VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

NÁVRH MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ PRO KALIBRACI SNÍMAČŮ DÉLKY

DESIGN OF A MEASURING EQUIPMENT FOR DISTANCE SENSORS CALIBRATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Lukáš Zindler

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. Vojtěch Štěpánek

SUPERVISOR

BRNO 2021

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	**Lukáš Zindler**
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Stavba strojů a zařízení
Vedoucí práce:	**Ing. Vojtěch Štěpánek**
Akademický rok:	2020/21

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

Návrh měřicího zařízení pro kalibraci snímačů délky

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Výrobní technologie se stále zpřesňují a s nimi i požadavky kladené na následné měření. Mezi základní vlastnosti, které ovlivňují přesnost a nejistotu měření, je citlivost a linearita použitých snímačů. Měřením linearity senzoru v jeho pracovním rozsahu a následné kompenzace odchylek může umožnit zpřesnění výsledků získaných měřicí stanicí, ve které je použit.

Cíle bakalářské práce:

Rešeršní zpracování současného stavu poznání v oblasti senzoriky (používané technologie měření přesnosti snímačů, výhody a nevýhody jednotlivých typů, atd.).
Návrh několika konceptů měřicího přípravku, definice postupu měření a vyhodnocení dat, díky kterému je možné určit délkové odchylky senzoru.
Definice kritérií výběru pro volbu optimální varianty.
Detailní zpracování konstrukčního řešení zvoleného konceptu měřicí stanice.
Oživení měřicí stanice a sběr dat.
Vyhodnocení dat a užití při kompenzaci senzoru.
Závěr, vyhodnocení a doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů IV.0. Praha: MM publishing, 2018. MM speciál. ISBN ISBN978-80-906310-8-3.

SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R MISCHKE a Richard G BUDYNAS, VLK, Miloš, ed. Konstruování strojních součástí. V Brně: VUTIUM, 2010, xxv, 1159 s. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.

TICHÁ, Šárka. Strojírenská metrologie. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2004. ISBN ISBN978-80-248-0671-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D. ředitel ústavu	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem kalibračního zařízení pro indukčnostní snímač délky. V teoretické části je zpracován základní přehled v metrologii a stav poznání v oblasti snímačů. V praktické části je navrhnuto několik konceptů měřících přípravků, vybráno a sestaveno vhodné kalibrační zařízení a na závěr provedena kompenzace systematické chyby snímače.

KLÍČOVÁ SLOVA

Návrh zařízení, snímače, indukčnostní snímače, kompenzace chyby, metrologické pojmy

ABSTRACT

This study aimed deals with the design of a calibration equipment for an inductive distance sensor. The theoretical part provides a basic overview of metrology and the state of knowledge in the field of sensors. In the practical part, several concepts of measuring equipment are suggested, a suitable calibration equipment is selected and assembled, and at last the compensation of the systematic error of the sensor is performed.

KEYWORDS

Equipment design, sensors, inductive sensors, error compensation, metrological concepts

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ZINDLER, L. *Návrh měřícího zařízení pro kalibraci snímače délky*. Brno, 2021. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Vojtěch Štěpánek.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Vojtěcha Štěpánka a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 21. května 2021 ……..…….

Lukáš Zindler

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Vojtěchu Štěpánkovi za konzultace a pomoc při zpracování odborných problémů. Díky patří také mému otci Danielu Zindlerovi za praktické rady a celé mojí rodině a nejbližším přátelům za podporu v době studia.

OBSAH

Úvod **11**

1 Metrologie **12**
1.1 Historie metrologie 12
1.2 Současný stav metrologie 12
1.3 Základní pojmy v metrologii 13

2 Snímače neelektrických veličin **17**
2.1 Charakteristika snímačů 17
2.2 Rozdělení snímačů mechanických veličin 18
2.3 Indukčnostní snímače 19
2.3.1 Indukčnostní snímače s malou vzduchovou mezerou 19
2.3.2 Indukčnostní snímače s otevřeným magnetickým obvodem 20
2.3.3 Indukčnostní snímače s potlačeným polem 22
2.3.4 Indukčnostní snímače bez feromagnetika 22

3 Návrh konceptů měřícího zařízení **23**
3.1 Varianta A 23
3.2 Varianta B 24
3.3 Varianta C 24
3.4 Volba výsledného konceptu 25

4 Konstrukční zpracování zvoleného konceptu **27**
4.1 Snímač Mesing T102V 27
4.2 Lineární osa 27
4.3 Upínač snímače a základová deska 29
4.4 Laserový interferometr Renishaw XL-80 30

5 Vlastní měření **33**
5.1 Příprava měření 33
5.2 Oživení měřící stanice 33
5.3 Naměřené hodnoty 34
5.4 Vyhodnocení naměřených hodnot 34

Závěr **37**

Použité informační zdroje **38**

Seznam použitých zkratek a symbolů **40**

Seznam příloh **42**

ÚVOD

S rychle rostoucím vývojem nových technologií se zvyšují i požadavky kladené na jakost výroby. S tím úzce souvisí pojmy „Strojírenská metrologie“ a „Jakost výroby, výrobků a služeb“. Strojírenská metrologie drží krok s nejmodernějšími trendy techniky a neustále posouvá dále možnosti a hranice této oblasti.

V mnoha případech se postupně přechází od klasického měření konvenčními měřidly tak jak ho známe, k metodám, při kterých se využívají různé druhy snímačů. Měřící snímače, a zvláště snímače pro měření neelektrických veličin, získaly v posledních letech své místo převážně v oblasti velkosériové kontroly jakosti výrobků či v jednoúčelových měřících stanicích. Pro co nejlepší výsledky měření je potřeba eliminovat negativní vlivy na průběh měření a měření samotné. Jedním z takových vlivů může být například chyba snímače, která je následně vnášena do výsledků měření.

Jelikož kalibrace snímačů je obecně velmi složitá a choulostivá věc, myšlenkou této práce bylo zkonstruování zařízení, které by tuto práci ulehčilo. Kalibrace vychází z metrologických pojmů a pro pochopení základních principů a vazeb ve strojírenské metrologii je v prvních částech této práce uveden výčet některých definic. Pro porozumění následujícím kapitolám je nutné znát tyto definice alespoň v základní šířce jejich rozsahu.

Další část práce se zabývá obecně přehledem poznání v oblasti senzoriky, a to především se zaměřením na snímače indukčnostní. Právě polomostový indukčnostní snímač byl vstupním členem této práce, pro který bylo navrhované zařízení konstruováno za účelem kalibrace. Zrod indukčnostních snímačů se datuje již k roku 1958. Od této doby prošly snímače různými vývoji, kterým také přispěla skutečnost, že vynalezení moderních elektronických prvků, jako jsou například integrované obvody, dopomohly k jejich nynější formě.

Tahle forma, jak ji známe například v podobě tužkového snímače, ovšem není dokonalá sama o sobě. Jelikož má snímač velkou systematickou chybu nelineárního charakteru, je nutno tuto chybu kompenzovat. Z výsledků kalibrace indukčnostního snímače můžeme zjistit průběh odchylky, její velikost a následně pomocí matematických vztahů tuto odchylku kompenzovat příslušnými výpočty. Užitím poté kompenzovaného snímače v praxi na měřícím zařízení získáme nižší nejistotu měření, což nám může zajistit přesnější výrobu a s tím i spojené výhody. Metodou kompenzace chyby snímače se zabývá poslední část této bakalářské práce.

1 METROLOGIE

Podle kvalifikovaných odhadů představují náklady spojené s měřením 10 až 15 % výrobních nákladů. Celkové náklady na měření činí asi 6 % celkového hrubého domácího produktu v Evropě. [1] Metrologie je vědní a technická disciplína která se zabývá měřením nejen v oblasti technologie a výroby ale také ve všech oblastech vědy, hospodářství, obrany, ochrany zdraví a životního prostředí a mnoha dalších odvětví. Jednotné a přesné měření je velmi důležité pro obchodní trh a směnu zboží. Také je jednou z nutných podmínek pro kvalitní a efektivní výrobu. Při globalizaci výroby je nutné pro zajištění návaznosti montáže různých dílů v jeden kus mít sjednocený metrologický systém. Jak již řekl lord Kelvin platí, že co nelze změřit, nelze ani vyrobit. [2]

1.1 HISTORIE METROLOGIE

Metrologie má své kořeny již před více než 3000 lety. První národy s vlastní měrovou soustavou byly Babyloňané a Asyřané, kteří již měli pravděpodobně normalizované závaží pro zjišťování hmotnosti zlatých a drahých předmětů. Pozdější národ s velmi rozvinutou technikou měření byly Egypťané, kteří tyhle poznatky využívali především ve výstavbě pyramid. [1]

Rozvoj moderní vědy a průmyslové výroby přinesl růst požadavků na přesnost a jakost výroby. Odtud vzešla nutnost vytvoření konzistentní soustavy jednotek a sjednocení způsobu vyjadřování výsledků. Pouhá jednotnost na území jednoho státu nestačila a s rozvojem mezinárodního obchodu přišla myšlenka globálního řešení. Ta po Velké francouzské revoluci přišla s prosazením jednotného desetinného metrického systému a k mezinárodní dohodě, zvané Metrická konvence. K připojení prvních států k této konvenci došlo již v roce 1875. Česká republika je signatářem Metrické konvence už od svého prvopočátku jakožto nástupnický stát Rakouska-Uherska. [2]

1.2 SOUČASNÝ STAV METROLOGIE

„V současné době jsou (kromě vědeckého a technického pokroku) hnací silou rozvoje metrologických systémů politické a hospodářské změny, spočívající v otevírání ekonomik globálnímu trhu, v uvolňování pohybu zboží a odstraňování technických překážek obchodu. Historickými mezníky bylo sjednání Metrické konvence a v současnosti podepsání Ujednání o vzájemném uznávání státních etalonů a certifikátů vydávaných národními metrologickými instituty (CIPM MRA) – kromě členských států Metrické konvence využívá jeho výhod i 23 přidružených států a ekonomik k CGPM.“ [2]

Metrologie se dělí na metrologii vědeckou, legální a průmyslovou, přičemž vědecká metrologie se zabývá zkoumáním základních přírodních zákonů a současně využívá všech nových poznatků pro zvyšování přesnosti experimentálních činností. Metrologie legální shrnuje všechny normy, zákony a vyhlášky v metrologii. Praktickou činností a aplikací měřících postupů se zabývá metrologie průmyslová, nazývaná někdy také jako podniková. [3] [4]

„Metrologie obecně plní tři hlavní úkoly:

- definuje mezinárodně uznávané měřicí jednotky (např. metr),
- realizuje měřicí jednotky pomocí vědeckých metod (např. realizace metru s využitím laserových paprsků),
- vytváří řetězce návaznosti při dokumentování správnosti měření (např. dokumentovaná návaznost mezi noniem mikrometru v provozu přesného strojírenství a primární laboratoří metrologie délky).“ [3]

Současná metrologie v posledních letech upustila od chybového přístupu zpracování nejistoty a začala využívat přístup nejistotní. Ten udává interval, do kterého s největší pravděpodobností padne výsledek měření, přičemž cílem není co nejtěsnější určení pravé hodnoty veličiny. Rozpětí intervalu se zužuje dodatečnými relevantními informacemi, které však nedokážou tento interval zúžit na jedinou hodnotu. [3]

1.3 ZÁKLADNÍ POJMY V METROLOGII

Přesně a jednotně definované pojmy v metrologii jsou stanoveny v Mezinárodním metrologickém slovníku TNI 01 0115. Tato norma je terminologickým slovníkem a napomáhá ve vzájemné komunikaci v odborných kruzích i mezi obchodníky. [2]

JAKOST, KVALITA

„Jakost; kvalita: je stupeň plnění požadavků souborem inherentních znaků. Termín „jakost“ se může používat s přívlastky, např. špatná, dobrá nebo vynikající.“ [4]

„Kontrola jakosti je charakterizována činností jako měření, zkoumání, zkoušení, porovnávání pevnou měrkou (kalibrem) jednoho nebo několika znaků výrobku nebo služby a jejich porovnání se specifikovanými požadavky s cílem určit shodu.“ [5]

PRAVÁ HODNOTA VELIČINY

Pravá hodnota, též nazývána jako skutečná hodnota, je taková hodnota, „která je ve shodě s definicí veličiny“ [3] a byla by získána naprosto přesným měřením. V praxi je tato hodnota považována za nepoznatelnou, jelikož naměřené hodnoty budou vždy získány s nějakou chybou.

NAMĚŘENÁ HODNOTA VELIČINY

Naměřená hodnota je „hodnota veličiny reprezentující výsledek měření.“ [3] Výsledek měření je poté brán jako naměřená hodnota veličiny s příslušnou nejistotou měření. [6]

KONVENČNÍ HODNOTA VELIČINY

Konvenční hodnota je „hodnota veličiny přiřazená pro daný účel k veličině dohodou.“ [3]

Nejistota této veličiny bývá přiměřeně malá (mohla by být i nulová) a vyhovující pro daný účel. Konvenční hodnota se stanovuje z velkého počtu výsledků měřené veličiny. [5]

JMENOVITÁ HODNOTA VELIČINY

Jmenovitá hodnota je „zaokrouhlená nebo přibližná hodnota charakterizující veličinu, která poskytuje vodítko pro příslušné použití měřidla nebo měřícího systému.“ [3] Bývá stanovena normou nebo výkresem a porovnává se s naměřenou hodnotou jako odchylka hodnoty veličiny, počítána jako naměřená hodnota veličiny minus jmenovitá hodnota veličiny. [6]

PŘESNOST MĚŘENÍ

Přesnost měření je „těsnost shody mezi naměřenou hodnotou veličiny a pravou hodnotou veličiny měřené veličiny.“ [3] Z měření, které je zatíženo chybami nelze přesně stanovit pravou hodnotu veličiny, „lze však určit nejpravděpodobnější hodnotu veličiny a současně odhadnout i její přesnost.“ [5]

CHYBA MĚŘENÍ

Chyba měření je stanovena jako „naměřená hodnota veličiny minus referenční hodnota veličiny.“ [3] Referenční hodnotou může být pravá hodnota veličiny měřené veličiny nebo konvenční hodnota veličiny s přidruženou nejistotou měření. Vyčíslená hodnota chyby se používá pro korekce naměřené hodnoty před vyjádřením výsledku dalších měření. [6] Chyby měření vznikají důsledkem nedokonalosti lidských smyslů, nepřesností použitých měřidel a také nemožností zcela vyloučit rušivé vlivy. Dělí se na hrubé chyby, náhodné chyby a systematické chyby. [5]

- HRUBÉ CHYBY MĚŘENÍ

Hrubé chyby jsou způsobeny špatným postupem měření, závadou na měřidle nebo nesprávným odečtením či zápisem hodnoty. Projevují se podstatnou odchylkou jedné naměřené hodnoty veličiny od hodnot ostatních ve stejné sérii měření. Hrubé chyby jsou odstranitelné a je potřeba se jim zcela vyvarovat. [5]

- NÁHODNÉ CHYBY MĚŘENÍ

Náhodná chyba měření je „složka chyby měření, která se v opakovaných měřeních mění nepředvídatelným způsobem.“ [3] „Referenční hodnotou veličiny pro náhodnou chybu měření je aritmetický průměr, který by se získal z nekonečného počtu opakovaných měření téže měřené veličiny.“ [3] Náhodná chyba značně ovlivňuje nejistoty měření.

- SYSTEMATICKÉ CHYBY MĚŘENÍ

Systematická chyba je „složka chyby měření, která v opakovaných měřeních zůstává konstantní nebo se mění předvídatelným způsobem.“ [3] Tato chyba a její příčina může být známá či neznámá, přičemž známou chybu dokážeme kompenzovat korekcí. [3]

KOREKCE MĚŘENÍ

Korekce je „kompenzace systematického vlivu“ [3] Její hodnota se připočítává k nekorigovanému výsledku měření pro kompenzaci systematické chyby. Je dána frekvenční funkcí tzv. normovaného normálního rozdělení [4]:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)}{2\sigma^2}} \tag{1}$$

kde σ je směrodatná odchylka základního souboru, σ^2 rozptyl základního souboru, x jsou výsledky měření (případně chyby) a μ je střední hodnota základního souboru.

NEJISTOTA MĚŘENÍ

Nejistota je „nezáporný parametr charakterizující rozptýlení hodnot veličiny přiřazené k měřené veličině na základě použité informace.“ [3] Nejistota měření může být parametrizována směrodatnou odchylkou nazývanou jako standartní nejistota měření (či jejím násobkem) nebo polovinou šířky intervalu stanoveného pravděpodobností pokrytí. Obecně bývá složena z mnoho složek, které se vyhodnocují dvěma způsoby, a to způsobem A a způsobem B. [3]

- NEJISTOTA TYPU A

Nejistota typu A je „vyhodnocení složky nejistoty měření statistickou analýzou naměřených hodnot veličiny získaných za definovaných podmínek měření.“ [3] Je získaná z opakovaných měření jako směrodatná odchylka. Podmínky měření mohou být například podmínka opakovatelnosti měření nebo podmínka reprodukovatelnosti měření. Aritmetický průměr:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \tag{2}$$

kde n je počet měření a x jsou výsledky měření.

Směrodatná odchylka aritmetického průměru je poté vyjádřena pomocí vztahu [7]:

$$s_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n}(\bar{x} - x_i)^2} = u_A \tag{3}$$

kde u_A je standartní nejistota typu A.

- NEJISTOTA TYPU B

Nejistota typu B je „vyhodnocení složky nejistoty měření stanovené jinými způsoby než vyhodnocením nejistoty měření způsobem A.“ [3] Možné zdroje nejistot pro určení nejistoty typu B:

- Vlivy vázané na použité přístroje, etalony a vybavení.
Sem mohou spadat nejistoty kalibrace nebo ověření, chyby přístrojů, hystereze, stabilita přístrojů atd.

- Vlivy okolního prostředí a jejich změny.
Tyhle vlivy souvisí se změnou tlaku, relativní vlhkostí, magnetickým či elektrickým polem, osvětlením a podobně.

- Vlivy metody a vlivy operátora.
Jelikož nic není dokonalé, je potřeba započítat i faktory jako vlastní ohřev měřící soustavy, odvod či přestup tepla, nejistota použitých konstant, optická paralaxa či nedodržení metodiky. [7]

- KOMBINOVANÁ NEJISTOTA MĚŘENÍ

Kombinovaná nejistota je vyjádřena jako „standardní nejistota měření, která je získána použitím individuálních standardních nejistot měření přidružených ke vstupním veličinám v modelu měření.“ [3] Je dána vztahem [7]:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \tag{4}$$

kde u_B je nejistota typu B.

ROZŠÍŘENÁ NEJISTOTA MĚŘENÍ

Rozšířená nejistota je „součin kombinované standardní nejistoty měření a koeficientu většího než číslo jedna“ [3] vypočítaná ze vztahu [7]:

$$U = k_u \cdot u_c \tag{5}$$

Za předpokladu normálního (Gaussova) rozdělení měřené veličiny se standardně používá koeficient $k_u = 2$ což odpovídá pravděpodobnosti pokrytí asi 95 %. [7]

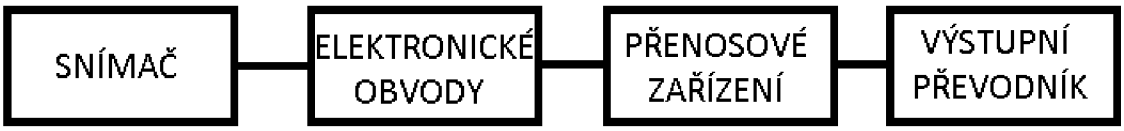
ODCHYLKA HODNOTY VELIČINY

Odchylka hodnoty veličiny je definována jako naměřená hodnota veličiny minus jmenovitá hodnota veličiny. [6]

2 SNÍMAČE NEELEKTRICKÝCH VELIČIN

Použití snímačů, je hojně rozšířeno ve všech odvětvích strojírenství, a to jak ve výzkumu, vývoji, výrobě tak i v provozu zařízení. Aplikace snímačů, které umožňují měření neelektrických veličin (dráha, teplota, síla atd.) pomocí elektrického výstupu, je uplatňována především v případech, kdy je neelektrická metoda měření nedostatečná pro daný účel. Elektrická metoda měření má značné výhody zvláště v přesnosti a citlivosti měření, větší rychlosti měření nebo například v možnosti automatického záznamu dat z měření. Naproti tomu nevýhody této metody mohou být pořizovací nebo provozní náklady a požadavky na kvalifikaci obsluhy.

Snímače jsou součástí měřící soustavy, jak je uvedeno na *[Obr. 1]*, kdy snímač plní funkci vstupního členu a převádí neelektrický signál na signál elektrický. Na to navazuje část elektronických obvodů, které upravují signál na požadovaný tvar, který je dále posílán např. do počítače nebo výstupního převodníku. Výstupní převodník převádí elektrickou veličinu na veličinu výstupní. [4]



Obr. 1 Blokové schéma měřící soustavy

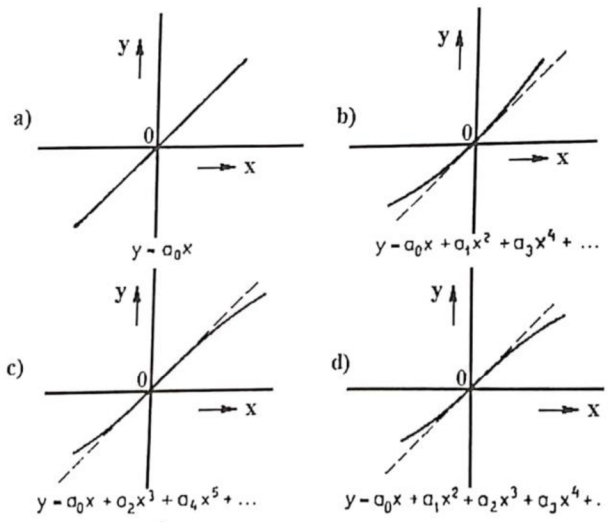
2.1 CHARAKTERISTIKA SNÍMAČŮ

Při měření může mít měřená veličina charakter statický nebo dynamický. U veličin statických je požadována především lineární závislost mezi vstupní a výstupní veličinou. Při měření dynamické veličiny je důležité před odečtením hodnoty měřené veličiny pro získání relevantního výsledku uvažovat určitou dobu pro ustálení veličiny. Během této doby je chyba měření větší než statická chyba. Závislost mezi vstupní a výstupní veličinou můžeme obecně popsat vztahem [8]:

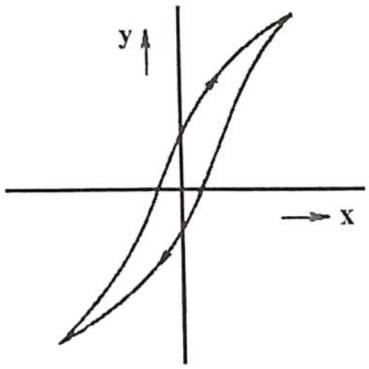
$$y = (a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \cdots + a_n x^n)x \tag{6}$$

kde y je výstupní veličina, x je vstupní veličina, a jsou konstanty.

V určitých případech může docházet ke zkreslení charakteristiky například reverzibilitou (hysterezí). Reverzibilita je schopnost měřícího přístroje udávat stejnou hodnotu indikované veličiny, je-li dosaženo téže konvenční hodnoty měřené veličiny při jejím spojitém vzestupu i poklesu. Tato chyba může být způsobena vnitřními odpory v měřícím zařízení, např. vratná pružina nebo tření v pohyblivých částech zařízení. Běžně vyskytující se typy hystereze jsou hystereze mechanická, magnetická nebo dielektrická. [9]



Obr. 2 Přenosové charakteristiky snímačů [8]



Obr. 3 Deformace charakteristiky hysterezí [8]

2.2 ROZDĚLENÍ SNÍMAČŮ MECHANICKÝCH VELIČIN

Základní rozdělení snímačů se dělí podle způsobu snímání vstupní veličiny. To může být dotykové nebo bezdotykové. Další rozdělení se uvádí podle jejich chování, a to jako aktivní nebo pasivní. Aktivní snímač se při působení neelektrické veličiny chová jako zdroj elektrické energie. U pasivního snímače dochází při působení neelektrické veličiny ke změně některého z jeho parametrů. [4]

Rozdělení snímačů dle principu:

- Indukčnostní snímače
- Odporové snímače
- Kapacitní snímače
- Fotoelektrické snímače
- Ostatní speciální snímače [4]

Dále se budu zabývat pouze snímači indukčnostními souvisejícími s praktickou částí této práce.

2.3 INDUKČNOSTNÍ SNÍMAČE

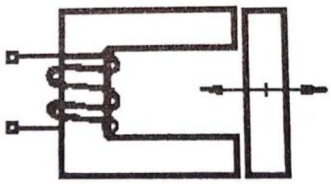
Indukčnostní snímače se řadí do rozsáhlé skupiny pasivních snímačů. K měření využívají principu elektromagnetické indukce a do obvodu jsou zapojovány s pomocným střídavým napětím. Indukčnostní snímač se obvykle sestává z cívky a jádra. Následným působením neelektrické veličiny dochází k vzájemnému posunu či změně elektrických vlastností těchto částí, čímž se mění indukčnost. Vstupní veličina může působit na cívku (vstup do cívky) nebo na jádro (vstup do jádra). [8]

Podle způsobu uspořádání cívky, popřípadě magnetického obvodu, můžeme indukčnostní snímače rozdělit do čtyř základních skupin:

- Indukčnostní snímače s malou vzduchovou mezerou
- Indukčnostní snímače s otevřeným magnetickým obvodem
- Indukčnostní snímače s potlačeným polem
- Indukčnostní snímače bez feromagnetika [8]

2.3.1 INDUKČNOSTNÍ SNÍMAČE S MALOU VZDUCHOVOU MEZEROU

Jedná se o základní a nejrozšířenější typ pro měření geometrických rozměrů a dalších veličin. Pracují na principu změny impedance cívky způsobené změnou velikosti vzduchové mezery mezi feromagnetickým jádrem cívky a tělesem.



Obr. 4 Indukčnostní snímač s malou vzduchovou mezerou [5]

Indukčnost cívky určíme ze vztahu [8]:

$$L = \frac{n_z^2}{R_m} \tag{7}$$

kde L je indukčnost, n_z počet závitů cívky a R_m magnetický odpor.

Magnetický odpor R_m lze vyjádřit pomocí rovnice [8]:

$$R_m = \frac{2 \cdot d}{\mu_v \cdot S} \tag{8}$$

kde d je velikost vzduchové mezery, S plocha na koncích feromagnetického jádra a μ_v udává permeabilitu vzduchu.

Jelikož plocha na koncích jádra i permeabilita vzduchu jsou konstantní, proměnným parametrem je tudíž pouze vzduchová mezera d. Ze vzorce pro impedanci cívky poté vyplývá, že jedinou proměnnou hodnotou je indukčnost cívky.

$$Z = R + j\omega L \tag{9}$$

kdy Z je indukčnost cívky, j označuje imaginární složku, ω je úhlová frekvence a R odpor cívky který se zanedbává. L je hodnota indukčnosti, která je jedinou proměnnou.

Pakliže převedeme impedanci na obecný vzorec, můžeme měřit proud I.

$$Z = \frac{U_s}{I} \tag{10}$$

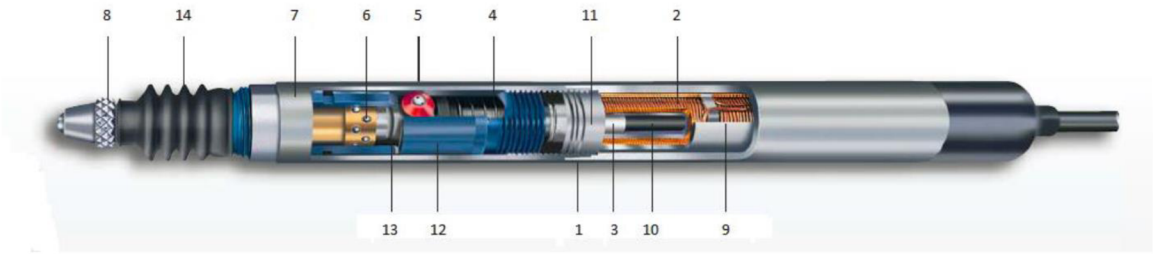
kde U_s je napětí a I proud.

Se zvětšující se vzdáleností d roste i magnetický odpor R_m. Zvýšení magnetického odporu R_m způsobí snížení indukčnost cívky L a tím i impedance Z. Tím se musí zvýšit proud I, který můžeme měřit. Platí tedy, že se zvětšující se vzdáleností d, roste proud I.

Provedení snímače s malou vzduchovou mezerou může být bezdotykové i dotykové, avšak v převážné většině se využívá dotykového provedení. V závislosti vzduchové mezery na indukčnosti, která je hyperbolická, se využívá omezeného rozsahu, který se pohybuje kolem 3 až 5 μm. V tomto rozsahu je možno použít lineární převodní charakteristiku. [10]

2.3.2 INDUKČNOSTNÍ SNÍMAČE S OTEVŘENÝM MAGNETICKÝM OBVODEM

Indukčnostní snímače s otevřeným magnetickým obvodem, nazývané též polomostové indukčnostní snímače, vycházejí z principu měření změny indukovaného napětí U_i v cívce, způsobené změnou polohy feromagnetického jádra. Snímač se běžně skládá z cívky a feromagnetického jádra, které je do cívky zasouváno. Cívka se obvykle umisťuje do podélně rozděleného feromagnetického krytu, čímž se předejde vytvoření závitu nakrátko. [8]



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

Obr. 5 Indukčnostní snímač polomostový [17]

Na cívku je přiváděn střídavý proud *I*, který ovšem ihned neodpovídá odporu cívky, ale roste až do svého maxima. Tím se kolem cívky zvyšuje tvořené magnetické pole, které postupně způsobuje indukované napětí U_i. To lze určit ze vztahu [8]:

$$U_i = -L\frac{\Delta I}{\Delta t} \tag{11}$$

kde ΔI je změna proudu za jednotku času Δt.

Záporné znaménko na pravé straně rovnice znázorňuje působení indukovaného napětí proti připojenému zdroji. Zasunutím feromagnetického jádra do cívky se zvýší magnetické pole a tím i indukčnost. Tím se výrazně zvýší indukované napětí U_i, které je závislé na velikosti jádra a délky jeho zasunutí do cívky. [10]

Jestliže uvažujeme délku cívky a jádra stejnou, můžeme indukčnost cívky určit ze vztahu [8]:

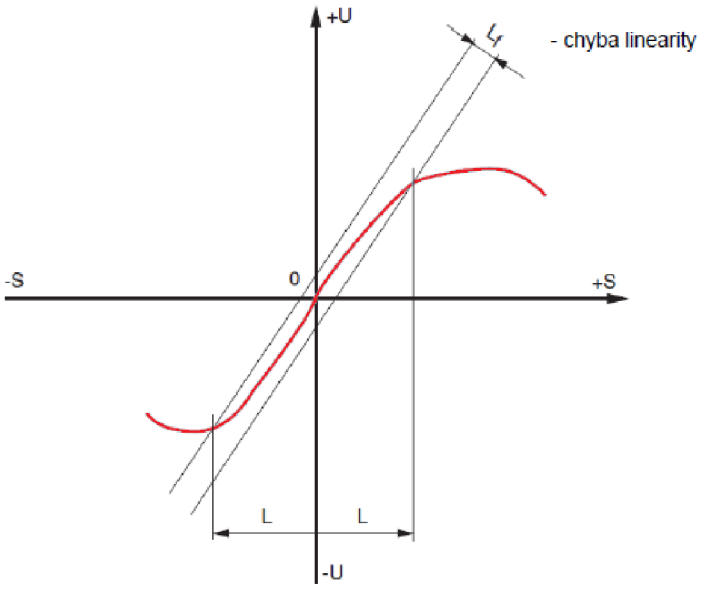
$$L = \frac{N^2}{l}\left[r^2 + (\mu_f - 1)r_0^2\right] \tag{12}$$

kde μ_f je efektivní permeabilita pohyblivého jádra, N počet závitů cívky, r_0 poloměr jádra, r poloměr cívky a l délka cívky.

Pakliže je délka jádra l_0 menší než délka cívky, indukčnost se počítá ze vztahu [8].

$$L = \frac{N^2}{l^2}\left[lr^2 + (\mu_f - 1)l_0 r_0^2\right] \tag{13}$$

Změna indukčnosti je lineární pouze v určitých polohách, a to na začátku a konci cívky. Z tohoto důvodu se používá diferenciální zapojení dvou cívek. To umožní lineární změnu indukčnosti v daleko větším rozsahu zdvihu snímače. S tím je spojen i pojem S-křivka. Na té je možné vidět chybu linearity L_f a rozsah, v němž můžeme závislost považovat za lineární.



Obr. 6 S-křivka pro polomostový snímač [10]

Výhodami toho typu snímače jsou velmi dobré parametry rozlišení a opakovatelnosti a také použití pro velké změny polohy, které se mohou pohybovat až kolem 100 mm. Nevýhodou oproti snímači s malou vzduchovou mezerou je menší citlivost snímače nebo složitost konstrukce snímače, a to především vysoký nárok na přesné provedení cívek. [8]

2.3.3 INDUKČNOSTNÍ SNÍMAČE S POTLAČENÝM POLEM

Tyto snímače jsou používány pro některá speciální měření, především pro bezdotyková měření. Tím může být například měření vibrací, ovality apod. Ovšem jejími nedostatky jsou příliš velká nelinearita a malá citlivost v porovnání s ostatními indukčnostními snímači. Pracují na principu změny impedance cívky závislé na vzdálenosti cívky od povrchu elektricky vodivého tělesa. Ke změně impedance může dojít také při změně tloušťky vrstvy h nebo při změně její elektrické vodivosti závislé např. na teplotě nebo složení. Pro popis funkce se používá metoda zrcadlového zobrazení, kdy si měřenou část můžeme představit jako sekundární cívku, zatíženou odporem R_z a indukčností L_z. Při průchodu proudu cívkou je vytvářeno magnetické pole částečně procházející kovovou vrstvou, ve které vznikají vířivé proudy. Tyto proudy pak vytvoří magnetické pole, které působí proti poli, jímž bylo vyvoláno. To způsobuje zmenšení intenzity pole původního. Tento jev je nazýván „potlačení pole“.

2.3.4 INDUKČNOSTNÍ SNÍMAČE BEZ FEROMAGNETIKA

Jak je již z názvu patrné, jedná se o snímače bez feromagnetického jádra. Princip funkce je založen na spojení alespoň dvou cívek, které lze vzájemně posunovat. Při použití dvou cívek se jedná o transformátorové zapojení, při třech cívkách o diferenční. Jelikož snímač neobsahuje žádnou feromagnetickou část, nejsou zde ani přítomny žádné parazitní vlivy související s feromagnetikem. [8]

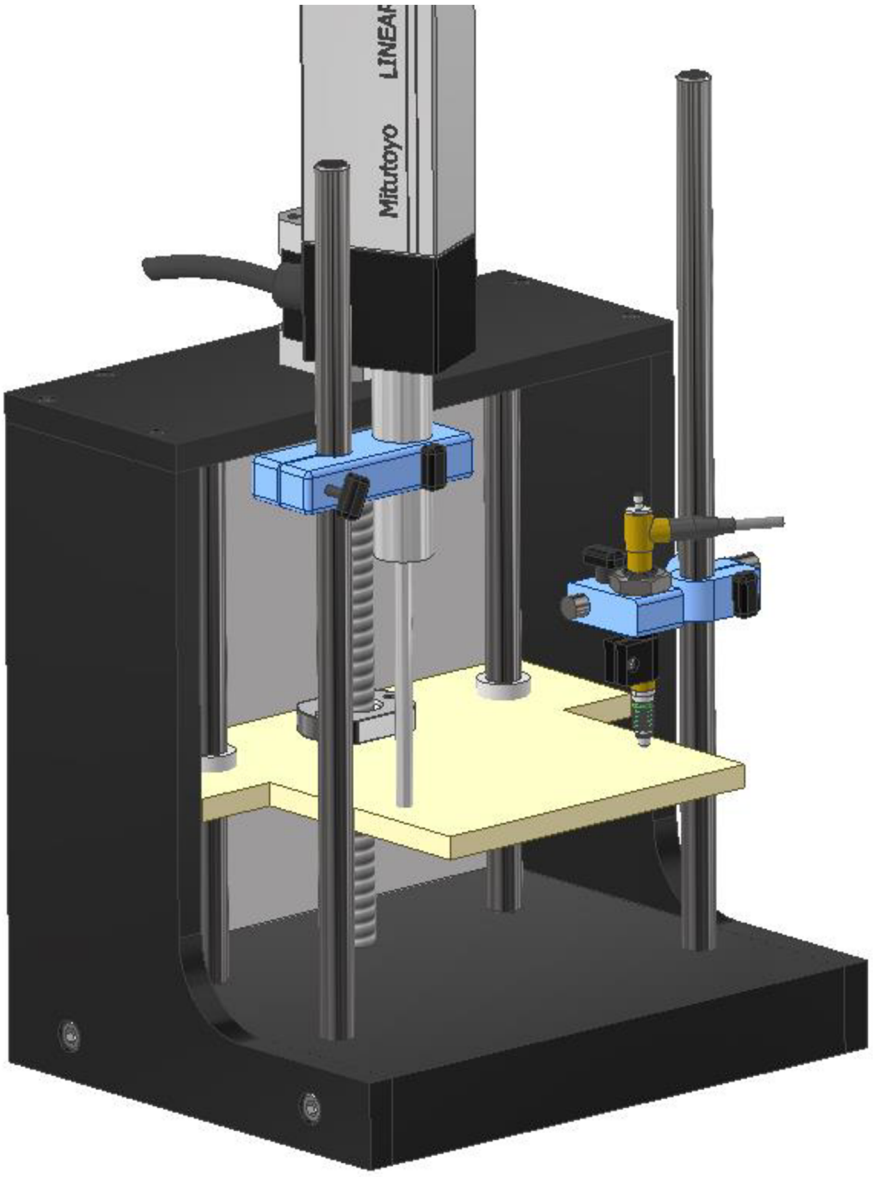
Při zapojení je na buzenou cívku přivedeno střídavé napětí, čímž se na ní vytvoří magnetické pole. Buzená cívka je umístěna vedle cívky nebuzené, popřípadě mezi dvojici nebuzených cívek. Na ty se poté indukuje napětí z cívky buzené. Při vychýlení a přiblížení se buzené cívky k nebuzené cívce, roste indukované napětí. Při diferenciálním zapojení je ve středové poloze měřené napětí rovno nule, jelikož se navzájem odečtou.

Pracovní rozsah těchto snímačů není příliš veliký. Pohybuje se maximálně kolem 3 mm. Je to dáno tím, že magnetický tok vytvořený buzenou cívkou je daleko menší než při použití feromagnetika. Ačkoliv tyto snímače mají velmi dobrou přesnost, rozlišitelnost a opakovatelnost, v praxi nejsou příliš používány. [10]

3 NÁVRH KONCEPTŮ MĚŘÍCÍHO ZAŘÍZENÍ

3.1 VARIANTA A

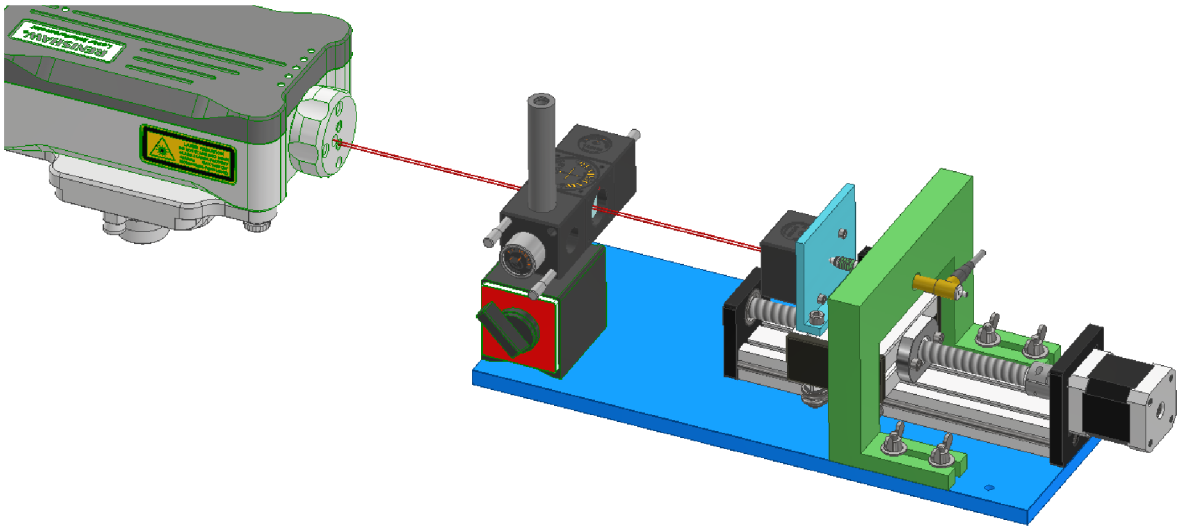
První variantou bylo navržení konceptu kompaktního měřícího přípravku, který jako etalonové měřidlo využívá lineárního inkrementálního snímače LG/LGM-Linear Gauge od firmy Mitutoyo s rozlišením 0,1 μm a přesností 2,5 μm. [11] Data jsou z lineárního snímače přenášena přes zobrazovací jednotku do PC a zaznamenávána automaticky do SW společně s daty z indukčnostního snímače. Pohyb dotykové desky je vyřešen pomocí kuličkového šroubu a krokového motoru, který je ovládán a pozicován pomocí SW. Deska je uložena na dvou vodících tyčích s kuličkovými pouzdry, které zajišťují přesný chod desky. Snímače jsou upevněny pomocí svěrných spojů na integrované stojánky přípravku. Ty umožňují lehké ustavení snímačů do požadované polohy. Konzolový rám konstrukce by měl zajistit dostatečnou tuhost přípravku.



Obr. 7 Koncept měřícího přípravku – varianta A

3.2 VARIANTA B

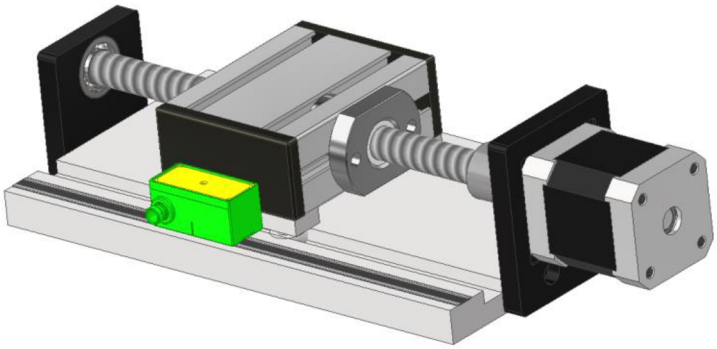
Druhé řešení je sestaveno z lineární osy s pojízdným suportem. Jako etalonové měřidlo je využit kalibrační laserový interferometr XL-80 od firmy Renishaw. Dle uvedených parametrů od výrobce má interferometr rozlišení 1 nm a přesnost lineárního měření ±0,5 μm/m, což je pro potřeby kalibrace naprosto dostačující. [12] Kalibrovaný indukčnostní snímač je ustaven v pevném domku a opřen o držák odražeče interferometru na suportu. Pozicováním suportu na kuličkovém šroubu pomocí krokového motoru je poté prováděna série měření v pracovním rozsahu snímače. Naměřená data jsou přenášena do PC a zaznamenávána v SW. Díky krokovému motoru je možno celý proces měření automatizovat.



Obr. 8 Koncept měřícího přípravku – varianta B

3.3 VARIANTA C

Tato varianta vychází z navržené varianty B. Oproti variantě B je zde jako etalonové měřidlo zvolen inkrementální optický odměřovací systém TONiC s pozlaceným ocelovým lineárním měřítkem RGSZ20 od firmy Renishaw. Jak uvádí výrobce, tato kombinace systému nabízí rozlišení až 1 nm s přesností ±3 μm/m. [13] Zbytek sestavy je stejný jako u varianty B.



Obr. 9 Koncept měřícího přípravku – varianta C

3.4 VOLBA VÝSLEDNÉHO KONCEPTU

Pro výslednou volbu konceptu byla zhotovena multikriteriální analýza, ve které jsou bodově ohodnoceny předchozí tři navržené varianty měřícího zařízení. Váha každého kritéria je dána subjektivními požadavky vedoucího práce a mými představami o výsledném zařízení. Jednotlivým variantám je přiřazeno bodové hodnocení 1 – nejméně vhodné až 3 – nejvíce vhodné. Varianta s nejvyšším bodovým ziskem z váženého součtu bude poté vybrána a dál detailně konstrukčně zpracována.

Přesnost etalonového měřidla

Jako první kritérium byla stanovena přesnost použitého etalonového měřidla. Z důvodu vysokého nároku na přesnost etalonového měřidla, který vyplývá z podstaty kalibrace, má toto kritérium nejvyšší váhu.

Z tohoto pohledu nejlépe vychází varianta B. Kalibrační interferometr má oproti měřidlům použitých v ostatních konceptech daleko větší rozlišitelnost a přesnost, což ve výsledku znamená snížení nejistoty měření a tím přesnější určení odchylky senzoru.

Konstrukční řešení

Neméně důležitým faktorem ovlivňující výsledek měření je chyba způsobená samotnou konstrukcí měřícího přípravku.

V případě varianty A, kdy jsou etalonové měřidlo a kalibrovaný snímač ustaveny zvlášť na paralelních osách, vzniká Abbeho chyba. Tím je tato varianta nejméně vhodná pro použití za účelem kalibrace. Nejlepší navrženou variantou je navržená varianta B, kde je snímač ustaven do osy paprsku interferometru, čímž je měření v souladu s Abbeho principem.

Automatizace měřícího procesu

Tento parametr zahrnuje možnost automatizace měřícího procesu na daném zařízení. Ve všech případech je pozicování zajištěno pomocí krokového motoru. Rozdíl mezi variantami je ve způsobu získávání naměřených dat z etalonových měřidel.

Ve variantě A a variantě C, je potřeba dané měřidla připojit na zobrazovací jednotky, ze kterých jsou data získávána pomocí komunikačních sběrnic. Nejlepším řešením je varianta B, kde stačí připojit interferometr pomocí USB kabelu k PC a přímo stahovat měřená data, což celý proces automatizace daleko ulehčuje.

Multifunkčnost zařízení

Toto kritérium hodnotí multifunkční využití celého zařízení. Z důvodu poměrně vysoké ceny etalonových měřidel, je porovnávána možnost jejich použití i v jiných situacích. Dále je zde zohledněna možnost kalibrace dalších typů snímačů na navrženém zařízení.

U varianty C je celý měřící systém TONiC pevně nainstalován na přípravku a není možná jeho demontáž, vyjma havarijních stavů, tudíž je tato varianta nejméně vyhovující. Naproti tomu nejlepší variantou je varianta A, která má možnost bezproblémového odejmutí využitého etalonu a také umožňuje jednoduché upnutí jakéhokoliv typu snímače, bez zásahu do konstrukce přípravku.

Náklady na zhotovení

V poslední řadě byly porovnány náklady, za které by se daly jednotlivé varianty měřícího zařízení realizovat.

Nejnákladnější pořizovací součást, která udává největší část výsledné ceny, je etalonové měřidlo. U varianty A a C, se pohybujeme v řádech desetitisíců korun českých za pořízení těchto měřidel. Avšak pořizovací cena nového kalibračního interferometru se šplhá k půlmilionu korun českých. Tím je varianta B z hlediska tohoto kritéria nejméně vyhovující. Z důvodu již pořízených etalonových měřidel na pracovišti, kde je měřící zařízení použito, nemá toto kritérium ve výsledku vysokou váhu.

Tab. 1 Multikriteriální analýza

Kritérium	Váha	Varianta A	Varianta B	Varianta C
Přesnost etalonového měřidla	10	2	3	1
Konstrukční řešení	8	1	3	2
Automatizace měřícího procesu	6	1	3	2
Multifunkčnost zařízení	4	3	2	1
Náklady na zhotovení	2	2	1	3
Vážený součet		50	82	48

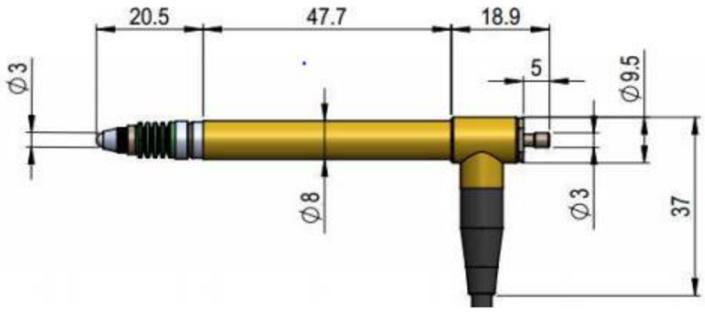
Z *[Tab. 1]* dle váženého součtu vyplývá, že nejlépe vyhovující navrženou variantou je varianta B. V další části této práce bude detailně zpracováno konstrukční řešení této varianty.

4 KONSTRUKČNÍ ZPRACOVÁNÍ ZVOLENÉHO KONCEPTU

Z výše uvedené multikriteriální analýzy vyšel jako nejvhodnější koncept, navržený koncept B. Při návrhu tohoto konceptu jsem postupoval od základní části, a to od indukčnostního snímače, pro který toto zařízení bylo navrženo za účelem kalibrace. Celá myšlenka konstrukce poté spočívala v jednoduchém zařízení, které by bylo nenáročné na výrobu a nebylo by finančně nákladné, avšak splňovalo všechny žádané parametry.

4.1 SNÍMAČ MESING T102V

Prvním krokem bylo seznámení se s indukčnostním snímačem. Ze zadání jsem pracoval s indukčnostním polomostovým snímačem T102V od firmy Mesing. Princip funkce snímače byl popsán již výše v kapitole 3.4.2. Na obrázku *[Obr. 10]* můžeme vidět tento snímač s jeho rozměrovými parametry. Celkový zdvih činí 4,6 mm, měřící zdvih snímače je v rozmezí ±1 mm s opakovatelností 0,01 μm. Výrobce udává linearitu 0,25 % na ±1 mm při 20°C. Odstavování doteku je zajištěno pomocí vakua. Druhou variantou tohoto snímače je typ T101V lišící se pouze způsobem vývodu kabelu, který je vodorovný s osou snímače. [14] Použití tohoto snímače je hojně rozšířeno v celém odvětví strojírenství, a to zejména u jednoúčelových měřících stanic a měřících přípravků.



Obr. 10 Indukčnostní snímač Mesing T102V [14]

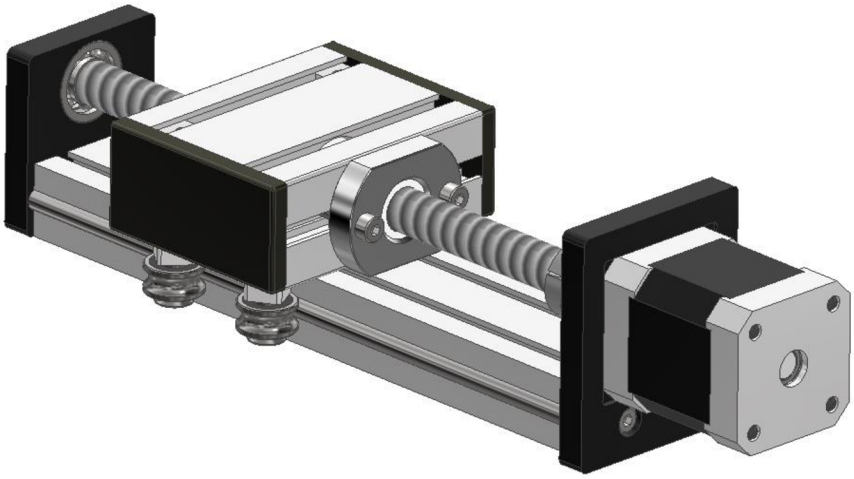
Snímač je možné upnout do kleštinového držáku s otvorem Ø8 mm a ustavit do libovolné montážní polohy. Jako výchozí polohu pro upnutí a měření jsem zvolil polohu vodorovnou.

4.2 LINEÁRNÍ OSA

Dalším krokem bylo navržení způsobu pozicování snímače pro následné měření. Aby snímač pracoval správně a byly omezeny vnější vlivy na minimum, zvolil jsem jako základ celé měřící stanice lineární osu. Díky ní je eliminován vliv nesouosti přípravku na minimum, jež by mohla mít výrazně negativní vliv na výsledek naměřených hodnot.

Na *[Obr. 11]* můžeme vidět navrženou lineární osu. Na základovém hliníkovém profilu, je ustaven pohyblivý suport. Do suportu byla nainstalována matice kuličkového šroubu s pohybovým kuličkovým šroubem. Ten byl vybrán z důvodu jeho vysoké účinnosti,

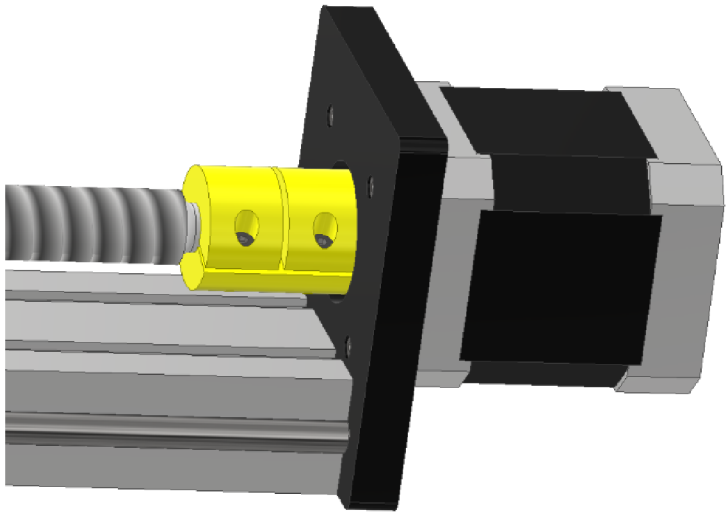
hladkosti chodu a menšího vývinu tepla oproti klasickým pohybovým šroubům. Příliš nadbytečné vyvinuté teplo uvolněné do okolí by mohlo mít za následek změnu vlastností celého zařízení a ovlivnění výsledků kalibrace. Kuličkové šrouby se vyznačují také velmi vysokou přesností stoupání (až 23μm/300 mm), tuhostí a perfektní opakovatelností. [15]



Obr. 11 Lineární osa

Uložení suportu zajišťuje lineární vodící systém s vodícími rolnami, nazýván také jako rolničkové vedení. Na hliníkovém profilu jsou po bocích nalisovány tvrděchromované vodící tyče sloužící jako kolejnice. Na ty dosedají excentrické vodící rolny, připevněny na spodní část suportu, jejichž pomocí je možno docílit předpětí, nebo vymezit vůle vodícího systému.

Na jedné straně je kuličkový šroub uložen ve valivém jednořadém kuličkovém ložisku, pro plynulý chod. Na straně druhé je spojen pomocí pružné spojky *[Obr. 12]* s krokovým motorem.

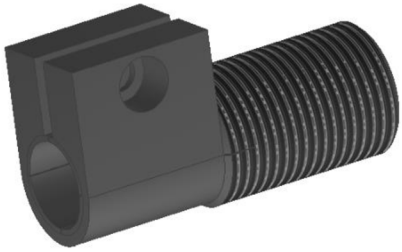


Obr. 12 Spojení šroubu a krokového motoru

Pro lineární osu jsem zvolil válcovaný kuličkový šroub s maticí od firmy T.E.A. Technik s.r.o. o průměru 6 mm, stoupání 4 mm a třídě přesnosti C7. Výrobce uvádí pro válcované šrouby třídy přesnosti C7 přesnost stoupání 50 µm/ 300 mm. [16] Krokový motor má základní krok 1,8°. Z lehkého výpočtu dostaneme, že pro úplné otočení hřídele motoru o 360° potřebujeme 200 kroků. Jestliže je hřídel motoru pevně spojena s kuličkovým šroubem, musí to stejné platit i pro něj. Když poté vezmeme velikost stoupání šroubu 4 mm a vydělíme ho počtem 200 kroků, získáme délku posunutí suportu na jeden krok, což činí 0,02 mm.

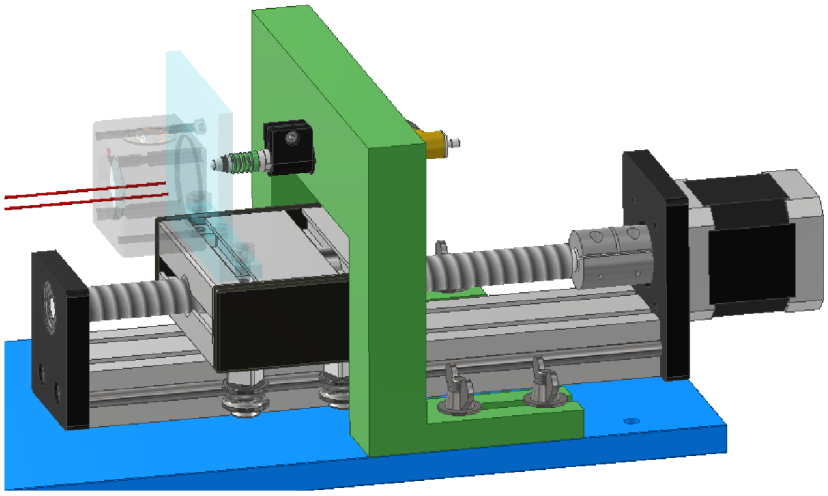
4.3 UPÍNAČ SNÍMAČE A ZÁKLADOVÁ DESKA

Jelikož indukčnostní snímač funguje na principu změny indukčnosti cívky v závislosti na změně polohy jádra, hraje zde velkou roli způsob, jak snímač vhodně upnout. Při nevhodně zvoleném upnutí, například bodovému upnutí, by mohlo dojít k nechtěné deformaci snímače, což by mohlo mít za následek zkreslení naměřených hodnot. Na *[Obr. 13]* můžeme vidět kleštinový upínač dodávaný od výrobce snímače, který zaručí rovnoměrnou upínací sílu po celém obvodu. Tím se eliminují lokální deformace pláště a upnutí nebude mít výrazně negativní vliv na chování snímače.



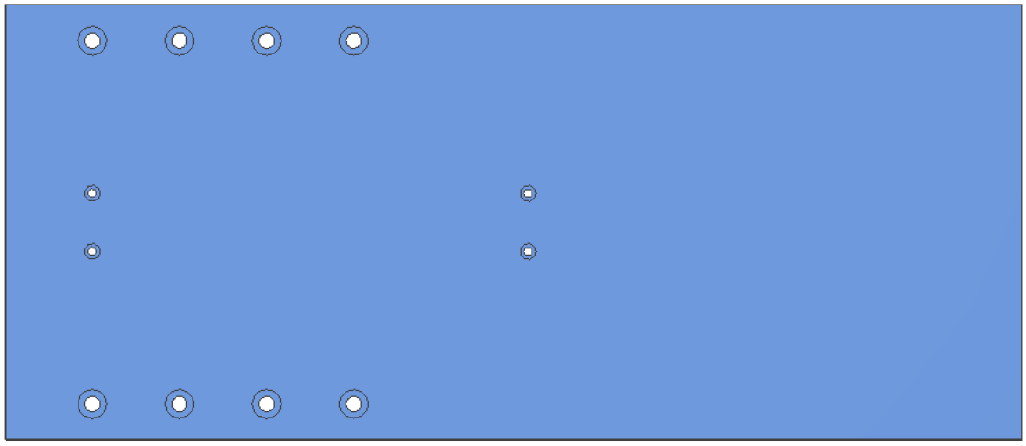
Obr. 13 Kleštinový upínač

Dále bylo zapotřebí zkonstruovat statický držák pro ustavení upínače snímače. Pro tento krok jsem navrhl portálový držák, který je zobrazen zelenou barvou na *[Obr. 14]*. Upínač snímače je v držáku uchycen pomocí závitu M12x1. Portálový držák je uchycen k základní desce pomocí šroubového spoje. Jelikož hlavní myšlenkou této práce bylo zkonstruovat přípravek, který by mohl sloužit i pro kalibraci dalších typů snímačů, je možno držák snadno ustavit do potřebné polohy nad lineární osou v závislosti na délce kalibrovaného snímače. Také je možno tento kus zcela oddělat a vyměnit za jiný s příslušným upínačem pro odlišný typ kalibrovaného snímače.



Obr. 14 Portálový držák upínače

Následným krokem konstrukčního návrhu byla základová deska, ke které jsou všechny výše uvedené komponenty přichyceny. Ta je dostatečně velká, aby celý přípravek byl dostatečně robustní a stabilní. Po stranách můžeme vidět díry pro šrouby na uchycení portálového držáku a uprostřed díry pro šrouby sloužící na uchycení lineární osy. Ta je za pomocí kamenů se závitem uložených v drážkách hliníkového profilu přichycena šrouby k desce.

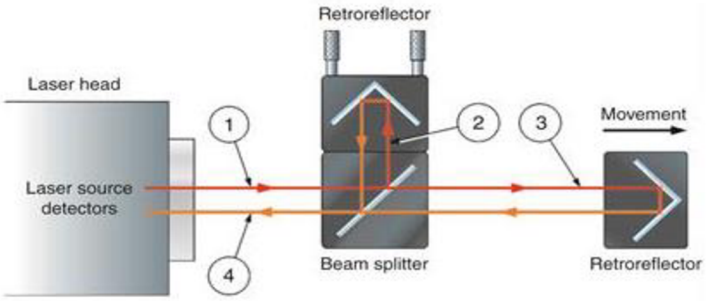


Obr. 15 Základová deska přípravku

4.4 LASEROVÝ INTERFEROMETR RENISHAW XL-80

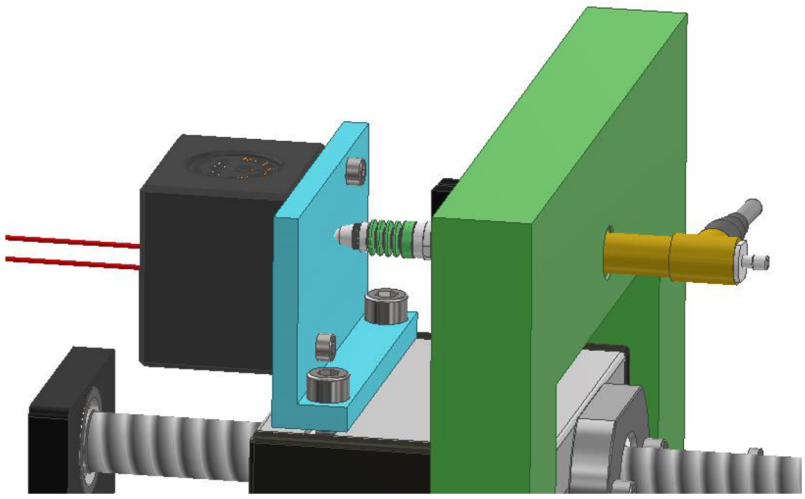
Posledním krokem v návrhu bylo vybrání etalonového měřidla, kterým jsem zvolil kalibrační laserový interferometr Renishaw XL-80. Zařízení pracuje na principu Michelsonova interferometru. Z laserového zdroje vystupuje laserový paprsek a je rozštěpen na dva paprsky – referenční a měřící. Dvěma odražeči jsou tyto paprsky odráženy zpět na detektor, kde těsně před dopadem interferují. Posunutím měřícího paprsku se vytvoří fázový rozdíl mezi paprsky, díky kterému můžeme určit vzdálenost odražeče od zdroje.

Na *[Obr. 16]* můžeme vidět laserový zdroj interferometru, který vysílá paprsek (1) do rozdělovače. Ten rozděluje paprsek na referenční (2), který je nepohyblivým odražečem odrážen zpět na detektor. Měřící paprsek (3) putuje dál na pohyblivý odražeč, který také odráží paprsek zpět na detektor s rozdílnou fází oproti paprsku referenčnímu (4).



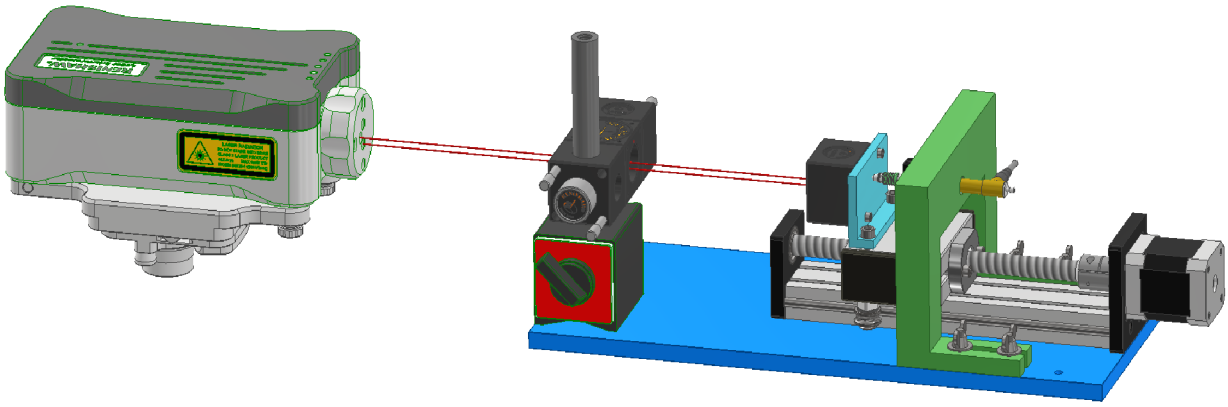
Obr. 16 Schéma laserové interferometrie [18]

Pro změření odchylky senzoru interferometrem byl zkonstruován upínač pohyblivého odražeče, který je upnut na suportu lineární osy *[Obr. 17]*. Na ten z druhé strany dosedá dotek snímače. Pohybem suportu je pozicován odražeč, který mění zdvih snímače.



Obr. 17 Upnutí odražeče

Rozdělovač paprsku a statický odražeč referenčního paprsku jsou společně upnuty na základové desce pomocí magnetického stojánku, který je dodáván přímo výrobcem, jako příslušenství k interferometru. Samotný interferometr je postaven na stativu, který je také součástí příslušenství. Lehkou demontovatelností všech součástí se zařízení stává víceúčelové a interferometr tak můžeme použít i pro jiné aplikace.



Obr. 18 Měřící sestava

V *[Tab. 2]* můžeme vidět základní výčet vlastností a parametrů měřícího systému XL-80 s použitím kompenzátoru vlivu prostředí XC-80, který využívá snímače pro kompenzaci relativní vlhkosti, tlaku vzduchu, teploty vzduchu a teploty materiálu přípravku. Tím jsou redukovány další negativní vlivy na celkovou odchylku kalibrace.

Tab. 2 Parametry kalibračního systému [12]

Parametry systému		
Rozsah lineárního měření	80 metrů	
Přesnost lineárního měření	±0,5 µm/m	
Přesnost frekvence laseru	±0,05 µm/m	
Rozlišení	1 nm	
Maximální rychlost snímaného pohybu	4 m/s*	
Frekvence snímání dat	10 Hz – 50 kHz**	
Doba stabilizace	< 6 minut	
Pracovní teplota	0 °C – 40 °C	
Snímače parametrů prostředí		
	Rozsah	Přesnost
Teplota materiálu	0 °C – 55 °C	±0,1 °C
Teplota vzduchu	0 °C – 40 °C	±0,2 °C
Tlak vzduchu	650 mbar – 1150 mbar	±1 mbar
Relativní vlhkost (%)	0 % – 95% nekonden-zující	±6%
*1,6 m/s (při rozlišení obdélníkového výstupního signálu 80 nm) 0,2 m/s (při rozlišení 10 nm) ** 20 MHz v režimu výstupu obdélníkového signálu		

5 VLASTNÍ MĚŘENÍ

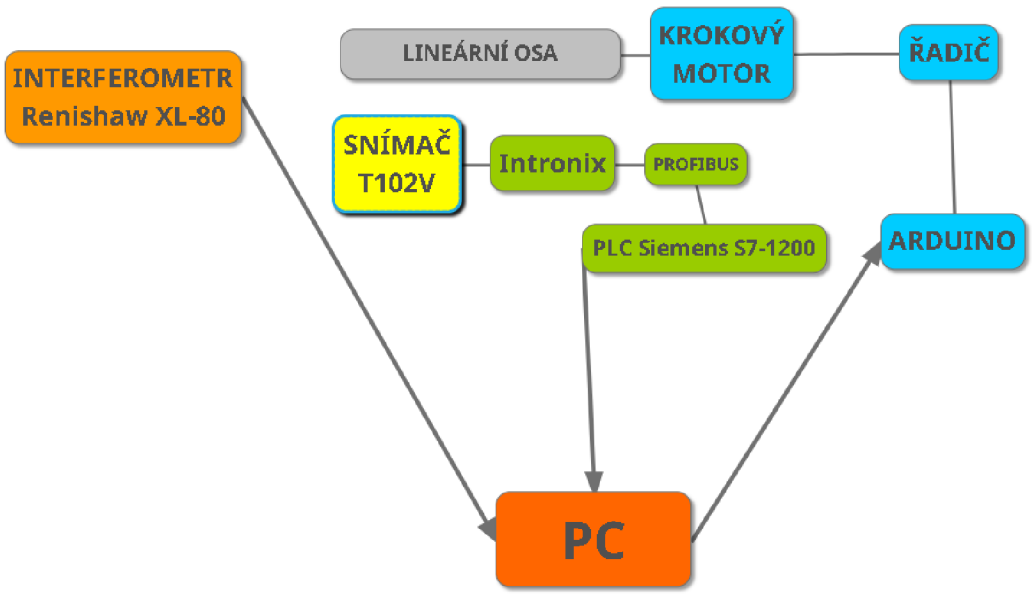
5.1 PŘÍPRAVA MĚŘENÍ

Na začátek bylo třeba vybrat vhodné prostředí pro uskutečnění měření. Jedním z hlavních faktorů ovlivňující výsledek měření je teplota okolí, ve kterém měření probíhá. Pro získání co nejpřesnějších hodnot je třeba zajistit ustálenou a neměnnou teplotu 20 °C ± 0,1 °C. Tímto prostředím byla zvolena měřící laboratoř, ve které bylo alespoň částečně možné tento požadavek splnit. Před samotným měřením se celé zařízení 24 h temperovalo na teplotu 20 °C pro dosažení rozměrové stálosti.

V prvním kroku byly nachystány všechny potřebné součásti a zařízení. Indukčnostní snímač se upnul do držáku a připojil k daným zařízením. Na základovou desku přípravku se upevnily pomocí magnetického stojánku rozdělovač se statickým odražečem paprsku viz *[Obr. 17]*. Pohyblivý odražeč paprsku se připevnil na suport, z jehož druhé strany dosednul indukčnostní snímač. Jako poslední byl nachystán interferometr, který byl postaven na samostatném stativu.

5.2 OŽIVENÍ MĚŘÍCÍ STANICE

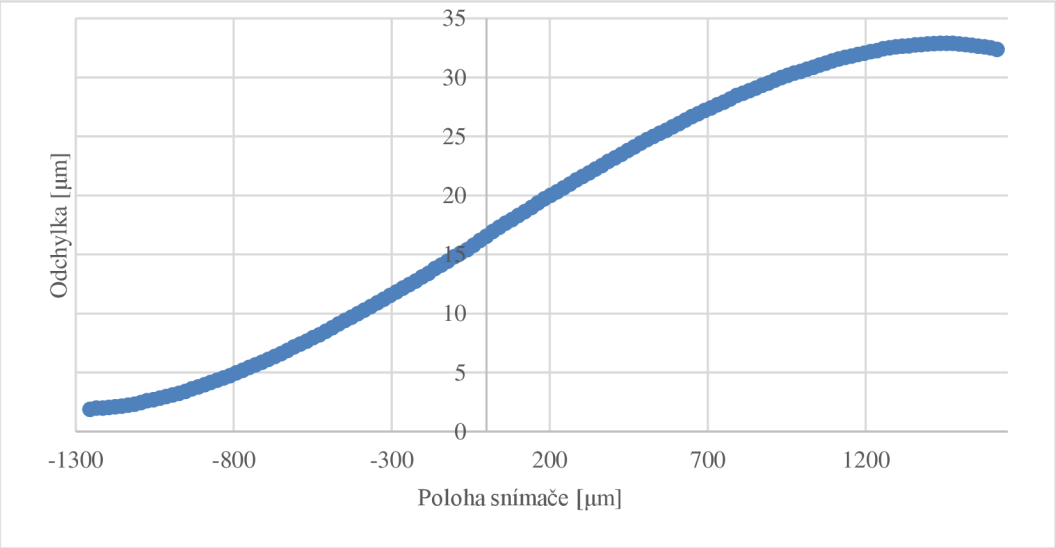
Pro řízení krokového motoru byl vybrán jednodeskový počítač Arduino s rozšiřujícím modulem Motor Shield. Ten za pomoci řadiče Leadshine M542 a programu pozicuje krokový motor, jak již bylo popsáno v kapitole *6.2*. Jako zobrazovací jednotka pro indukčnostní snímač T102V byla vybrána jednotka Intronix. Ta je spojena přes komunikační sběrnici PROFIBUS s PLC Siemens S7-1200. Zde jsou sbírána naměřená data ze snímače, odesílána na PC a společně s daty z interferometru ukládána do databáze. Jako poslední je spojen interferometr Renishaw XL80 pomocí USB kabelu s PC, přes který jsou přenášena naměřená data. Na *[Obr. 19]* můžeme vidět schéma společného zapojení měřící soustavy.



Obr. 19 Schéma zapojení měřící soustavy

5.3 NAMĚŘENÉ HODNOTY

Následně byla provedena série šesti měření. Měření probíhalo v měřícím rozsahu snímače od -1,24 do 2,2 mm. Naměřené hodnoty veličiny byly přeneseny a uloženy v aplikaci MS Excel. Na *[Obr. 20]* je vykreslená závislost odchylky na měřené hodnotě snímače. Hodnoty jsou vyhodnoceny na vzdálenosti -1,24 až 1,6 mm. Z důvodu velké odchylky v koncových polohách snímače jsou tyto hodnoty z vyhodnocení vyřazeny.



Obr. 20 Závislost odchylky na měřené hodnotě snímače

Z průběhu grafu je viditelné, že lineární závislost mezi odchylkou snímače a naměřenou hodnotou snímače se pohybuje pouze v oblasti kolem nuly. Čím dále se dostáváme od nulové polohy snímače, tím více roste nelinearita odchylky. To je dáno konstrukcí snímače, o které pojednává kapitola *3.3.2.*

5.4 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT

Naměřené hodnoty byly zpracovány a vyhodnoceny pomocí aplikace MATLAB, za účelem kompenzace systematické chyby snímače.

V prvním kroku byly nahrány data ze snímače a interferometru do prostředí softwaru. Dále byly vypočteny odchylky senzoru jako rozdíl mezi konvenčně pravými hodnotami z interferometru a hodnotami naměřenými senzorem.

Pro kompenzaci odchylky snímače byla zvolena metoda aproximace naměřených hodnot pomocí polynomu k-tého řádu. Pro zjištění aproximační funkce je důležité najít vhodný stupeň polynomu. Ten byl nalezen postupným prokládáním naměřených dat polynomy od 1 až 40 stupně. Nejvhodnější stupeň polynomu byl vybrán z matice aproximovaných hodnot stupňů 1 – 40 jako stupeň, který dosáhl nejlepší kompenzace chyby. Tím byl stupeň 36, avšak takto vysoký stupeň polynomu nám již velice zkresluje vyhodnocená data. Pro výslednou aproximaci byl tedy vybrán stupeň 25. V příloze *[P2]* jsou uvedeny konstanty této kompenzační funkce, které jsou zde zapsány pro každou ze šesti sérii

měření. Z důvodu velmi nízkých hodnot koeficientů u vysokých stupňů polynomu jsou uvedeny pouze konstanty od 12. stupně níže.

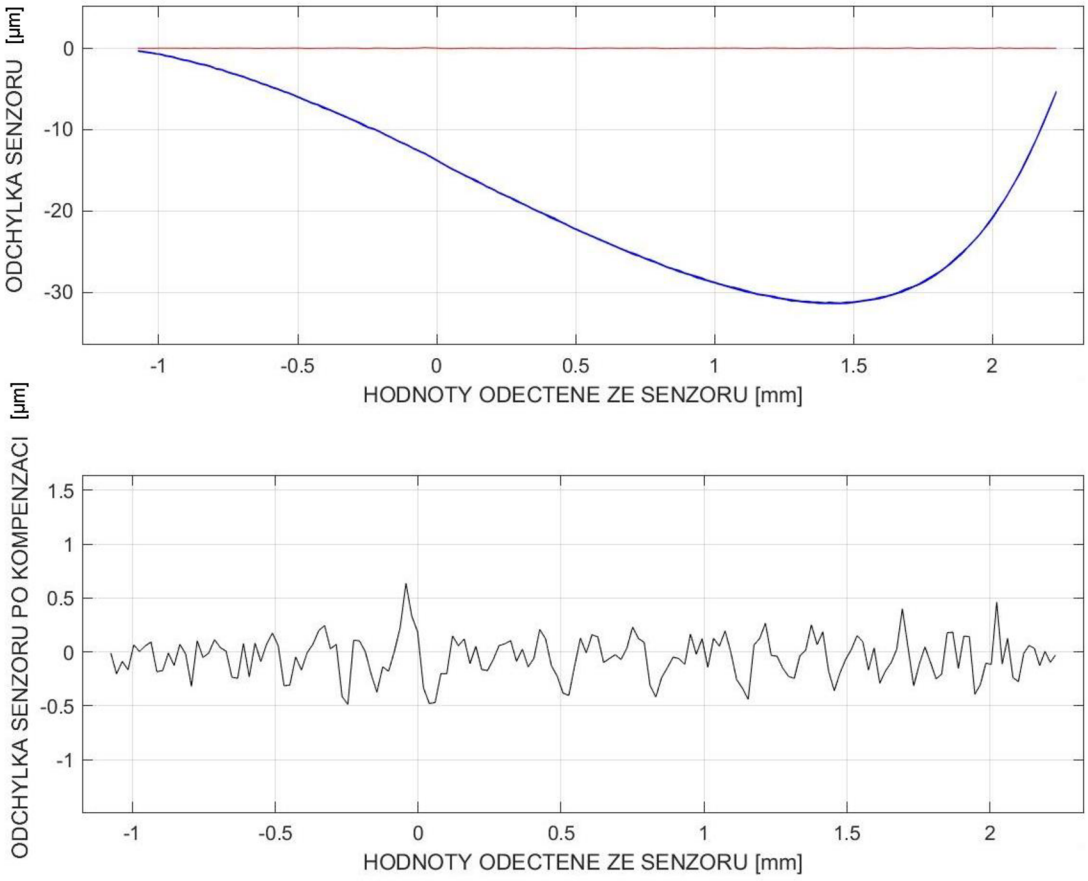
Obecný zápis kompenzační funkce $p(x)$ je:

$$p(x) = a_k x^k + a_{k-1} x^{k-1} + \cdots + a_1 x + a_0 \tag{14}$$

kde *x* je naměřená hodnota veličiny snímačem, *a* jsou konstanty funkce a *k* stupeň polynomu.

Dále byla vytvořena kompenzační tabulka *[P2]* pro jednotlivé hodnoty rozsahu snímače od -1 mm po 2,2 mm. Kompenzační hodnoty byly vypočítány jako aritmetický průměr hodnot získaných z předchozích 6ti kompenzačních polynomů v daných bodech. Pro provedení korekce se kompenzační hodnoty přičítají k naměřeným hodnotám snímače. Rozdílem kompenzovaných hodnot měření získáváme výsledný kompenzovaný délkový rozdíl. Tuto tabulku je možno uložit do měřící stanice ve které je snímač v praxi umístěn a následně ji využít k přímé korekci chyb při vyhodnocování naměřených hodnot.

Na obrázku *[Obr. 21]* můžeme vidět graf naměřené odchylky snímače (modrá barva) v závislosti na naměřených hodnotách odchylky interferometrem (červená barva), které jsou brány jako konvenčně pravé. Následně na druhém grafu vidíme hodnoty odchylky (černá barva) po aplikování kompenzace.



Obr. 21 Odchylka senzoru před kompenzací (nahoře), Odchylka po kompenzaci (dole)

Pro ukázku kompenzace odchylky snímače je v *[Tab. 3]* znázorněn postup a výsledek při aplikaci korekce na třech náhodných dvojicích bodů. V prvních dvou sloupečcích najdeme naměřené hodnoty interferometrem a snímačem. Ve třetím sloupečku jsou k naměřeným hodnotám snímačem přičteny kompenzační hodnoty z *[P2]*. Dále jsou stanoveny rozdíly naměřených dat z interferometru a snímače. Jako poslední je uveden rozdíl hodnot, na kterých byla provedena kompenzace. Použitá metoda kalibrace bere snímač jako absolutní měřidlo porovnávané s konvenčně pravými hodnotami z interferometru. V praxi poté v našem případě snímač pracuje jako komparační měřidlo.

Tab. 3 Ukázka kompenzace měření

Naměřené hodnoty		Snímač s provedenou kompenzací	Δ Interferometr	Δ Snímač bez kompenzace	Δ Snímač s provedenou kompenzací
Interferometr	Snímač				
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
-1,00152	-1,0149	-1,001856	0,5	0,5052	0,500000
-0,50152	-0,5097	-0,501856			
0,09849	0,1000	0,098206	0,1	0,1018	0,100069
0,19849	0,2018	0,198275			
0,99849	1,0134	0,998382	0,6	0,6016	0,599766
1,59849	1,6150	1,598148			

Dle uvedených výsledků v *[Tab. 3]* vidíme, že ve všech případech došlo ke snížení odchylky snímače. Původní odchylka snímače se v daných bodech pohybovala v jednotkách mikrometrů. To může být v mnoha případech měření docela podstatný rozdíl. Naše vytvořená kompenzace dopomohla k razantnímu snížení chyby snímače. Z principu aproximace polynomem není tato chyba snížena na nulovou hodnotu pro celý rozsah snímače, ovšem je tak malá, že se dostává pod jeho rozlišitelnost. Z měření a následného vyhodnocení jsme dostali výsledky dle očekávání, a tudíž je můžeme označit za správné a úspěšné.

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce byl návrh měřícího zařízení pro kalibraci snímače délky. V teoretické části jsou uvedeny základní pojmy v metrologii, které vedou k lepšímu porozumění celé problematice měření a napomáhají k ucelenému přehledu v terminologii metrologie.

Další kapitola analyzuje současný stav a poznání v oblasti snímačů neelektrických veličin. Obecně popisuje jejich užití a základní vlastnosti, zvláště potom klade důraz na snímače indukčnostní. Vysvětlení a pochopení jejich principu fungování a konstrukce je velmi důležité pro další výstupy práce, jelikož bylo měřící zařízení konstruováno právě pro kalibraci polomostového indukčnostního snímače délky.

Byly navrženy tři koncepty měřící stanice odpovídající požadavkům ze zadání. Všechny tři navržené koncepty by se daly považovat za vhodné a po jejich zkonstruování i za funkční. Z multikriteriální analýzy ovšem vyšel nejlépe navržený koncept B, používající lineární osu a kalibračního laserového interferometru.

Kapitola čtvrtá zpracovává detailní konstrukci výsledné varianty měřícího zařízení. Pro co nejpřesnější chod a funkčnost byla vybrána lineární osa s pohybovým kuličkovým šroubem a krokovým motorem. Tyto komponenty jsou často používány v přesných výrobních stojích a zařízeních. Výsledná konstrukce splnila všechny požadované cíle ze zadání. Velmi jednoduché konstrukční řešení umožňuje také kalibraci dalších snímačů. Pro další vylepšení tohoto zařízení, by se dalo uvažovat o zkonstruování tepelně ochranného boxu například z plexiskla, ve kterém by bylo zařízení umístěno. To by pomohlo eliminovat vliv okolního prostření na výsledky kalibrace (kolísání teploty v laboratoři způsobeno klimatizační jednotkou a také vlastní přítomnost kalibračního technika).

Závěrem práce bylo oživení měřící stanice za pomoci programovatelných počítačů a provedení kalibrace v pracovním rozsahu snímače. Z naměřených hodnot byla získána odchylka, která měla očekávaný průběh tzv. S-křivky. Pro použití v praxi je měření s takovouto chybou snímače nevyhovující, byla proto provedena kompenzace chyby snímače. Výsledek kompenzace snížil chybu snímače z jednotek mikrometrů na téměř nulovou hodnotu, čímž se dá považovat výsledek této práce za úspěšný v plném rozsahu zadání. Výstupem této práce je také kompenzační tabulka, kterou je možné uložit pro automatickou korekci chyby měření v jednoúčelové měřící stanici, ve které je snímač použit.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

[1] HORSKÝ, Jiří, Pavel HORSKÝ a Jana HORSKÁ. Měření a jeho vyhodnocení I: historický přehled. *Automa: časopis pro automatizační techniku* [online]. 2014, **2014**(11), 45-47 [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/53154.pdf

[2] PETŘKOVSKÁ, Lenka a Lenka ČEPOVÁ. *Strojírenská metrologie: studijní opora "Strojírenská metrologie"*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2723-0.

[3] *TERMINOLOGIE Z OBLASTI METROLOGIE*. 2. vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.

[4] ČECH, Jaroslav, Jiří PERNIKÁŘ a Kamil PODANÝ. *Strojírenská metrologie*. Vyd. 4., přeprac., V Akademickém nakl. CERM 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-214-3070-2.

[5] PERNIKÁŘ, Jiří, Josef VAČKÁŘ a Miroslav TYKAL. *Jakost a metrologie*. Brno: CERM, 2001. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-1997-0.

[6] *KALIBRACE PRACOVNÍCH MĚŘIDEL Z OBORU DÉLKA: Sborník přednášek*. Brno: České kalibrační sdružení, 2013.

[7] PERNIKÁŘ, Jiří a Miroslav TYKAL. *Strojírenská metrologie II*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-3338-8.

[8] ZEHNULA, Karel. *Snímače neelektrických veličin*. 2. upr. a dopln. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1983, 371 s. : il.

[9] ZELENÝ, František. *Základní vlastnosti měřicích přístrojů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1976, 183 s. : tabulky, grafy.

[10] WEIGL, Martin. *Návrh nestandardních indukčtnostních a inkrementálních měřicích snímačů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2013. 83 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Pernikář, CSc.

[11] Podrobnosti o produktu. *Mitutoyo* [online]. [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: https://shop.mitutoyo.cz/web/mitutoyo/cs_CZ/mitutoyo/$catalogue/mitutoyoData/PR/542-312/datasheet.xhtml

[12] *Přenosný laserový měřící a kalibrační systém* [online]. Anglie: Renishaw, 2007 [cit. 2021-04-29]. L-9908-0651-02. Dostupné z: https://www.renishaw.cz/cs/laserovy-system-xl-80--8268

[13] TONiC™ Inkrementální odměřovací systém s lineárním měřítkem RGSZ20. *Renishaw* [online]. c2001-2021 [cit. 2021-04-29]. Dostupné z: https://www.renishaw.cz/cs/tonic-inkrementalni-odmerovaci-system-s-linearnim-meritkem-rgsz20--10187

[14] *Katalog indukčnostních (délkových) snímačů PETER HIRT a snímačů MESING* [online]. Brno: Mesing, spol. s r.o. [cit. 29.04.2021]. Dostupné z: https://www.mesing.cz/download/mesing/katalog_snimacu.pdf

[15] BUDYNAS, Richard a J. NISBETT. *Shigley's Mechanical Engineering Design*. 8th ed. United States of America: The McGraw Hill Companies, 2006. ISBN 0-390-76487-6.

[16] *Kuličkové šrouby* [online]. Teatechnik, 2009 [cit. 30.04.2021]. Dostupné z: https://www.teatechnik.cz/kulickove-srouby-ekonomicke/

[17] *Electronic Length Measuring Equipment* [online]. In: . TESA [cit. 2021-05-11]. Dostupné z: http://www.merici-pristroje.cz/files/ckeditor//5_Produkty/5-31_tesa/3-komunalni_meridla/294_%C3%BAheln%C3%ADky%2C%C3%BAhlom%C4%9Bry.pdf

[18] *Renishaw plc* [online]. Spojené království, c2001-2021 [cit. 2021-05-12]. Dostupné z: https://www.renishaw.cz/cs/renishaw-zvy%c5%a1ov%c3%a1n%c3%ad-efektivity-ve-v%c3%bdrob%c4%9b-a-zdravotn%c3%ad-p%c3%a9%c4%8di--1030

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$s_{\bar{x}}$	[-]	Směrodatná odchylka aritmetického průměru
$\bar{x}$	[mm]	Aritmetický průměr
a	[-]	Konstanta funkce
d	[mm]	Velikost vzduchové mezery
I	[A]	Proud
j	[-]	Imaginární složka
k	[-]	Stupeň polynomu
k_u	[-]	Koeficient rozšíření
l	[mm]	Délka cívky
L	[H]	Indukčnost
l_0	[mm]	Délka jádra
n	[-]	Počet měření
N	[-]	Počet závitů cívky
n_z	[-]	Počet závitů cívky
$p(x)$	[-]	Kompenzační funkce
r	[mm]	Poloměr cívky
R	[Ω]	Odpor
r_0	[mm]	Poloměr jádra
R_m	[Ω]	Magnetický odpor
S	[mm^2]	Plocha konců feromagnetického jádra
U	[-]	Rozšířená nejistota
u_A	[-]	Nejistota typu A
u_B	[-]	Nejistota typu B
u_C	[-]	Kombinovaná nejistota
U_i	[V]	Indukované napětí
U_s	[V]	Napětí
x	[mm]	Výsledky měření; vstupní veličina
y	[mm]	Výstupní veličina
Z	[H]	Indukčnost
ΔI	[A]	Změna proudu
Δt	[s]	Změna času
μ	[-]	Střední hodnota základního souboru

μ_f	[kg·m·A^{-2}·s^{-2}]	Efektivní permeabilita jádra
μ_v	[kg·m·A^{-2}·s^{-2}]	Permeabilita vzduchu
σ	[-]	Směrodatná odchylka základního souboru
σ^2	[-]	Rozptyl základního souboru
ω	[s^{-1}]	Úhlová frekvence

SEZNAM PŘÍLOH

[P1] Výkres sestavy

[P2] Kompenzační tabulka