>

Použité obrázky

- [1.1] MESING: Měřicí a automatizační technika. [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://mesing.cz/download/prehled.pdf>
- [1.2] Cubit rod. [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: http://3.bp.blogspot.com/-CfGTCEEVd4w/UNdJN-cdehl/AAAAAAAAACpk/wR_NfnqWA68/s1600/SLH21-Cubit-measuring-rods.png
- [1.3] Rozvoj rozměrového třídění a párování součástek. [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/obrazky/mesing2.jpg>
- [2.1] Position Sensor - LBB Series. [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: http://www.meas-spec.com/product/t_product.aspx?id=2640#
- [2.2] [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: http://www.physikinstrumente.com/en/primages/pi_hystcurves_d4c_o_eps.jpg
- [2.3] Číselníkový úchylkoměr. [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: http://www.spstr.pilsedu.cz/osobnistranky/josef_gruber/kom/mereni/uchyl1.jpg
- [2.4] Potenciometrický snímač dráhy. [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: http://www.meatest.cz/ew/ew_images/image_of_object?ObjectIdentifier=pli:db2d44da-753f-488b-af13-872f0495ca09&Filter=77c1217a-447d-4780-83bd-af3cc79a9487&ImageIndex=0&FailImage=b175c0bf-05e4-4c7f-a089-9d3fc3b31245
- [2.5 - 2.7] Magnetostrikční lineární snímače pohybu. [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/magnetostrikcni-linearni-snimace-pohybu>
- [2.8 - 2.11] Micro-Epsilon. [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://www.micro-epsilon.cz/>
- [2.12 - 2.13] WEIGL, M. Název: Měření vibrací. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011.
- [2.14 - 2.16] Balluff: sensors worldwide. [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://www.balluff.com>
- [2.17 - 2.21] ZELENÝ F.: *Základní vlastnosti měřících přístrojů*, SNTL Praha 1976.
- [2.22] [3.1] [3.2] [3.10] TESA TECHNOLOGY. Electronic length measuring equipment. Dostupné z: <http://www.teknikel.com/files/kategori/158/dosya/tesa-elektronik-prob.pdf>

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 80
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

- [2.23] LVDT Signal Conditioner [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://www.lab-systems.com/products/amplifier/a308.html>
- [2.24] ZELENÝ F.: *Základní vlastnosti měřících přístrojů*, SNTL Praha 1976.
- [2.25] Souřadnicové měřící stroje. Dostupné z: http://www.kvs.tul.cz/download/rapid_prototyping/rp1_skripta.pdf
- [2.26 - 2.27] Snímače otáček a polohy. [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: http://www.mti.tul.cz/files/svm/Snimace_polohy.pdf
- [2.28] Magnetické pásky k magnetickým sensorům a kodérům. [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://www.spezial.cz/images/magtape.gif>
- [2.29] Lineární magnetické kodéry s inkrementálním výstupem. [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://www.spezial.cz/news/linearni-magneticke-ekodery-s-inkrementalnim-vystupem.html>
- [2.30] Absolutní snímač pro každou příležitost. [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: http://www.mmspektrum.com/content/image/gallery/03_2013_24_1362482291/renishaw_obr_01.jpg
- [3.3] SMUTNÝ: *Snímač M8 - sestava. 1. vyd.* Brno: MESING, 2006
- [3.7 - 3.9] Mahr. [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://www.mahr.cz/>
- [3.19] Prostorová charakteristika textury povrchu. [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prostorova-charakteristika-textury-povrchu.html>
- [4.1] [4.4] Renishaw. [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/>
- [4.3] HEIDENHAIN. [online]. [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: www.heidenhain.cz
- [] Obrázky a grafy, které nejsou uvedeny ve zdrojích jsou vytvořeny autorem této práce.



Použité zkratky

Zkratka	Název	Jednotka SI
ϵ_r	relativní permitivita dielektrika	[-]
m.r.	měřicí rozsah	[mm]
L	indukčnost	[H]
n_z	počet závitů	[-]
R_m	magnetický odpor	[Ω]
μ_v	permeabilita vzduchu	[H.m ⁻¹]
μ_r	relativní permeabilita jádra	[H.m ⁻¹]
S	plocha	[m ²]
d	vzdálenost	[m]
Z	impedance	[Ω]
R	odpor	[Ω]
ω	úhlová frekvence	[rad.s ⁻¹]
U	napětí	[V]
I	proud	[A]
U_i	indukované napětí	[V]
L_f	chyba linearity	[dle veličiny]
U_h	hallovo napětí	[V]
B	magnetická indukce	[T]

Seznam jednotek

Jednotka	Název
m ²	metr čtverečný
m	metr
mm	milimetr
μm	mikrometr
nm	nanometr
H	henry
Ω	ohm
H.m ⁻¹	henry na metr
rad.s ⁻¹	radián za sekundu
V	volt
A	ampér
T	tesla

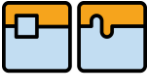


Seznam příloh

- [Př.1] Sestava – JPSU I
- [Př.2] Výkres – JPSU I - Horní nosič
- [Př.3] Výkres – JPSU I - Dolní nosič
- [Př.4] Výkres – JPSU I - Těleso
- [Př.5] Výkres – JPSU I - Čep
- [Př.6] Výkres – JPSU I - Planžeta
- [Př.7] Výkres – JPSU I - Nosič
- [Př.8] Výkres – JPSU I - Držák doteku
- [Př.9] Výkres – JPSU I - Dotek

- [Př.10] Sestava – MIS I
- [Př.11] Výkres – MIS I - Nosič hlavy
- [Př.12] Výkres – MIS I - Těleso 1
- [Př.13] Výkres – MIS I - Těleso 2
- [Př.14] Výkres – MIS I - Vodítko
- [Př.15] Výkres – MIS I - Kluzné pouzdro
- [Př.16] Výkres – MIS I - Dotek
- [Př.17] Výkres – MIS I - Čep
- [Př.18] Výkres – MIS I - Kolík

- [Př.19] Sestava – MIS I Alternativ
- [Př.20] Výkres – MIS I Těleso 1_Altativ
- [Př.21] Výkres – MIS I Těleso 2_Altativ
- [Př.22] Výkres – MIS I Dotek_Altativ
- [Př.23] Výkres – MIS I Šibenice

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 83
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

[Př.24]Výkres – MIS I Vodící tyč

[Př.25]Výkres – MIS I Poutko