



# 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 DILATAČNÍ PODLOŽKY PRO LINEÁRNÍ ENKODÉR

DESIGN OF THE DILATATION PAD FOR LINEAR ENCODER

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

#### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

RICHARD MORAVANSKÝ

#### VEDOUČÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. VOJTĚCH ŠTĚPÁNEK

BRNO 2021

## Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky  
Student: **Richard Moravanský**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Vojtěch Štěpánek**  
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.1111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### Návrh dilatační podložky pro lineární enkodér

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Přesnost obráběcího stroje je ovlivňována řadou faktorů a jedním z nich je získání zpětné vazby o poloze z lineárních snímačů délky, někdy označovaných jako pravítka. Snímače délky jsou však ovlivňovány kolísající teplotou okolí či teplotou části stroje, na níž jsou upevněny. Cílem bakalářské práce je porozumět konstrukci a principu funkce lineárních snímačů délky a následně navrhnout podložky, která zajistí upevnění pravítka v požadovaných tolerancích, ale zároveň umožní dilataci pravítka v axiálním směru nezávisle na roztažnosti podkladu.

#### **Cíle bakalářské práce:**

Rešeršní zpracování současného stavu poznání v oblasti lineárních snímačů délky, zejména konstrukce a princip funkce používaných variant.

Popis modelu roztažnosti pravítka v závislosti na teplotě.

Návrh několika variant konstrukce dilatační podložky.

Hodnocení a výběr nejlepší varianty.

Detailní zpracování zvoleného konceptuálního řešení.

Výkres navržené dilatační podložky.

Hodnocení dosažených výsledků.

Závěr a doporučení pro praxi.

#### **Seznam doporučené literatury:**

MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů III. Praha: MM publishing, 2014. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.

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.

BORSKÝ, Václav. Základy stavby obráběcích strojů. Brno: VUT Brno, 1986, 145 s. ISBN 55-600-86.

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

MORAVANSKÝ Richard: Návrh dilatační podložky pro lineární enkodér

---

Bakalárska práca sa zaoberá problematikou lineárnych snímačov dĺžky, ich rozdelením, konštrukciou, teplotnými účinkami a návrhom dilatačnej podložky. Cieľom práce je odborný rešerš na tému lineárne snímače dĺžky, návrh variantov podložky a s tým spojené odporúčanie pre prax. Kapitola súčasného poznania je venovaná základným poznatkom o snímačoch polohy, tj. prevodník senzor typu zapojenia. Následná kapitola je o popise základných častí lineárnych sústav, konkrétne spôsob náhonu a vedenie v lineárnych sústavách. Po objasnení daných pojmov bude vysvetlená kapitola o lineárnych snímačoch dĺžky. Daná kapitola sa už hlbšie zaoberá meraním polohy v lineárnych sústavách, fotoelektrickému snímaniu a lineárnym enkodérom od spoločnosti HEIDENHEIN. Ako posledná časť teórie je predstavená analýza tepelných účinkov. V praktickej časti je popísaný návrh variant dilatačných podložiek a montáž prvkov, ktoré umožňujú dilatáciu, ich spojenie a upínanie. V záverečnej časti je navrhnutá najlepšia varianta a doporučenie pre prax.

**Kľúčové slová:** Lineárny snímač dĺžky, Lineárne sústavy, snímanie polohy, dilatačná podložka, tepelné účinky, enkodér

## SUMMARY

MORAVANSKÝ Richard: Design of the dilatation pad for linear encoder

---

The bachelor's thesis deals with the issue of linear length sensors, their dividing, construction, temperature effects and design of an dilatation pad. The aim of the work is a professional search on the topic of linear length sensors, design of variants of the pad and the associated recommendation for practice. The chapter of current knowledge is dedicated to basic knowledge about position sensors, ie. converter sensor connection types. The following chapter is about the description of the basic parts of linear systems, specifically the method of drive and lead in linear systems. After clarifying the concepts, the chapter of linear length sensors will be explained. The chapter deals in more depth with position measurement in linear systems, photoelectric sensing, and a linear encoder from HEIDENHEIN. As the last part of the theory, the analysis of thermal effects is presented. The practical part describes the design of variants of dilatation pad and assembly of elements that allow expansion, their connection and clamping. In the final part, the best variant and recommendation for practice is suggested.

**Keywords:** Linear length sensor, Linear systems, position sensing, dilatation pad, thermal effects, encoder

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA**

MORAVANSKÝ, Richard. *Návrh dilatační podložky pro lineární enkodér* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132153>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Vojtěch Štěpánek.

## **ČESTNÉ PREHLÁSENIE**

Prehlasujem, že som bakalársku prácu na tému: Návrh dilatačnej podložky pod lineárny enkodér, vypracoval samostatne pod vedením vedúceho práce Ing. Vojtěcha Štěpánka, pomocou literatúry a iných zdrojov, ktoré sú uvedené v zozname literatúry na konci tejto práce.

V Brně dňa 15.5. 2021

.....  
Podpis

## **POĎAKOVANIE**

Ďakujem vedúcemu práce za pomocné konzultácie a usmerňovanie, bez ktorých by sme sa nedopracovali k záveru. Ďakujem všetkým, čo ma podporovali v štúdiu počas všetkých rokov.

# Obsah

|   |           |
|---|-----------|
| Úvod  | 10        |
| <b>1 Súčasný stav poznania</b>  | <b>12</b> |
| 1.1 Podstata snímačov a snímanie polohy   | 12        |
| 1.1.1 Princíp fungovania snímačov   | 12        |
| 1.1.2 Druhy snímania polohy   | 15        |
| 1.2 Fyzikálne prístupy snímania polohy  | 16        |
| 1.2.1 Odporové snímače  | 16        |
| 1.2.2 Kapacitné snímače   | 17        |
| 1.2.3 Indukčné snímače (generátorové)   | 18        |
| 1.2.4 Indukčnosťné snímače  | 18        |
| 1.2.5 Optické snímače   | 19        |
| 1.2.6 Magnetické snímače  | 19        |
| <b>2 Posuvné lineárne sústavy</b>   | <b>21</b> |
| 2.1 Rotačný servopohon  | 21        |
| 2.1.1 Gulôčková skrutka a matica  | 21        |
| 2.1.2 Pastorok a hrebeň   | 23        |
| 2.1.3 Šnek a šnekový hrebeň   | 23        |
| 2.2 Lineárny motor  | 24        |
| 2.3 Vedenie v posuvných sústavách   | 24        |
| 2.3.1 Vedenie klzné   | 25        |
| 2.3.2 Vedenie hydrostatické   | 26        |
| 2.3.3 Valivé vedenie  | 27        |
| 2.3.4 Vedenie kombinované   | 27        |
| <b>3 Lineárne snímače dĺžky</b>   | <b>28</b> |
| 3.1 Odmeriavanie polohy v lineárnych sústavách  | 28        |
| 3.1.1 Priame a nepriame odmeriavanie polohy   | 28        |
| 3.1.2 Absolútne a inkrementálne meranie polohy  | 28        |
| 3.1.3 Otvorené a zapuzdrené snímanie polohy   | 30        |
| 3.2 Fotoelektrické snímanie   | 31        |
| 3.2.1 Princíp zobrazovacieho snímania   | 31        |
| 3.2.2 Princíp interferenčného snímania  | 31        |
| 3.3 Lineárne enkodéry od spoločnosti HEIDENHEIN   | 32        |
| 3.3.1 Výhody lineárnych enkodérov HEIDENHEIN  | 32        |
| 3.3.2 Konštrukcia   | 33        |
| 3.3.3 Dynamické správanie   | 33        |
| 3.4 Série zapuzdreným enkodérov od HEIDENHEIN   | 33        |
| 3.4.1 LC, LF, LS zapuzdrené lineárne snímacie zariadenia s krytom mierky v plnej veľkosti | 34        |
| 3.4.2 LC, LF, LS zapuzdrené lineárne snímacie zariadenia so štíhlou líniou krytu          | 35        |



|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>4</b> | <b>Analýza tepelných účinkov a chýb enkodéra</b>  | <b>37</b> |
| 4.1      | Termálne procesy v meracích systémoch . . . . .   | 37        |
| 4.2      | Simulovanie teplotných polí na základe poznatkov z vedeckého článku . . .                                     | 40        |
| 4.2.1    | Rovnomerný vplyv teploty okolia. Stanovenie korigovaného koeficientu lineárnej tepelnej rozťažnosti . . . . . | 40        |
| 4.2.2    | Statické tepelné účinky v lineárnom enkodéri . . . . .  | 41        |
| 4.2.3    | Dynamické tepelné procesy v lineárnom enkodéri . . . . .  | 43        |
| <b>5</b> | <b>Návrh dilatačnej podložky</b>  | <b>45</b> |
| 5.1      | Montážne charakteristiky . . . . .  | 45        |
| 5.1.1    | Lineárne snímacie zariadenia s malým prierezom . . . . .  | 45        |
| 5.1.2    | Lineárne snímacie zariadenia s veľkým prierezom . . . . .   | 47        |
| 5.2      | Konštrukčné varianty dilatačnej podložky . . . . .  | 47        |
| 5.2.1    | Konštrukčný variant č.1 . . . . .   | 47        |
| 5.2.2    | Konštrukčný variant č.2 . . . . .   | 48        |
| 5.2.3    | Konštrukčný variant č.3 . . . . .   | 48        |
| 5.3      | Hodnotenie . . . . .  | 49        |
| 5.4      | Detailné spracovanie najlepšej varianty . . . . .   | 50        |
| 5.4.1    | Charakteristika . . . . .   | 50        |
| 5.4.2    | Voľba materiálu . . . . .   | 51        |
| 5.4.3    | Termálna úloha . . . . .  | 52        |
| 5.4.4    | Statická úloha . . . . .  | 52        |
|          | <b>Záver</b>  | <b>54</b> |
|          | <b>Literatúra</b>   | <b>55</b> |
|          | <b>Zoznam skratiek a značiek</b>  | <b>58</b> |
|          | <b>Zoznam príloh</b>  | <b>59</b> |

# Úvod

Hlavným cieľom bakalárskej práce je konštrukčný návrh dilatačnej podložky pre lineárny enkodér. K tomu aby sme dosiahli tento požadovaný cieľ je potrebných niekoľko čiastkových cieľov. Základným kameňom každého konštrukčného návrhu je teoretické poznanie daného problému. Čiastkové ciele sa skladajú zo 4 teoretických a jednej praktickej kapitoly, kde sú postupne vysvetlené: základné poznatky, zloženie lineárnych sústav, hĺbkové poznatky o lineárnych snímačoch, tepelné účinky na lineárne snímače a nakoniec praktické porozumenie problému, prestavenie 3 konštrukčných variant a hodnotenie.

Merací prístroj je jedno z najdôležitejších zariadení v strojárenskom priemysle. Bez toho, aby sme mali informácie o polohe, teplote, tlaku, prietoku a o množstve ďalších iných veličín, nie je možný návrh, výroba ani sériová produkcia žiadnej strojnej súčasti. Lineárny snímač dĺžky je zariadenie ktoré sníma polohu objektu a je tiež jeden z meracích prístrojov, bez ktorého by obrábacie stroje nedokázali vykonávať svoju prácu. Každé takéto zariadenie sa skladá z prevodníku, ktorý prevádza danú fyzikálnu veličinu na inú a je súčasťou tzv. meracieho reťazca v senzore. Pre odvodenie vlastností celého meracieho reťazca môžeme využiť tzv. blokovú algebru. Vďaka tejto algebre si môžeme ukázať 3 základne zapojenia: sériové, paralelné a spätnoväzbové. Snímanie polohy je možné rozdeliť na množstvo druhov. Jednou z najdôležitejších rozdelení je podľa fyzikálneho princípu merania. Fyzikálny princíp merania nám hovorí, vďaka akému fyzikálnemu javu získavame požadovanú informáciu o polohe. Snímanie polohy je teda možné rozdeliť na : odporové, kapacitné, optické, magnetické a množstvo iných.

Lineárne snímače dĺžky, tak ako to majú v názve, sa používajú v posuvných lineárnych sústavách. Posuvné lineárne sústavy sa skladajú z : náhonu, vedenia, merania polohy, krytovania a mazania. Náhon v lineárnych sústavách môže byť vykonávaný rotačným servopohonom alebo lineárnym motorom. Vedenie v posuvných sústavách môže byť: valivé, klzné, hydrostatické, kombinované.

Odmeriavanie polohy v lineárnych sústavách sa rozdeľuje do niekoľko kategórií : priame a nepriame, absolútne a prírastkové, otvorené a zapuzdrené. Toto rozdelenie vplýva na presnosť merania, vlastnosti, cenu a teplotné správanie stroja. Snímače, pod ktoré sa dilatačná podložka bude navrhovať, sú od spoločnosti HEIDENHEIN. Dr. Johannes Heidenhain GmbH je súkromný podnik so sídlom v Traunreut v Nemecku, ktorý vyrába lineárne enkodéry pre numericky riadené stroje. Enkodéry HEIDENHEIN sa vyznačujú fotoelektrickým snímaním. Fotoelektrické snímanie sa vykonáva bez kontaktu a deteguje veľmi jemné stupňovacie čiary dĺžky len niekoľko mikrometrov. Tento princíp využíva 2 druhy skenovania: zobrazovacie a interferenčné. Firma HEIDENHEIN využíva vlastnú špecifickú konštrukciu enkodérov s veľmi dobrou presnosťou merania a výborným dynamickým správaním. Zapuzdrené enkodéry od tejto firmy sú rozdelené na 2 základné druhy podľa veľkosti a konštrukcie: snímacie zariadenia s krytom mierky v plnej veľkosti a snímacie zariadenia so štíhlou líniou krytu. Puzdra týchto lineárnych snímačov sú zložené z hliníkového obalu, zatiaľ čo mierka so stupnicou je z ocele. Pri zmene teploty dochádza k sťahovaniu a rozťahovaniu materiálu a to následne ovplyvňuje obal aj stupnicu. Pri návrhu podložky je veľmi dôležité s týmto popisom modelu rozťažnosti pravítka počítať.

Návrh podložky by mal počítať s niekoľkými variantami, z ktorých bude následne vybraná tá najlepšia varianta. Tieto varianty sa budú líšiť v montáži, spôsobe upnutia,

voľbe materiálu a v konštrukcií. Z poznatkov, ktoré budú publikované v tejto práci by sa malo jednoznačne dospieť k hodnoteniu a odporúčeniu pre prax.

# 1 Súčasný stav poznania

V tejto kapitole sa budeme zaoberať základnými vlastnosťami snímača jeho zložením, charakteristikou, chovaním a spôsobom zapojenia. Postupne si priblížime snímanie polohy a jeho základné rozdelenia.

## 1.1 Podstata snímačov a snímanie polohy

Snímač, tak ako väčšina podobných súčastí, sa skladá z jednoduchších častí, ktoré majú kardinálnu úlohu pri prenose požadovanej vstupnej informácie resp. transformáciu vstupných údajov na výstupné. Kvôli ľahšiemu pochopeniu využívame blokovú algebru, pomocou ktorej môžeme bloky rozdeliť do schém podľa toho, akým spôsobom ich môžeme napojiť na seba.

### 1.1.1 Princíp fungovania snímačov

Meranie fyzikálnych veličín je veľmi dôležité v každom technickom systéme. Pokiaľ nedokážeme merať požadovanú veličinu (teplota, tlak, poloha,...) s požadovanou presnosťou a rozsahom, nemôžeme očakávať, že systém bude uspokojivo fungovať. Preto je dôležité pochopiť základy merania rôznych fyzikálnych veličín, princíp senzoru, čo od neho môžeme očakávať, aké ma vlastnosti, ako ho správne umiestniť. [1]

#### Prevodník a senzor

Prevodník je technické zariadenie, ktoré prevádza meranú fyzikálnu veličinu na výstupný signál, ktorý môže byť nejakým spôsobom spracovaný alebo zobrazený. V našom ponímaní budeme rozumieť signál elektrický, aj keď existujú aj iné signály, napr. pneumatické. Prevodník je obvykle len jednou súčasťou tzv. meracieho reťazca. Typický merací reťazec v klasickom usporiadaní, keď jednotlivé bloky sú samostatné, je zobrazený na obr. 1.1. Meraná fyzikálna veličina je prevodníkom prevedená na elektrický signál (napätie, prúd). Tento signál je obvykle nevhodný pre priame zobrazenie alebo odoslanie do ďalších častí systému, je preto zosilnený zosilňovačom. Za zosilňovačom môžu byť následne ďalšie bloky, napr. filtrácia, spracovanie signálu apod. Posledným členom je zobrazovací blok, napr. merací prístroj, programovateľný automat alebo riadiaci počítač. [1]



Obr. 1.1: Usporiadanie meracieho reťazca v klasickom senzore [1]

Druhou možnosťou ako bloky usporiadať, je inteligentný senzor. Jednotlivé bloky sú obvykle integrované v jednom púzdre alebo integrovanom obvode. Inteligentný senzor opäť obsahuje prevodníky, typicky niekoľko fyzikálnych veličín, zosilňovače apod. Obvykle je

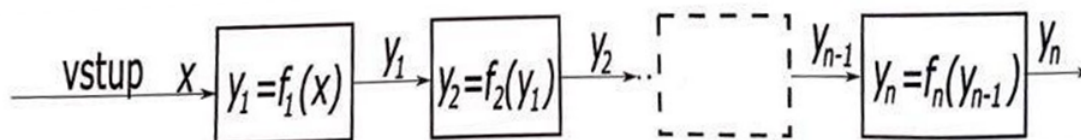
výstup z inteligentného senzora nejakou formou digitálnej komunikácie. Pre štandardizovanú zbernicu. [1]

### Bloková algebra

Bez ohľadu na meracie reťazce je vstupom vždy meraná fyzikálna veličina a výstupom elektrický signál. Vlastnosti celého meracieho reťazca sú dané vlastnosťami jednotlivých blokov. Pre odvodenie vlastností celého meracieho systému zo známych vlastností jednotlivých blokov môžeme s výhodou použiť blokovú algebru. Ukážeme si tri základné možnosti zapojenia. Sériové, paralelné, a spätnoväzobné zapojenie. [1]

### Sériové zapojenie

V sériovom zapojení sú všetky bloky radené sériovo t.j. výstup jedného bloku je zapojený na vstup druhého bloku. Príklad zapojenia na obr. 1.2. [1]



Obr. 1.2: Sériové zapojenie [1]

V prípade, že je k mame k dispozícii matematický popis vlastností blokov daný funkciami  $f_1, f_2, \dots, f_n$ , je možné výstupný signál  $y_n$  vypočítať podľa vzťahu 1.1 [1].

$$y_n = f_n(f_{n-1}(\dots f_2(f_1(x)))) \quad (1.1)$$

V prípade lineárnych funkcií, napr. 3 bloky definované funkciami, sú výsledné vzťahy dané rovnicami 1.2, 1.3 a 1.4. [1]

$$y_1 = k_1 * x \quad (1.2)$$

$$y_2 = k_2 * x \quad (1.3)$$

$$y = k_3 * y_2 \quad (1.4)$$

Výstup zapojenia je daný rovnicou 1.5. [1]

$$y = k_1 * k_2 * k_3 * x = K * x \quad (1.5)$$

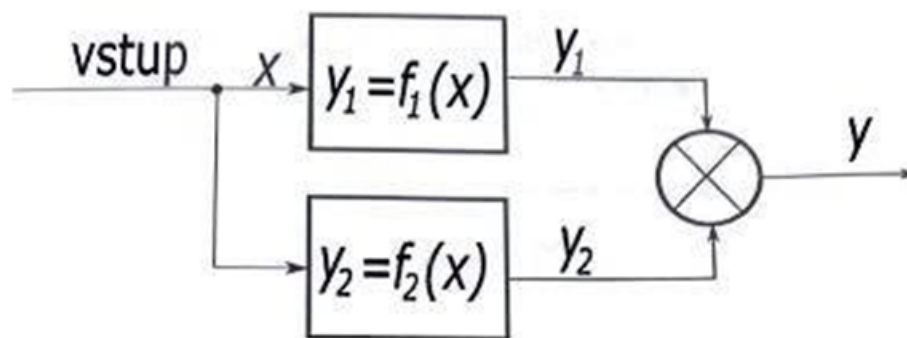
V prípadoch keď je známa štatistická charakteristika jednotlivých blokov môžeme výslednú charakteristiku získať graficky. [1]

### Paralelné zapojenie

Paralelné zapojenie si ukážeme na príklade dvoch zapojených blokov. Pre viac blokov je možné použiť analogický postup. Zapojenie je ukázané na obr. 1.3. Vstup  $x$  je spoločný pre obidva bloky, výstup oboch blokov je sčítaný súčtovým členom. [1]

Výstupný signál je daný vzťahom 1.6. [1]

$$y = y_1 + y_2 = f_1(x) + f_2(x) \quad (1.6)$$



Obr. 1.3: Paralelné zapojenie [1]

V prípade lineárnych funkcií pre dva bloky definovaných rovnicami 1.7 a 1.8. [1]

$$y_1 = k_1 * x \quad (1.7)$$

$$y_2 = k_2 * x \quad (1.8)$$

Výstupný signál pre dvojicu lineárnych funkcií je daný rovnicou 1.9 [1].

$$y = (k_1 + k_2) * x \quad (1.9)$$

Grafické riešenie ľubovoľnej funkcie je aplikovateľné aj v tomto prípade. Určená výsledná charakteristika je jednoduchým súčtom jednotlivých štatistických charakteristík. [1]

### Spätnoväzobné zapojenie

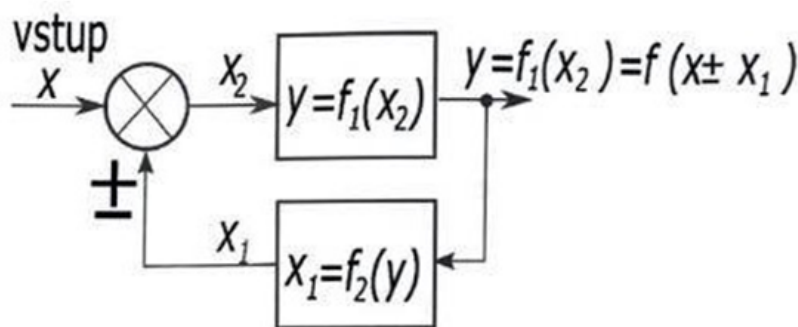
Spätnoväzobné zapojenie je veľmi časté v riadiacich systémoch. Podľa znamienka u spätnej väzby môžeme rozlišovať spätnú väzbu kladnú a spätnú väzbu zápornú. Schéma zobrazená na obr. 1.4. [1]

Vstupný signál je  $x$ , a výstupný signál je  $y$ . Súčtový blok sčíta signál  $x$  so signálom  $x_1$ , ktorý je výstupom bloku v spätnej väzbe popísaného funkciou  $x_1$ . Výstup súčtového bloku je signál  $x_2$ , ktorý je zavedený na vstup bloku popísaného funkciou  $y$  [1].

Podľa znamienka u súčtového bloku sa jedná o zapojenie s kladnou spätnou väzbou alebo zápornou spätnou väzbou [1].

Výstupný signál je daný vzťahom 1.10. [1]

$$y = f(x \pm x_1) \quad (1.10)$$



Obr. 1.4: Spätnoväzobné zapojenie [1]

Pre kladnú väzbu platí rovnica 1.11. [1]

$$y = f(x + x_1) \quad (1.11)$$

Pre zápornú väzbu platí rovnica 1.12. [1]

$$y = f(x - x_1) \quad (1.12)$$

V riadiacich systémoch sa používa výhradne záporná spätná väzba, ktorá zlepšuje a zaisťuje stabilitu systému. Kladná väzba vedie k presnému opaku tj. nestabilite systému [1].

Signál  $y$  pri lineárnych charakteristikách je daný rovnicou 1.13 [1].

$$y = k_2 * x \pm k_2 * k_1 * y \quad (1.13)$$

### Príklad použitia blokovej algebry

Jedným z možných príkladov využitia blokovej algebry je linearizácia statickej charakteristiky obr. 1.5. [1]

#### 1.1.2 Druhy snímania polohy

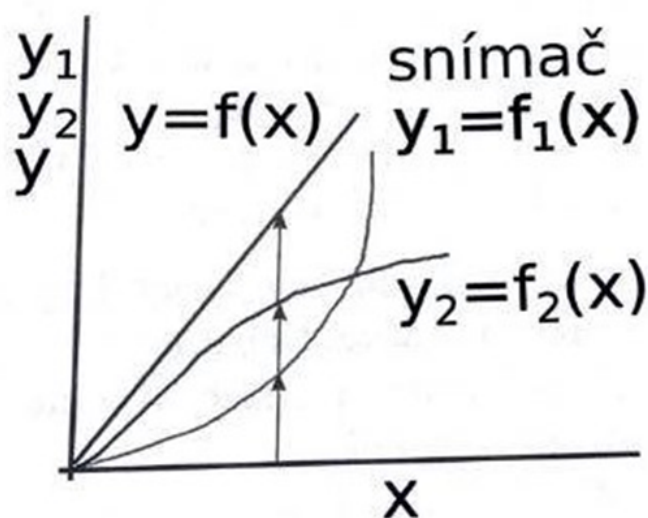
Snímače polohy merajú polohu objektu, resp. vzdialenosť objektu od snímača. Môžeme ich rozdeliť podľa niekoľko druhov:

1. Podľa princípu funkcie:

**analógové** snímače polohy sú z princípu svojej funkcie spojité, ich rozlíšenie nie je obmedzené. Obmedzenie potom vznikne obmedzením rozlíšenia daného meracieho prístroja alebo prevodníku, ktorý údaj prevedie na digitálny;

**digitálne** snímače polohy sú z hľadiska použitého princípu nespojité, tj. Údaj má definované minimálne rozlíšenie. Digitálny signál je potom obvykle priamo prenesený do meracieho systému, ale môže byť prevedený aj na analógový signál, napätie lebo prúd;

2. Podľa výstupného signálu:



Obr. 1.5: Využitie blokovej algebry k linearizácií [1]

**spojité** snímače určujú polohu spojitou detekciou objektu. Výstupom je signál úmerný polohe (vzdialenosti);

**proximitné** snímače polohy detekujú prítomnosť resp. neprítomnosť objektu v detekčnej zóne. Výstupný signál 0/1, tj. Objekt je prítomný alebo nie je prítomný. Tento druh snímačov sa využíva napr. na výrobných linkách pre detekciu výrobkov, ako snímače rýchlosti (výstupom sú pulzy), ako koncové spínače apod. Sú obvykle podstatne lacnejšie ako spojité snímače;

3. Podľa meranej veličiny:

**pre lineárny pohyb** z hľadiska princípu meriame lineárny pohyb;

**pre uhlové natočenie** z hľadiska princípu meriame uhlové natočenie; [1]

## 1.2 Fyzikálne prístupy snímania polohy

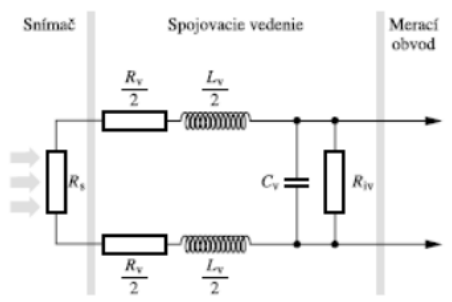
Snímače možno rozdeliť na kategórie, podľa toho aký fyzikálny princíp merania používame. Existuje množstvo druhov snímačov na základe fyzikálneho princípu preto si nasledujúcej podkapitole vysvetlíme a ukážeme iba tie najpoužívanejšie.

### 1.2.1 Odporové snímače

Odporové snímače patria do skupiny snímačov pasívnych. Meraná neelektrická veličina je snímačom prevádzaná na zmenu odporu. Odporové snímače bývajú zapojené do obvodov s pomocným napätím. Najčastejšie to býva vyvážený alebo nevyvážený mostík. Odporové snímače sa vyznačujú jednoduchosťou. Táto skupina snímačov je veľmi rozsiahla a umožňuje riešenie väčšiny problémov z oboru merania neelektrických veličín. [4]

Každý snímač je potrebné spojiť s meracím obvodom pomocou vodičov alebo spojovacieho vedenia. Vlastnosti tohto vedenia môžu výrazne ovplyvniť parametre snímača a





Obr. 1.6: Schéma zapojenia odporového snímača polohy [4]

presnosť merania. Elektrická náhradná schéma odporového snímača s vedením je naznačený na obr. 1.6. Aby nebola ovplyvnená citlivosť snímača a chyby spôsobené vedením (teplota ,vlhkosť, časová stálosť a pod.) boli v prijateľných medziach, musí platiť vzťah 1.14. [4]

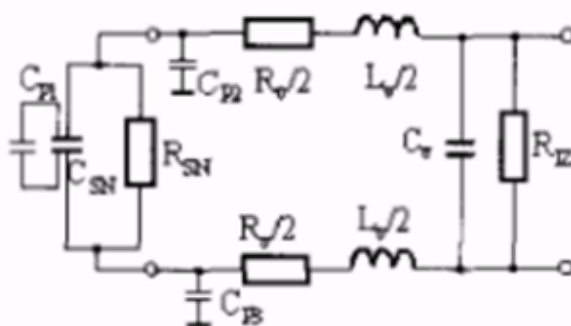
$$R_{iv} \gg R_s \gg R_v \quad (1.14)$$

Odporové snímače delíme na: odporové snímače kontaktné, odporové snímače využívajúce dotykový odpor, odporové snímače polohy (meracie potenciometre), odporové snímače deformácie (tenzometre), odporové snímače tepelné, odporové snímače žiarenia, odporové snímače magnetických veličín, odporové snímače vlhkosti, elektrolytické snímače. [4]

## 1.2.2 Kapacitné snímače

Pozostávajú z jedného alebo viac kondenzátorov, ktoré môžu mať premenlivú vzduchovú medzeru, premenlivé prekrytie elektród alebo premenlivé dielektrikum. Najčastejšie sa snímač upravuje v tvare doskového kondenzátora, pre kapacitu ktorého platí vzťah 1.15. [4]

$$C = \epsilon_0 * \epsilon_r * S/d \quad (1.15)$$



Obr. 1.7: Náhradná schéma obvodu kapacitného snímača [5]

Z ktorého vyplýva, že pre vyhodnotenie kapacity  $C$  kondenzátora môžeme využiť zmenu vzdialenosti elektród  $d$ , zmenu účinnej plochy prekrytia elektród alebo zmenu pomernej permitivity dielektrika  $\epsilon_r$ . Permitivita vákua je označená  $\epsilon_0$ . Na obrázku 1.7 je

zobrazená náhradná schéma obvodu s kapacitným snímačom. Obsahuje okrem vlastnej kapacity snímača  $C_{SN}$  paralelný odpor  $R_{SN}$  reprezentujúci zvod kondenzátoru a ďalej parametre vedenia, tj. odpor  $R_V$  indukčnosť  $L_V$ , izolačný odpor  $R_{IZ}$  a kapacitu  $C_V$ . Aby nedochádzalo k ovplyvňovaniu signálu snímača zmenou parametra vedenia (teplota, vlhkosť, dĺžka). Kapacitné snímače sú schopné detegovať objekt aj za prekážkou napr. stena. [5]

Keďže tvar kondenzátora ľahko možno prispôbiť najrôznejším požiadavkám, bolo vyrobené množstvo konštrukčných variantov kapacitných snímačov jednoduchých aj diferenciálnych. Najviac rozšírené sú doskové, doskové diferenciálne, prekryvacie, prekryvacie diferenciálne, premenlivé dielektrikum. [4]

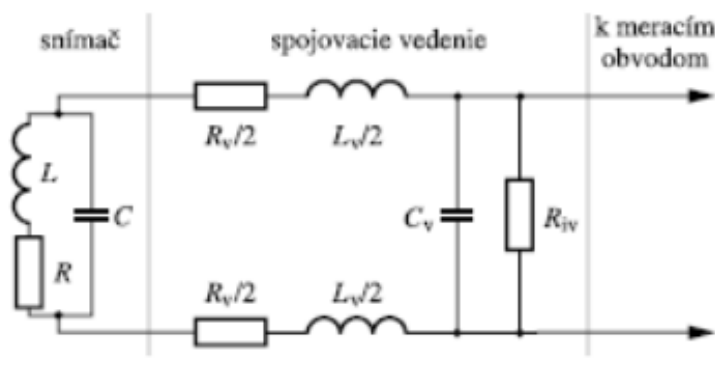
Snímače v tvare doskových kondenzátorov sa používajú na meranie malých posunutí, pričom diferenciálne vyhotovenie dovoľuje zväčšiť meracie rozsahy. Prekryvacie snímače sú vhodné na zistenie krútiacich momentov. Snímače s premenlivým dielektrikom sa využívajú najmä na hladinomery. [4, 5]

### 1.2.3 Indukčné snímače (generátorové)

Indukčné snímače predstavujú rozsiahlu skupinu, ktorá je využívaná predovšetkým na meranie magnetických veličín. U indukčného snímača ide o spojenie cievky a magnetického obvodu, u ktorého je vytvorený pomocou stáleho magnetu alebo budiaceho obvodu magnetický tok. Napätie indukované v cievke je dané Faradayovým zákonom. [4]

### 1.2.4 Indukčnosťné snímače

Indukčnosťné snímače predstavujú prevodníky neelektrickej veličiny na zmenu vlastnej alebo vzájomnej indukčnosti. Podstatnú časť indukčnosťného snímača tvorí cievka, prípadne systém cievok bez jadra alebo s feromagnetickým či neferomagnetickým elektricky vodivým jadrom. Pôsobením neelektrickej veličiny dochádza k posuvom jednotlivých častí, resp. k zmene ich magnetických a elektrických vlastností. [4]



Obr. 1.8: Schéma obvodu indukčnosťného snímača [4]

Ako naznačuje ekvivalentný obvod na obr. 1.8, reálny indukčnosťný snímač predstavuje zložitejšiu štruktúru. Okrem indukčnosti  $L$  treba vo všeobecnosti uvažovať i stratový odpor  $R$  a parazitnú kapacitu  $C$ . Stratový odpor je daný odporom cievky, ku ktorému sa pridávajú ešte straty v magnetickom jadre a straty spôsobené vírivými prúdmi. Indukčnosťný snímač má zvyčajne indukčnosťnú reaktanciu  $L$  oveľa väčšiu ako reálnu zložku

svoje impedancie R. Kapacitná reaktancia indukčného snímača sa väčšinou dá zanedbať. [4]

Podľa usporiadania cievok a magnetického obvodu a podľa toho, na ktorú konštrukčnú časť pôsobí meraná neelektrická veličina, indukčné snímače delíme na:

- snímače s malou vzduchovou medzerou;
- snímače s otvoreným magnetickým poľom;
- snímače s potlačeným poľom;
- snímače bez feromagnetika;
- snímače so stálym magnetickým obvodom a s pohyblivou cievkou; [4]

### 1.2.5 Optické snímače

Vo všeobecnosti pozostáva snímač, ktorý pracuje na optickom princípe, zo zdroja svetla, fotocitlivého prvku a prenosového média. Často sa požadujú aj prídavné zariadenia, napríklad šošovky, optické vlnovody, zrkadlá, filtre, polarizátory, polopriepustné membrány a prerušovacie kotúče. Optický snímač vzdialenosti je skonštruovaný tak, že zmena vzdialenosti medzi dvoma súčasťami snímača resp. medzi jednou časťou snímača a pohyblivým objektom má za následok zmenu vlastností svetelného lúča, spôsobenú jeho prenosom, odrazom, pohltitím rozptylom alebo ohybom. [4]

Väčšina optických snímačov posunutia využíva premenlivý odraz svetelného lúča, menej často jeho premenlivý prenos (zvyčajne v binárnom tvare: prechádza/neprechádza). Najrozšírenejšia metóda sa zakladá na zmene intenzity svetla v dôsledku posunutia. Keďže svetlo má aj vlnový charakter, využíva sa aj meranie doby šírenia sa signálu, fázový posun a interferencia [4].

Medzi zdroje svetelného žiarenia patria elektroluminiscenčná dióda (LED) a laserová dióda. [4]

### 1.2.6 Magnetické snímače

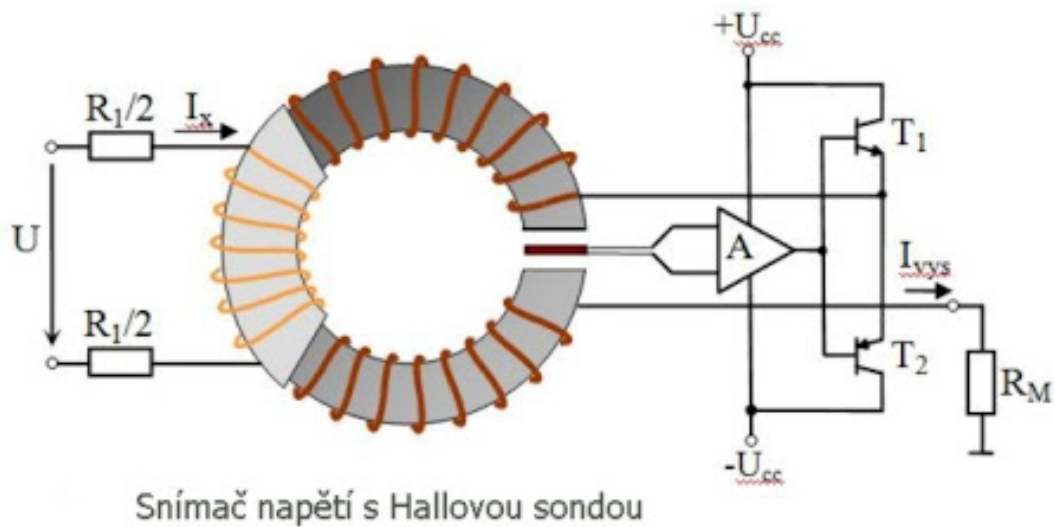
Srdcom každého magnetického snímača sú dva základné diely: malý dvojpólový magnet a čip s maticou Hallových sond (obr. 1.9). SONDY V ČIPE SNÍMAJÚ ZMENY MAGNETICKÉHO TOKU PRI ROTÁCIÍ INICIALIZAČNÉHO MAGNETU A VYTVARAJÚ HALLOVE NAPÄTIE, KTORÉ JE ÚMERNÉ TEJTO ZMENE. [8]

Snímače reagujú iba na zložku kolmú k povrchu čipu. Dômyselným návrhom matice snímacích Hallových sond sa podarilo obmedziť vplyv externých magnetických polí a snímač je schopný pracovať aj v prostredí s vysokou úrovňou magnetického rušenia a tiež sa podarilo vyrovnať s nedokonalosťami magnetického poľa inicializačného magnetu. Hallov napätie z jednotlivých sond snímačej matice je spracované ďalšími obvodmi čipu do požadovaného formátu výstupu. Spôsob výroby čipu umožňuje v jednom type čipov integrovať analógový, inkrementálny aj absolútny formát výstupného signálu. [8]

Magnetické snímače majú rad predností v porovnaní s tradičnými optickými snímačmi, najmä v týchto parametroch:

- kompaktná konštrukcia bez dotyku pohyblivých dielov;

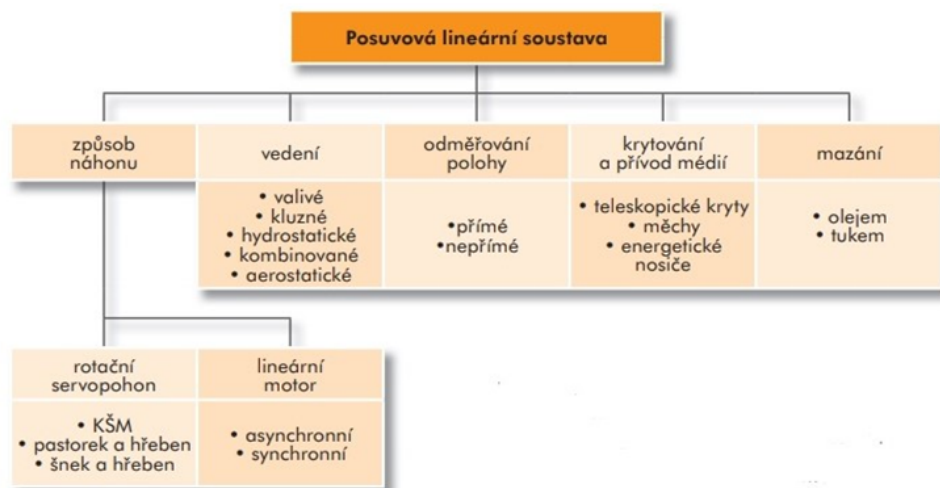
- vysoká odolnosť proti rázom, vibráciám a zrýchlenie;
- nízky moment zotrvačnosti - iba jeden malý pohyblivý diel;
- vysoká odolnosť voči špine, prachu a rezným kvapalinám - krytie až IP68;
- teplotná odolnosť do  $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- poľahlivé snímanie pri otáčkach až  $30\,000\text{ min}^{-1}$ ;
- nízke náklady na montáž; [8]



Obr. 1.9: Snímač napätia s Hallovou sondou [8]

## 2 Posuvné lineárne sústavy

V Súčasnej dobe sa v stavbe obrábacích centier využíva pre realizáciu posuvu elektro-mechanická posuvná sústava alebo náhon lineárnymi servomotormi. [2]



Obr. 2.1: Morfológie posuvnej sústavy [2]

Skladbu lineárnej posuvnej ústavy zobrazuje obr. 2.1. Na obr. 2.2 sú znázornené niektoré základné spôsoby lineárne posuvnej sústavy. [2]



Obr. 2.2: Príklad prevedenia náhonu lineárnej posuvnej sústavy [2]

### 2.1 Rotačný servopohon

#### 2.1.1 Gulôčková skrutka a matica

Priamočiary pohyb u CNC obrábacích strojov je buď hlavný posuvný rezný pohyb (nástroja a obrobku), alebo pomocný pohyb. Keď využijeme náhon guľôčkovej skrutky a matice, vyvodzuje motor väčšinou rotačný pohyb, ktorý je cez guľôčkovej skrutky transformovaný na priamočiary pohyb. Rotačný AC servopohon je ku guľôčkovej skrutke pripojený priamo pomocou spojky cez vložený prevod (remeň, ozubené kolo), cez vloženú prevodovku alebo kombináciu uvedených možností. Vhodný spôsob je daný kinematic-

kými, dynamickými alebo statickými pomermi, ktoré je nutné posudzovať od prípadu k prípadu. [2]

## AC elektromotory

Najviac využívaným rotačným servomotorom pre posuvné súradnice sú synchronne komutované elektromotory (AC). Tvoria kvalitatívne vyšší typ elektromotorov založených na súčasnom riadení troch svorkových prúdov, ktoré majú harmonický priebeh. Tento typ motorov sa najčastejšie používa pre pohon posuvov. [2]

Motor má nasledujúce výhody oproti jednosmernému (DC) motoru:

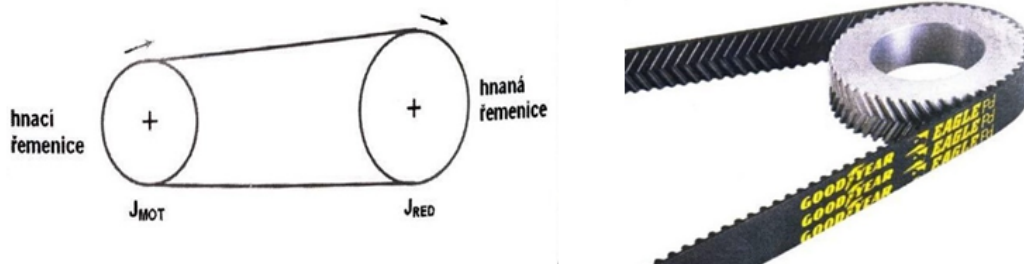
- nemusí udržiavať komutátor;
- nedochádza k obmedzovaniu výkonu;
- motor sa lepšie chladí;
- dobré krytie IP65;
- otáčky nie sú obmedzované mechanickým komutátorom ;
- napájací tranzistory umožňujú pracovať aj bez transformátoru; [2]

Asynchronne elektronicky komutované elektromotory sú motory s kietkovou kotvou nakrátko. Napájanie statorového vinutia je pomocou troch harmonických prúdov. Magnetické pole nie je tvorené magnetmi, ale indukovanými prúdmi ktoré sa do kotvy indukujú sklzom. [2]

## Remeňový prevod

Remeňový prevod prenáša požadovaný výkon pri rovnobežnom usporiadaní os remeníc na väčšie vzdialenosti. Mnohokrát slúži ako tlmiaci člen. [2]

Remenice používané v stavbe CNC strojov obr. 2.3 sú klinové (založené na princípu zvýšeného trenia vrstvy v klinovej drážke) a synchronne (ťažná vrstva je vybavené priečnymi zubmi). [2]



Obr. 2.3: Remeňový prevod vľavo a šípové remeňové ozubenie vpravo [2]

Klinové, tak ako aj synchronne remenice sa najčastejšie upevňujú pomocou kuželových svorných puzdiel. Svorné puzdra predstavujú bezpečne a ekonomicky prijateľné spojenie hriadeľa s nábojom mechanického prevodu. Výhodou je pomerne jednoduchá montáž, odolnosť voči vonkajšiemu zataženiu, prierez hriadeľa nie je zoslabovaný, prenos vysokých krútiacich momentov, radiálna alebo axiálna fixácia spojenia či bezvôľové spojenie. [2]

## Planétový prevod

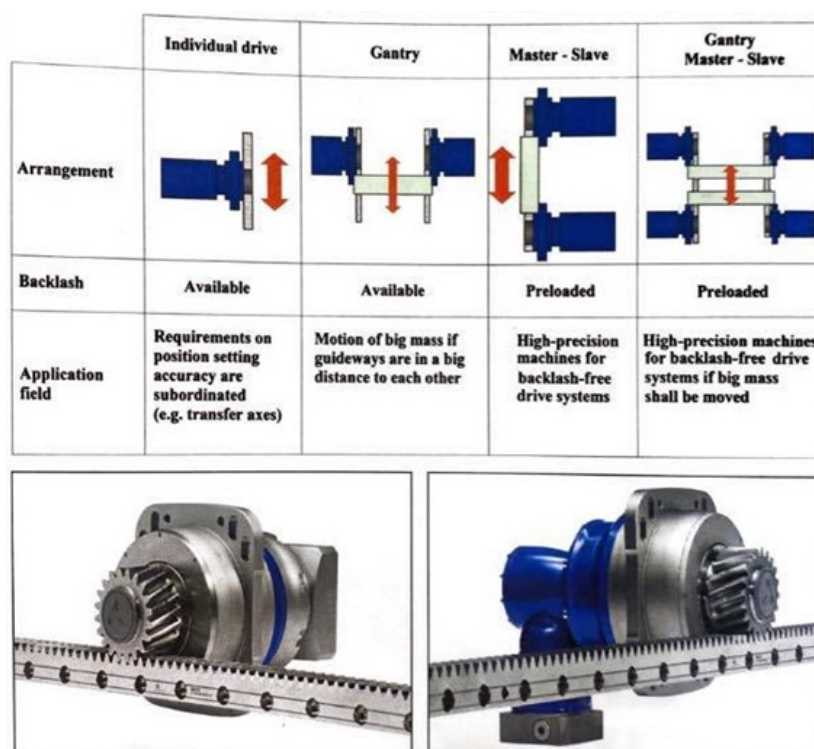
Pokiaľ ozubené kolá uložíme s hriadeľom do prevodovej skrine, dostávame prevodovky. Ozubené kolá je možné priestorovo rozmiestniť do podoby planét obiehajúcich okolo slnka. Prevodovky sú dodávané v prevedení, v ktorom ich je možné priamo namontovať na prírubu servomotora. [2]

### 2.1.2 Pastorok a hrebeň

Pre pohony posuvov CNC pracovných stolov s dlhými zdvihmi je použitie posuvných skrutiek už nevhodné. (tuhosť, vysoké otáčky). V takomto prípade je výhodné uplatnenie princípu pohonu ozubeným hrebeňom a pastorkom. Popis náhonových motorov a prípadných vložených prevodov bol už spomenutý v predchádzajúcej podkapitole a je pre tento typ náhonu rovnaký. V praxi sa ustálilo riešenie na obr. 2.4. [2]

Nevýhodou tejto kinematickej dvojice je jej nesamosfornosť, čo vyžaduje požaduje väčšinou aplikáciu brzdy ako pre zvislé osi, tak v prípade výpadku pohonu. [2]

V porovnaní so skrutkou a maticou má menší prevod, lepšiu účinnosť a menšiu tuhosť [2].



Obr. 2.4: Spôsob náhonu pomocou pastorku a hrebeňa [2]

### 2.1.3 Šnek a šnekový hrebeň

Pre posuvné sústavy s požadovanou vysokou hodnotou prevodového pomeru je možné často výhodne použiť aj princíp hydrostatického šnekového hrebeňa. Vhodná oblasť vy-

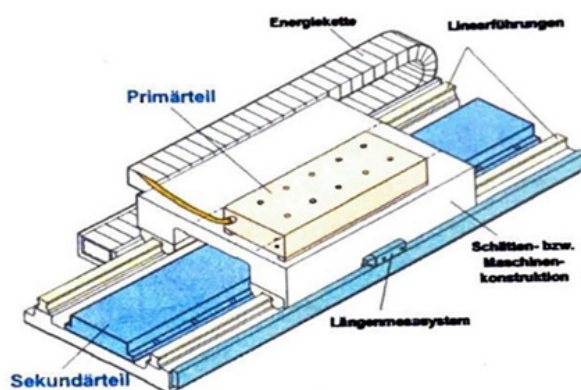
užitia je hlavne pri veľkých obrábacích strojoch pre pohon posuvov pracovných stolov. Výhody spočívajú hlavne v minimálnom trení a vysokej tuhosti. [2]

## 2.2 Lineárny motor

Technologické aplikácie dnešnej doby prevádzkované na CNC obrábacích strojoch sa pohybuje medzi dvoma krajnými hodnotami: vysokorýchlostnom obrábaní HSC (High Speed Cutting) a výkonným obrábacím strojom HPC (High Performance Cutting). Týmto strojom odpovedajú aj pohonné sústavy. Zatiaľ čo pre HPC použijeme skôr náhon lineárnych súradníc s guľôčkovou skrutkou, pre HSC používame lineárny motor obr. 2.5. Lineárne elektromotory sú elektromotory konštrukčne usporiadané tak, že nemajú žiadny vložený prevod ako guľôčková skrutka. Posuvnú silu vyvodzujú priamo pôsobením elektromagnetických síl na suport stroja. Elektromagnetická sila vzniká medzi pohyblivým primárnym dielom a pevným sekundárnym dielom priskrutkovaný k lôži. [2]

V momente, keď je pre technologickú aplikáciu potreba väčšej posuvnej sily, motory sa zdvojujú. Sú napájané z jedného zdroja a majú odmeriavanie polohy. [2]

Odmeriavanie polohy musí byť u lineárneho pohonu vyššie než u aplikácie s guľôčkovou skrutkou. Pohyblivá aj pevná časť motoru je vyrobená z feromagnetických materiálov, vďaka čomu vznikajú príťažlivé sily, ktoré musí zachytávať lineárne vedenie. Ďalšie negatívum je vznik tepla, ktoré ľahším spôsobom roznáša do mechanickej zástavby. [2]



Obr. 2.5: Lineárny motor [2]

## 2.3 Vedenie v posuvných sústavách

Vedenie slúži k definovanému pohybu posúvajúcich častí lineárnych posuvných sústav. Pri konštrukcii obrábacích strojov kladieme na vodiace plochy nasledujúce všeobecné požiadavky:

- vedenie má vykazovať vysokú statickú a dynamickú tuhosť;
- vedenie musí byť vyrobené s takou presnosťou, aby odchýlky dráhy pohybu od ideálneho tvaru dráhy boli v určitých medziach, daných požadovanou presnosťou práce stroja;



- presnosť dosiahnutia pri výrobe má byť čo najdlhšie zachovaná. Preto musí byť vedenie odolné voči opotrebeniu, tzn. Musí byť zvolený vhodný materiál plôch, poprípade tepelné spracovanie;
- možnosť vymedzenia vôle vzniknuté opotrebením plôch vedenia pri prevádzke, aby bolo možné dodržiavať presnosť aj správnu funkciu vedenia;
- výborná akosť povrchu, ktorá prispieva k zníženiu súčiniteľu trenia a tým aj k zníženiu odporu proti pohybu a k zníženiu opotrebenia;
- ochrana proti vnikaniu prachu, triesok a iných nečistôt, ktoré by veľmi agresívne pôsobili na vodiace plochy a spôsobovali ich opotrebenie, v kritickom prípade aj zadrhnutie;
- mazanie, aby straty pohybu a opotrebenie bolo čo najmenšie;
- tvar, ktorý musí za všetkých okolností pri prevádzke zaručovať vedenie pohybujúcich sa častí s jedným stupňom voľnosti a vhodné zachytenie síl prenášaných z jednej časti na druhú;
- jednoduchý tvar so zreteľom na ľahkú výrobu, vďaka tomu bude potom možnosť dobre splniť predchádzajúce požiadavky. Profil vedenia sa má skladať z čo najmenšieho počtu plôch; [2]

### 2.3.1 Vedenie klzné

Klzné vedenie sa využíva principiálne v dvoch variantách podľa trecích pomerov, ktoré v nich dominujú. Pri použití klzného vedenia môže byť akosť práce podstatne znižovaná nestabilitou pohybu, hlavne u hydrodynamického typu. [2]

Nestabilita sa prejavuje v dvoch podobách:

- nerovnomerný trhavý pohyb (horšia akosť povrchu);
- necistlivosť (znemožní nastavenie nástroja voči obrobku); [2]

Pri trhavých pohyboch musia sane, ktoré sú v pokoji, prekonať odpor trenia pri pokoji. V prípade že sú sane v pohybe, je súčiniteľ trenia rovný súčiniteľu trenia v pohybe. [2]

Posuvný mechanizmus však nie je dokonale tuhý a prebytok hnacej sily môže byť príčinou vzniku poskoku. Trhavý pohyb je tak výsledkom kombinácie poklesu súčiniteľu trenia a poddajnosti posuvného mechanizmu. [2]

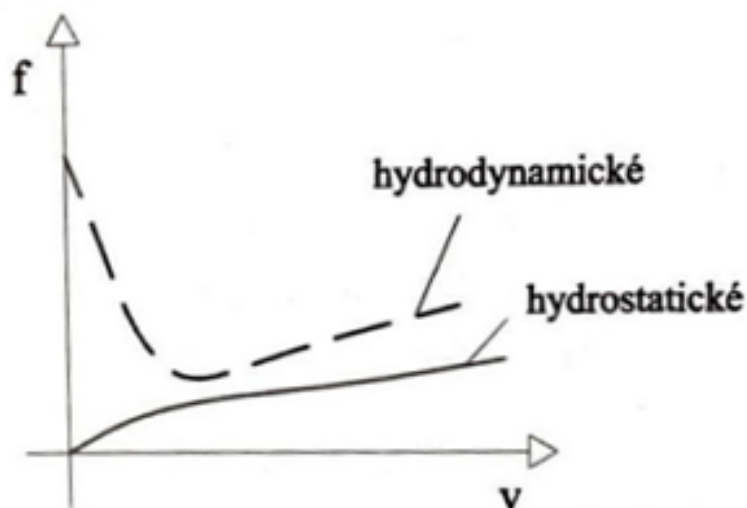
### Voľba materiálu vodiacich plôch

Počiatočná presnosť vedenia sa dosiahne vhodnou technológiou obrábania a zachovanie tejto presnosti dlhšiu dobu je potom daná voľbou vhodného materiálu, okrem iného aj ďalších podmienok, ako je mazanie a ochrana vodiacich plôch. Odolnosť vodiacich plôch proti opotrebeniu závisí na mnohých činiteľoch, hlavne na chemickom zložení, fyzikálnych a mechanických vlastností materiálu vedenia a materiálu združených plôch, na drsnosti povrchu klzných plôch. Niekedy sa tvrdý materiál odiera rýchlejšie ako mäkký, lebo veľmi záleží na rovnorodosti štruktúry materiálu a tvare kryštálov. Za rovnakých podmienok

sa dve združené vodiace plochy opotrebojú menej keď sú tvrdosti rozdielne. So zreteľom na to, že tvrdšia plocha sa obvykle opotrebuje pomalšie, volí sa vždy dôležitejšia a dlhšia plocha tvrdšia. Odolnosť voči opotrebeniu je tak všeobecne u tvrdých materiálov (ocel) vyššia ako u mäkkých (liatina). Najvýhodnejšia kombinácia jednej tvrdšej a druhej mäkšej plochy. Prvoradý význam má dobré utesnenie vodiacich plôch. [2]

### 2.3.2 Vedenie hydrostatické

Princíp hydrostatického vedenia je založený na dodávke tlakového oleja medzi vodiace plochy, čím je docielené tzv. kvapalinové trenie. Vedenie s kvapalným trením sa vyznačuje veľmi malým súčiniteľom trenia (0,000005) pri pomerne veľkom rozsahu rýchlostí. Porovnanie klzných vlastností vedenia hydrostatického s vedením hydrodynamickým je uvedený na obr. 2.6. Hydrostatické vedenia sa skladá z niekoľko ložiskových vačkov, ktoré sú upevnené na jednej z vodiacich plôch a druhá je úplne hladká, tak ako u normálneho klzného vedenia. [2]



Obr. 2.6: Závislosť súčiniteľu trenia na rýchlosti [2]

Vlastnosti hydrostatického vedenia:

- veľmi malý súčiniteľ trenia;
- s nárastom rýchlosti trecia sila stúpa;
- prakticky žiadne opotrebenie;
- vysoká tlmiaca schopnosť v smere kolmom na vodiace plochy;
- neexistuje vôľa;
- vysoká tuhosť vedenia; [2]

Nepriaznivo sa prejavujú nasledujúce vlastnosti:

- nutnosť veľmi tuhých častí vedenia, aby hrúbka filmu bola stále rovnaká o dĺžke šírke vodiacich plôch;
- nutnosť čerpadla;
- komplikovanejšia konštrukcia (rozvod a zvod tlakového oleja, špeciálne škrtiace ventily, tlakové bunky apod.);
- nutnosť starostlivej filtrácie oleja;
- komplikovaná konštrukcia, náročná výroba a údržba a nákladná prevádzka; [2]

### 2.3.3 Valivé vedenie

So zreteľom na požiadavky CNC obrábania strojov, sa zvyšujú nároky na dokonalú plynulosť posuvných pohybov u užívateľov a tým vzniká požiadavka na dosiahnutie čo najmenšieho rozptylu veľkosti dráhy pri nabehtnutí na požadovaný rozmer. Tieto mimoriadne vysoké požiadavky sú síce splniteľné klzným vedením hydrodynamickým, ale efektívnejší z pohľadu technického je vedenie hydrostatické alebo valivé. [2]

Valivé vedenie sa v nedávnej histórii začalo používať u najpresnejších strojov. Prednosťou tohto vedenia sú obdobné ako pri použití valivých ložísk namiesto klzných pri uložení hriadeľa. Je to predovšetkým:

- celkovo menší súčiniteľ trenia a nepatrný rozdiel medzi súčiniteľom trenia v pokoji a za pohybu, čo má veľký vplyv na odstránení trhavých pohybov pre nepatrných rýchlostiach;
- minimálne opotrebenie a tým dlhá životnosť;
- možnosti vymedzenia vôle a predpätia;
- vysoká presnosť pohybu aj pri malých rýchlostiach; [2]

Na druhej strane ako nevýhody valivého ložiska možno uviesť:

- náročnosť na presnosť výroby a tým niekedy vyššie ceny;
- väčšie rozmery ako u vedenia klzného;
- menšia schopnosť útlmu trenia; [2]

### 2.3.4 Vedenie kombinované

Vedenie kombinované spojuje výhody a nevýhody jednotlivých druhov vedenia. Kombinované klzno-valivé vedenie uzavreté sa používa s výhodou tam, kde je nutné utlmiť kmitanie od zaťaženia z rezného procesu (vrchné a bočné plochy lišty) a pritom nezvyšovať. [2]

## 3 Lineárne snímače dĺžky

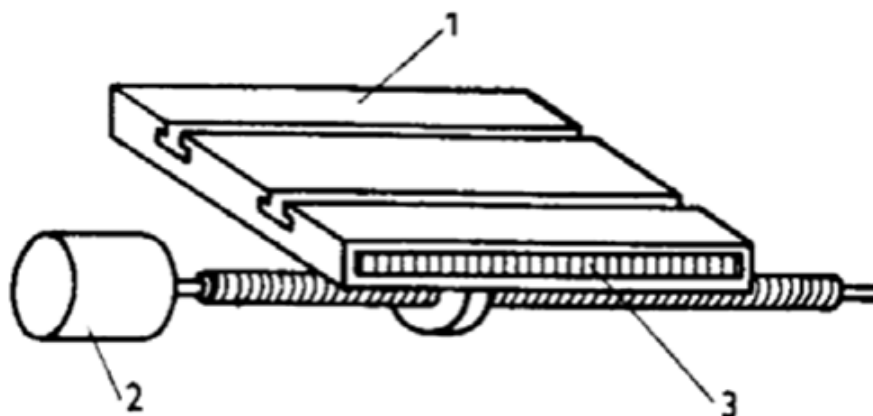
### 3.1 Odmeriavanie polohy v lineárnych sústavách

Odmeriavacie zariadenie tvorí dôležitú časť NC stroja, pretože do značnej miery ovplyvňujú ich výslednú presnosť. Za účelom zistenia presnej polohy osových saní sú tieto zariadenia vybavené špeciálnym odmeriavacím zariadením. Právítko hlási odchýlky väčšie ako 0,001 mm, resp. 0,001° uhlovej výchylky. Keď zodpovedá odmeraná hodnota hodnote naprogramovanej, dôjde k vypnutiu posuvu. [9]

#### 3.1.1 Priame a nepriame odmeriavanie polohy

##### Priame odmeriavanie polohy

Systémy priameho odmeriavania (obr. 3.1) sa umiestňujú tak, aby bezprostredne poskytovali údaj o relatívnom pohybe pohybujúcej sa časti stroja vzhľadom k jeho rámu. Zväčša sa používajú lineárne odmeriavacie zariadenia (optické alebo magnetické). [9]



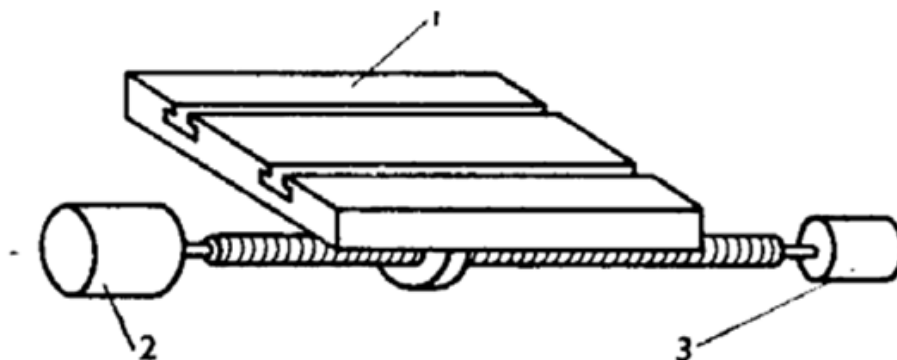
Obr. 3.1: Schéma priameho odmeriavania 1-pracovný stôl, 2-pohon, 3-odmeriavacie zariadenie [9]

##### Nepriame odmeriavanie polohy

Pri nepriamom odmeriavaní (obr. 3.2) sa nesleduje poloha riadenej časti stroja, ale poloha pohyblivej časti servomotoru, ktorý realizuje pohyb. Napr. pripájajú sa na posuvné guľôčkové skrutky, príp. prevody ozubeného hrebeňa s pastorkom (nepriamy spôsob odmeriavania). Pri nepriamom odmeriavaní polohy sa do chyby premieta rozťažnosť skrutky a jej oteplenie, vôľa v pohybe ústroja. [9]

#### 3.1.2 Absolútne a inkrementálne meranie polohy

Enkodéry s optickým skenovaním obsahujú meracie štandardy periodických štruktúr známe ako dieliky. Tieto stupnice sa vzťahujú na podklad zo skla alebo ocele. Stupnicový podklad pre veľké meracie dĺžky je ocelová páska. [3]

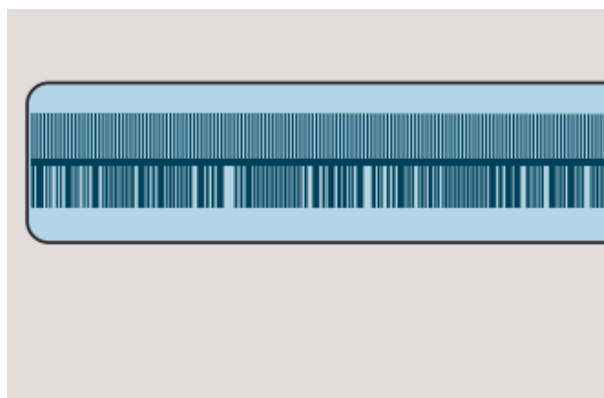


Obr. 3.2: Schéma nepriameho odmeriavania 1-pracovný stôl, 2-pohon, 3-odmeriavacie zariadenie [9]

Fotolitografický výrobný proces vyvinutý spoločnosťou HEIDENHAIN produkuje periódu mriežky obvykle od  $40 \mu m$  do  $4 \mu m$ . [3]

### Absolútna metóda merania

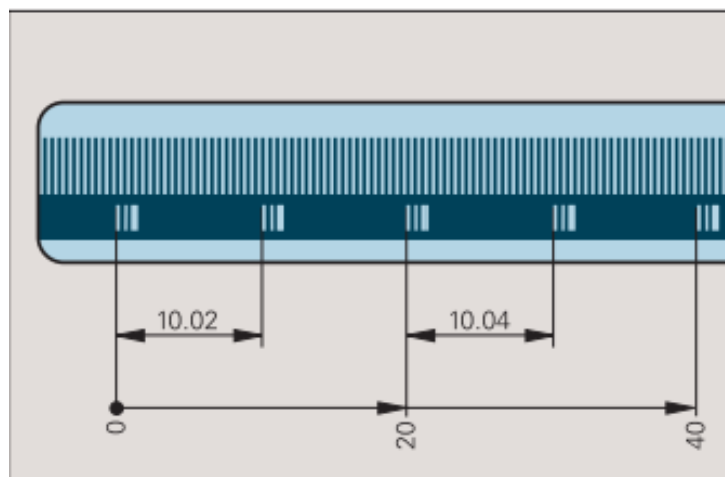
Pri absolútnej metóde merania je hodnota polohy ihneď po zapnutí k dispozícii a môže byť volaná ďalšou elektronikou. Nie je potreba pohybovať osami na vyhľadanie referenčnej pozície. Informácie o absolútnej polohe sa čítajú zo stupnice, ktorá je tvorená zo štruktúrovaného sériového absolútneho kódu obr. 3.3. [3]



Obr. 3.3: Schéma reprezentujúca absolútny sériový kód s dodatočným pridaním inkrementálnej stopy [3]

### Inkrementálna metóda merania

Inkrementálnou meracou metódou dieliky pozostávajú z periodickej mriežkovej štruktúry. Informácia o pozícií sa získava spočítaním jednotlivých prírastkov (krokov merania) z počiatočného bodu obr. 3.4. Keďže na zistenie je potrebný absolútny odkaz, sú mierky a meracie pásky vybavené ďalšou stopou, ktorá nesie referenčnú značku. Absolútna pozícia na stupnici je stanovená referenčnou značkou. Z uvedeného dôvodu je potrebné pred skenovaním na túto referenčnú značku nabehnúť. [3]



Obr. 3.4: Schematické znázornenie inkrementálnej stupnice so vzdialenostným snímaním referenčnej značky (LS ako príklad) [3]

### 3.1.3 Otvorené a zapuzdrené snímanie polohy

#### Otvorené lineárne snímače

Otvorené lineárne snímače pracujú bez mechanického kontaktu medzi snímacou hlavou, meradlom, alebo meracím lúčom. Typickými aplikáciami týchto snímačov sú meracie stroje, komparátory a iné presné zariadenia v strojárnskej metrológii, rovnako ako výroba a meracie stroje, napríklad v polovodičovom priemysle. [7]

#### Zapuzdrené lineárne snímače

Zapuzdrené lineárne snímače sú chránené proti prachu, špine a chladiacim kvapalinám a sú ideálne pre prácu na obrábacích strojoch. [6]

Zapuzdrené lineárne snímače sa dodávajú s:

- veľkoprofilovým puzdrom
  - pre vysokú odolnosť voči vibráciám;
  - do 30 cm meracej dĺžky
- nízkoprofilovým puzdrom
  - pre obmedzené vstavané rozmery;
  - do meracej dĺžky 1240 mm s montážnou lištou až do dĺžky 2040 mm;
  - vo špecifických prípadoch sa pri extrémnych dĺžkach používajú tzv. segmentované zapuzdrené snímače, s vloženou ocelovou stupnicou, dĺžky až niekoľko desiatok metrov; [6]

U zapuzdrených lineárnych snímačov HEIDENHAIN hliníkové puzdro chráni meradlo, snímaciu hlavu a jej vedenie pred špinami, prachom a striekajúcou vodou. Elastické tesniace lišty uzatvárajú puzdro. Snímacia hlava je vedená plynule po meradle, bez trenia. Pružné uloženie snímačovej hlavy tlmí nerovnosti medzi snímačom a saňami stroja. [6]

## 3.2 Fotoelektrické snímanie

Väčšina snímačov, ktorá využíva princíp fotoelektrického snímania pochádza od spoločnosti HEIDENHEIN. Fotoelektrické snímanie sa vykonáva bez kontaktu. Táto metóda deteguje aj extrémne jemné stupňovacie čiary so šírkou len niekoľkých mikrometrov a vytvára výstupné signály s veľmi malými časovými periódami. [3]

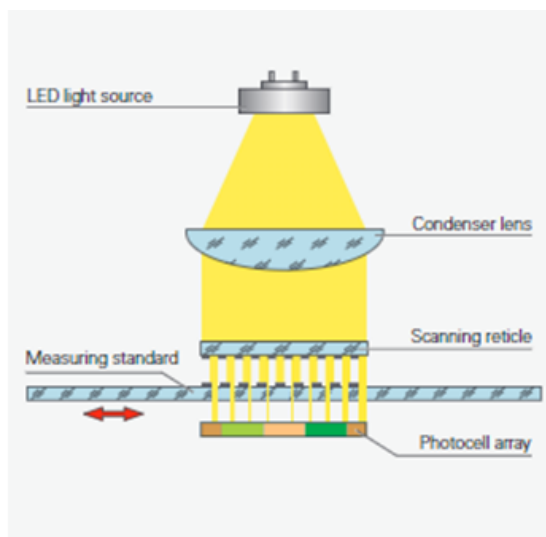
Čím je jemnejšia perióda mriežky meracieho štandardu, tým väčší je účinok difrakcie na fotoelektrické skenovanie. Využívajú dva zásady skenovania:

- Princíp **zobrazovacieho snímania** pre periódy mriežky  $20\ \mu\text{m}$  a  $40\ \mu\text{m}$
- Princíp **interferenčného snímania** s veľmi jemným odstupňovaním s periódou mriežky, napríklad  $8\ \mu\text{m}$ . [3]

### 3.2.1 Princíp zobrazovacieho snímania

Jednoducho povedané, princíp zobrazovacieho skenovania (obr. 3.5) používa princíp projected-light pre generovanie signálu : dve mriežky s rovnakými alebo podobnými periódami mriežky, stupnica a zameriavač sú presunuté voči sebe. Nosný materiál snímacieho zameriavača je priehľadný, zatiaľ čo odstupňovanie meracieho štandardu sa môže aplikovať na priehľadný materiál alebo reflexný materiál. [3]

Keď paralelné svetlo prechádza cez mriežku, začnú sa v určitej vzdialenosti premietat svetlé a tmavé polia. Na tomto mieste sa označuje index mriežky. Keď sa dve mriežky pohybujú navzájom voči sebe, dopadajúce svetlo je modulované: ak sú medzery zarovnané, svetlo prechádza cez. Ak sa čiary jednej mriežky zhodujú s medzerami druhej, neprechádza žiadne svetlo. Pole fotovoltaiických buniek prevádza tieto variácie intenzity svetla do elektrických signálov. [3]

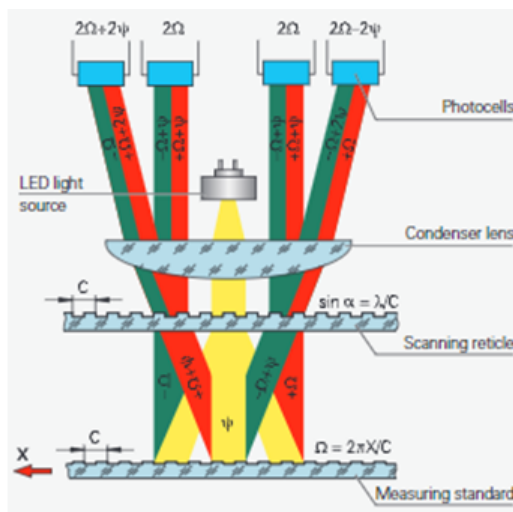


Obr. 3.5: Princíp zobrazovacieho snímania [3]

### 3.2.2 Princíp interferenčného snímania

Princíp interferenčného snímania (obr. 3.6) využíva difrakciu a interferenciu svetla na jemné rozdelené mriežky, aby sa vytvorili signály používané na meranie posunu. Ako

šstandard merania sa používa krok mriežky: Reflexné čiary s výškou 0,2 um sa aplikujú na plochý, reflexný povrch. Pred týmto sa nachádza snímací zameriavač, čo je priehľadná fázová mriežka s rovnakou periódou mriežky ako stupnica. Keď cez snímací zameriavač prechádza ľahká vlna, vzniká difrakcia do troch čiastkových vln o špecifických hodnotách 1, 0 a -1, pričom majú takmer rovnakú svietivosť. Difrakcie vln sú v takom rozsahu, že väčšina svetelnej intenzity sa nachádza v odrazených difrakčných hodnotách 1 a -1. Tieto čiastočné vlny sa opäť stretávajú na fázovej mriežke skenovacieho zameriavača, kde opäť podliehajú difrakciám a interferenciám. To produkuje v podstate tri vlny, ktoré opustia snímací zameriavač v rôznych uhloch. Fotobunky konvertujú tieto striedavé intenzity svetla do elektrických signálov. [3]



Obr. 3.6: Princíp interferenčného snímania [3]

### 3.3 Lineárne enkodéry od spoločnosti HEIDENHEIN

Lineárne snímače od spoločnosti HEIDENHAIN pre numericky riadené obrábacie stroje môžu byť použité takmer všade. Sú ideálne pre stroje a iné zariadenia, ktorých prírodné osi sú v uzavretej slučke, ako sú frézovacie stroje, obrábacie strediská, frézky, sústruhy a brúsky. Priaznivé dynamické správanie lineárnych snímačov, ich vysokej prípustnej rýchlosti prechodu, a ich zrýchlenie v smere merania ich predurčuje pre použitie na vysoko dynamických konvenčných osiach, ako aj na priame pohony. [3]

Spoločnosť HEIDENHAIN tiež dodáva lineárne snímače pre iné aplikácie, ako sú:

- ručné obrábacie stroje;
- lisy a ohýbanie;
- automatizačné a výrobné zariadenia; [3]

#### 3.3.1 Výhody lineárnych enkodérov HEIDENHEIN

Ak sa na meranie dĺžky používa lineárny snímač, riadiaca slučka polohy obsahuje kompletnú napájaciu mechaniku. Toto sa označuje ako uzavretá operácia slučky. Prenos chyby



z mechaniky môže byť detegované lineárnym snímačom na posuvnej osi a koriguje sa kontrolnou elektronikou. To umožňuje odstrániť množstvo potenciálnych zdrojov chýb:

- chyba umiestnenia v dôsledku produkcie tepla v recirkulačnej guľovej skrutke;
- reverzná chyba;
- kinematická chyba spôsobená chybou guľových skrutiek; [3]

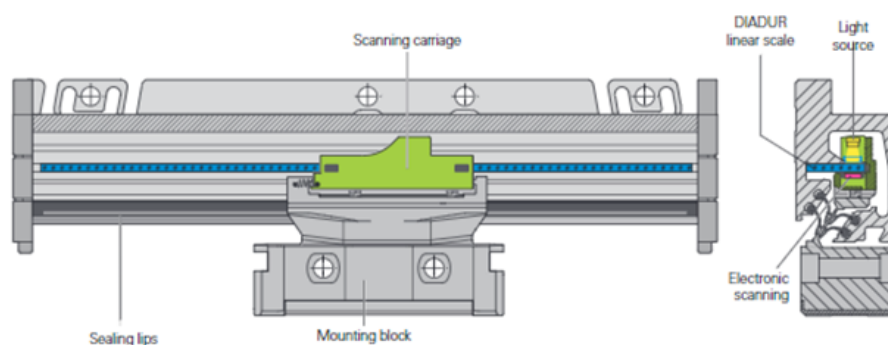
Lineárne snímače sú preto potrebné pre obrábacie stroje, pre ktoré je nevyhnutná vysoká presnosť umiestnenia a vysoká rýchlosť obrábania. [3]

### 3.3.2 Konštrukcia

Lineárne snímače pre numericky riadené obrábacie stroje sú utesnené meracie zariadenia: *hliníkové puzdro* chráni *stupnicu, snímací vozík* a jeho vodiadlo z čipov od prachu a striekajúcej vody. *Elastické výplne* orientované smerom nadol slúžia na utesnenie krytu. [3]

Snímací vozík cestuje pozdĺž škály na vodiacej ploche s nízkym trením. Spojka spája snímací vozík s montážnym blokom a kompenzuje nesúlad medzi meradlom a vedením stroja. [3]

V závislosti na modeli snímača, sú prípustné bočné a axiálne posuvy  $\pm 0,2 \text{ mm}$  až  $\pm 0,3 \text{ mm}$  medzi mierkou a montážnym blokom. [3]



Obr. 3.7: Schematický dizajn snímača LC 115 [3]

### 3.3.3 Dynamické správanie

Lineárne snímače z HEIDENHAIN sú charakterizované ich vysokou tuhosťou v smere merania. Je to veľmi dôležitý predpoklad pre vysoko kvalitnú presnosť tvarovania stroja. Okrem toho, nízka hmotnosť pohyblivých zložiek prispieva k ich vynikajúcemu dynamickému správaniu. [3]

## 3.4 Série zapuzdreným enkodérov od HEIDENHEIN

Ako sme sa dozvedeli v predošlých kapitolách snímače dĺžky možno rozdeliť na otvorene a zapuzdrené. Zapuzdrené lineárne snímače možno rozdeliť do niekoľko sérií, ktoré sa líšia hlavne vo veľkosti puzdra, inkrementálnom alebo absolútnom snímaní, meracích dĺžkach a tolerancií vibrácií. [14]

### 3.4.1 LC, LF, LS zapuzdrené lineárne snímacie zariadenia s krytom mierky v plnej veľkosti

Lineárne snímacie zariadenia, s krytom mierky plnej veľkosti (obr.3.8), sa vyznačujú vysokou toleranciou voči vibráciám. [14]

Absolútne lineárne snímacie zariadenia LC 100 a série LC 200 poskytujú absolútnu hodnotu polohy bez potreby akéhokolvek predchádzajúceho posuvu. Záležiac na verzii, môžu byť inkrementálne signály pridané dodatočne. LC 100 je možné namontovať do rovnakých párovacích rozmerov ako inkrementálne lineárne snímače LS 100 série a majú rovnaké mechanické vlastnosti a dizajn. [14]

Inkrementálne snímače typu LF sú známe tým že obsahujú merací štandard s relatívne jemnou periódou mriežky. Toto ich robí obzvlášť atraktívne pre aplikácie vyžadujúce veľmi vysokú opakovateľnosť. [14]

#### LC 100

- Meranie absolútnej polohy
- Definované tepelné správanie
- Vysoká odolnosť proti vibráciám
- Dva montážne prístupy
- Skenovanie jedného poľa [14]

#### LC 200

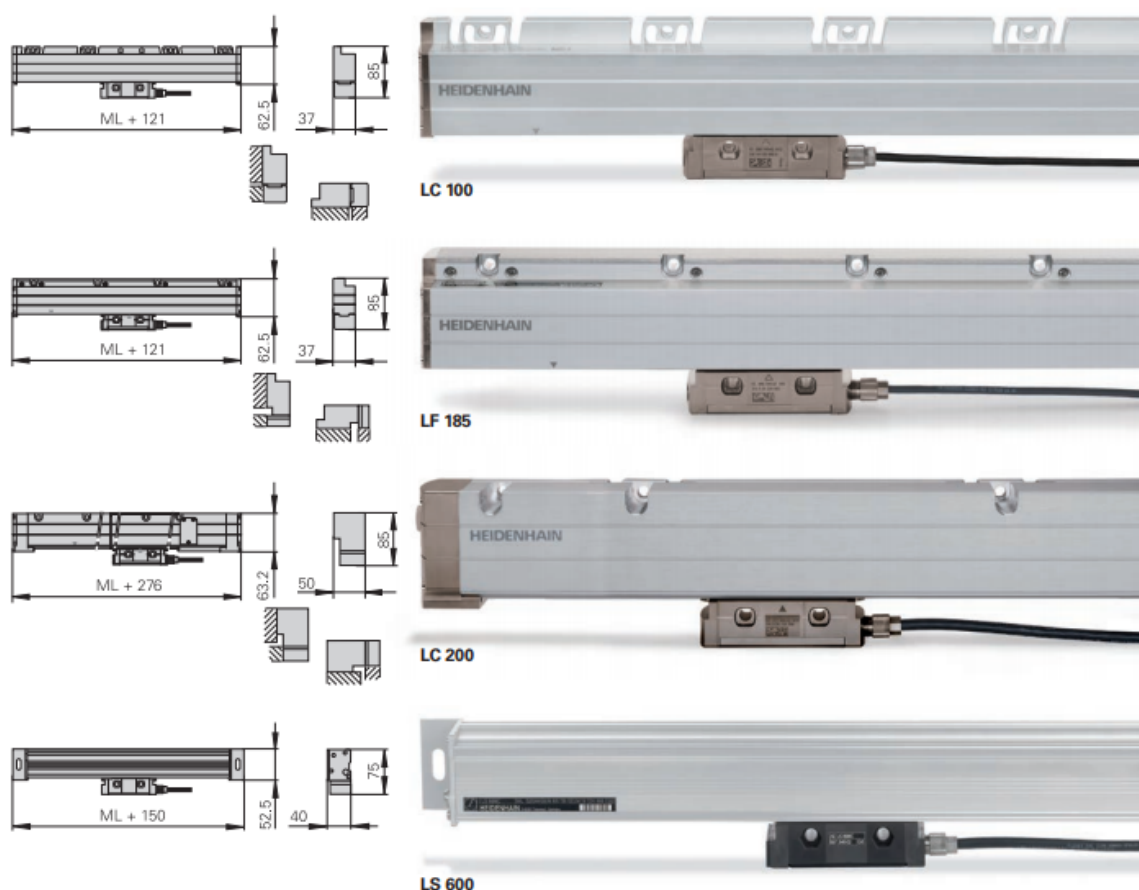
- Absolútne meranie polohy
- Pre veľké meracie dĺžky do 28 m
- Definované tepelné správanie
- Dva montážne prístupy
- Skenovanie jedného poľa
- Jedno-sekciová verzia až do 4240 mm [11, 14]

#### LF 185

- Inkrementálne meranie polohy
- Veľmi vysoká opakovateľnosť
- Tepelné správanie podobné oceli alebo odliatku
- Vysoká miera vibrácií
- Skenovanie jedného poľa [14]

LS 600

- Inkrementálne meranie polohy
- Zvyčajne pre ručné stroje
- Jednoduchá montáž [14]



Obr. 3.8: Zapuzdrené lineárne snímacie zariadenia s krytom mierky v plnej veľkosti [14]

### 3.4.2 LC, LF, LS zapuzdrené lineárne snímacie zariadenia so štíhlou líniou krytu

Zapuzdrené lineárne snímacie zariadenia so štíhlou líniou (obr.3.9) krytu sa primárne používajú tam, kde je inštalačný priestor obmedzený. [14]

Absolútne lineárne snímacie zariadenia modelu LC 400 série poskytujú absolútnu hodnotu polohy bez potreby predchádzajúceho posuvu. U série LS 400 inkrementálnych lineárnych snímačov je prvoradá vysoká presnosť a definované tepelné správanie. [14]

LC 400

- Meranie absolútnej polohy

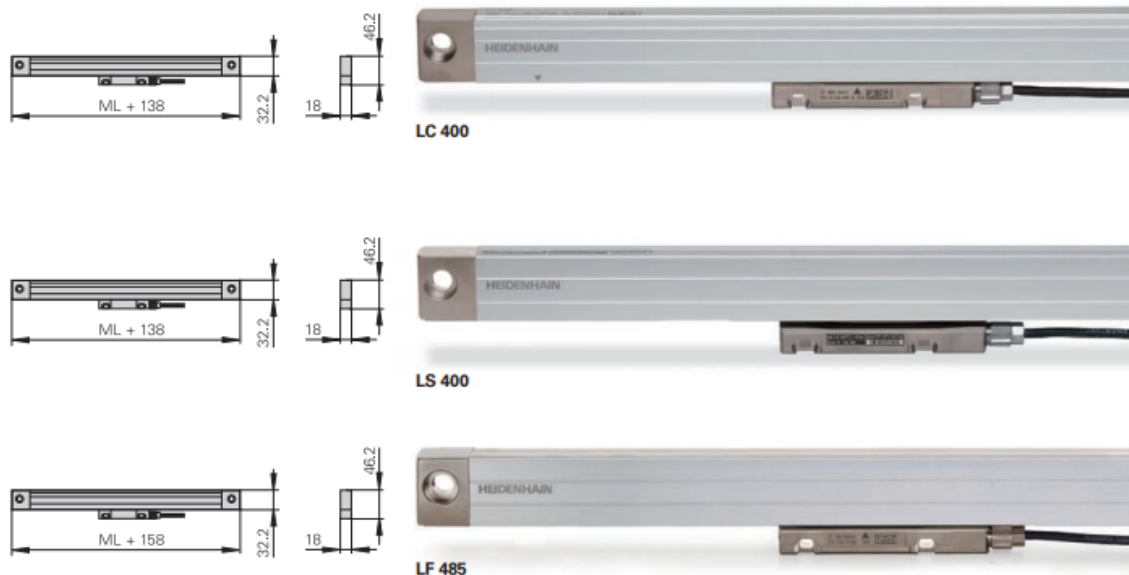
- Definované tepelné správanie
- Skenovanie jedného poľa
- Obzvlášť ľahká inštalácia s montážnou lištou [12, 14]

### LS 400

- Inkrementálne meranie polohy
- Definované tepelné správanie
- Skenovanie jedného poľa [14]

### LF 485

- Inkrementálne meranie polohy
- Veľmi vysoká opakovateľnosť
- Tepelné správanie podobné oceli alebo odliatku
- Skenovanie jedného poľa
- Kompaktný dizajn [13, 14]



Obr. 3.9: Zapuzdrené lineárne snímacie zariadenia so štíhlou líniou krytu [14]

## 4 Analýza tepelných účinkov a chýb enkodéra

Požiadavky na technologické stroje a ich merania sa neustále zvyšujú. Zvýšenie presnosti strojov, pri nákladoch na presnosť ich výroby, nie je vždy možný, okrem toho, technicky a ekonomicky nie veľmi efektívny. Vypočítaná kompenzácia chýb otvára široké možnosti, keď je chyba kalibrovaná, zapamätaná a odpočítaná v technologickom procese. To sa aplikuje na obzvlášť komplikované technologické stroje, ktoré obsahujú meracie systémy. [10]

Chyby precíznych meracích zariadení môžu byť rozdelené do niekoľkých skupín: geometrické a kinematické chyby, tepelné chyby, chyby budené silou v operačnom procese ďalšie chyby, ktoré sa vyskytujú v dôsledku pokrývania meracích systémov. [10]

Jedným z hlavných dôvodov chýb je termoelastická deformácia meracieho systému, ktorá sa objaví v dôsledku tepelnej chyby, t.j. tepelný proces a zmena teploty. Vo všeobecnosti existujú dva typy zdrojov tepla v presných meracích systémov: interné a externé. Vnútorne zdroje tepla odkazujú na teplo vyrobené v procese prevádzky stroja: výsledok tepla z trenia otočných bodov a teplo vyrobené motormi. Externé zdroje tepla zahŕňajú zmeny v okolitej teplote: slnečné a vnútorné žiarenie.

1. *Zabránenie tepelným chybám.* Táto stratégia je založená na vyhýbaní sa možným tepelným deformáciám výberom vhodnosti a materiálov stavebných prvkov, ktoré majú citlivé veľmi úzke koeficienty expanzie tepla v mriežkových detailoch.
2. *Kontrola tepelných javov.* Ďalším spôsobom zníženia tepelných chýb, je kontrola prenosu tepla v presných meracích systémoch alebo vyhýbanie sa nerovnomernému rozvodu teploty.
3. *Kompenzácia tepelných chýb.* Kompenzácia termálnych chýb je proces, keď je chyba opravená zavedením korekčných koeficientov. Porovnanie s predchádzajúcimi dvoma metódami je kompenzácia tepelných chýb vhodnejšia hlavne čo sa týka ekonomickej stránky. Okrem toho, takýto model kompenzácie môže byť zavedený na akúkoľvek časť dizajnu snímača, expozíciu alebo plášť. [10]

### 4.1 Termálne procesy v meracích systémoch

Dokonca aj mechatronické zariadenia obzvlášť vysokej kvality, používané v priemysle, sa nevyhnutne stretávajú s rôznymi faktormi, ktoré negatívne ovplyvňujú využitie stroja alebo jeho systémov a stav rôznych geometrických a tepelných chýb. Posledné uvedené sú obzvlášť aktuálne ako prvky strojov ovplyvnené teplotnými zmenami, začínajú sa buď rozťahovať alebo zmršťovať a môžu spôsobiť škodlivé deformácie mechanizmu. Termálne chyby v presných systémoch, ktoré ovplyvňujú deformáciu strojových prvkov a iných ťažkostí, tvoria približne 40-70 % z celkového počtu chýb. Tento typ chýb je sotva predvídateľný, pretože teplotné polia sa neustále menia v závislosti od režimu operácie stroja a podmienok prostredia. [10]

Automatizované robotické systémy, CNC obrábacie centrá, koordinačné meracie stroje a podobné mechanizmy vykonávajú technologické procesy obrábania, prepravy alebo merania štrukturálne. Najčastejšie sa skladajú z troch hlavných častí :

1. *Objekt.* V technologickom procese je prvok spracovávaný, prepravovaný alebo meraný.
2. *Konštrukcia stroja.* Rám stroja, ktorý podporuje celú konštrukciu a kombinuje jednotlivé časti systému.
3. *Meracie systémy.* Integrovaný merací systém vytvára spätnú väzbu, ktorá pomáha ovládať akčné členy a vykonávať presné pohyby. [10]

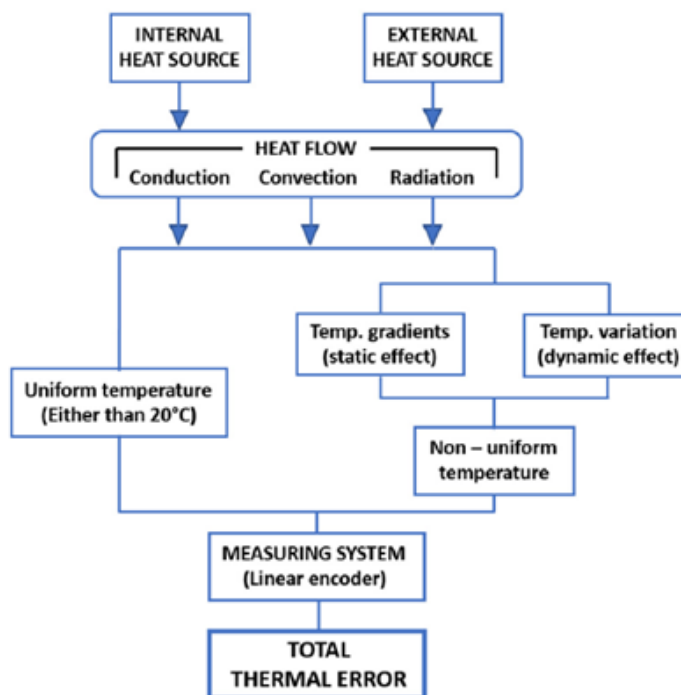
Pretože optické lineárne meracie zariadenia, ako aj iné meracie systémy, sú integrované v technologických strojoch, mali by sa tepelné zdroje a ďalšie škodlivé faktory, ktoré ich ovplyvňujú, analyzovať vyhodnotením celého mechatronického systému. V týchto automatizovaných systémoch sa rozlišujú tieto vnútorné a vonkajšie zdroje tepelných chýb:

1. *Teplu uvoľnené počas procesu obrábania.* Teplu generované počas procesu rezania numerickým riadiacim strediskom alebo opracovanie súčasti obrábacím strojom má priamy vplyv na presnosť výrobku aj na samotný stroj.
2. *Teplu generované zariadením (strojom).* Relatívne pohyby medzi rôznymi prvkami stroja spôsobujú uvoľňovanie tepla v kontaktných zónach. Takéto zdroje tepla môžu potenciálne obsahovať ložiská, ozubené kolesá a hydraulický olej, rôzne ovládače a spojky, vedenia, čerpadlá a motory. Teplu môžu tiež generovať elektronické komponenty alebo iné externé zdroje tepla.
3. *Chladiace a vykurovacie systémy.* Niektoré mechatronické zariadenia majú integrované chladiace alebo vykurovacie systémy, ktoré priamo ovplyvňujú teplotné javy (napr. chladiaca emulzia počas spracovania kovu, ventilátory elektronických súčiastok atď.).
4. *Vplyv pracovnej miestnosti.* Teplota priestorov (miestnosť, dielňa, tepelne stabilné laboratória atď.), kde sa nachádza technologický stroj.
5. *Vplyv operátora.* Teplu ktoré je generované a prenášané operátorom pri kontakte so zariadením.
6. *Tepelný vplyv predchádzajúceho prostredia.* Pri náhlej zmene v prostredia prvku, stroja alebo jeho systému, po určitú dobu dominujú teplotné rozdiely, kým sa nedosiahne nastavená teplota. [10]

Podľa diagramu prevládajúcich tepelných účinkov v strojných zariadeniach vyvinutého R. Rameshom, bola vyvinutá univerzálna bloková schéma, ktorá odhaľuje tvorbu tepelných chýb integrovaných meracích systémov v mechatronických zariadeniach. Schéma je znázornená na obrázku 4.1. [10]

Tok tepla generovaný vnútornými a vonkajšími zdrojmi teploty sa prenáša tepelnou vodivosťou, konvekčnými a radiačnými technikami a vytvára vhodné teplotné pole prevládajúce v technologickom zariadení vrátane meracích systémov. Výsledné teplotné polia môžu byť homogénne, to znamená, že majú konštantnú hodnotu teploty. [10]

Ak sa takáto ustálená teplotná hodnota líši od štandardných 20 °C, všetky prvky stroja a meracieho systému sa rozšíria alebo zmenšia rovnomerne v závislosti od ich koeficientov teplotnej rozťažnosti. V opačnom prípade začnú prevažovať teplotné gradienty, ktoré sa



Obr. 4.1: Termálne účinky v integrovaných meracích systémoch [10]

nerovnomerne šíria rôznymi teplotami. Pri variabilných zdrojoch teploty alebo chladiacich systémoch integrovaných v mechanizme sa teplotné gradienty môžu meniť dynamicky v priebehu času. V tomto prípade majú hysterézne účinky značný vplyv. [10]

Pretože fotoelektrické lineárne snímače sú najbežnejšie používaným systémom merania, je dôležité predovšetkým pochopenie základných tepelných procesov a chýb pri analýze. [10]

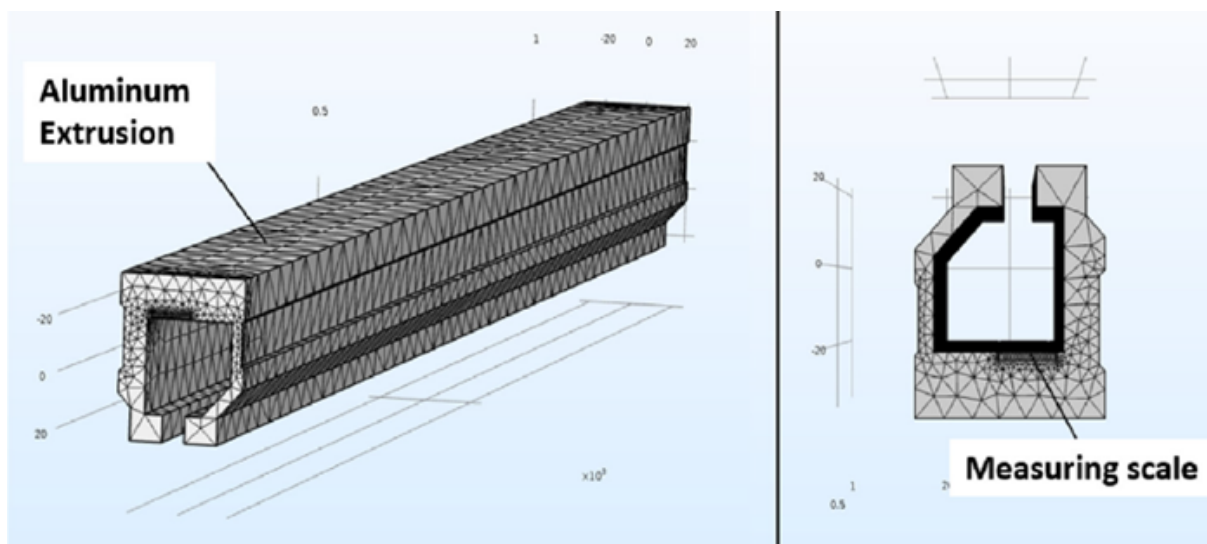
Kvôli rôznym koeficientom tepelnej rozťažnosti a metódam montáže, sa mriežka lineárneho meracieho zariadenia a hliníkového puzdra rozširuje alebo zmršťuje inak. Tieto procesy indukujú deformácie, ktoré majú priamy vplyv na presnosť merania. Preto je potrebné starostlivo zvážiť tepelné chyby v lineárnych snímačoch. [10]

Pri typických aplikáciách by sa tepelné správanie lineárneho snímača malo zhodovať s teplotným správaním stroja alebo meraných objektov. Pri zmene teploty sa musí prvok rozširovať alebo zmršťovať reprodukovateľným spôsobom. Na druhej strane v aplikáciách nanotechnológií je zásadná aj malá zmena geometrie prvkov. V takom prípade je jedným z možných riešení, ako sa vyhnúť vplyvu teplotných zmien, použitie špeciálnych materiálov s minimálnymi koeficientmi tepelnej rozťažnosti (sklokeramika s koeficientom rozťažnosti  $0 \pm 0,1 * 10^{-6}K^{-1}$ ). Ďalším spôsobom riešenia tepelných chýb je kompenzácia. Hlavnou myšlienkou tejto metódy je sledovať množstvo nepresností a kompenzovať ich elektronicky. [10]

Pretože tepelné procesy v aplikáciách ako lineárne snímače sú komplikované kvôli neustále prechvým teplotným gradientom a odchýlkam tepelných koeficientov materiálov, chyby meracieho systému nie sú opakovateľné alebo systematické. Preto je ťažké riadiť riadnu kompenzačnú akciu. Ale v niektorých prípadoch, keď sa tepelné podmienky zásadne nemenia, by bolo veľmi výhodné mať lineárny snímač, ktorý v reálnom čase kompenzuje tepelné chyby. [10]

## 4.2 Simulovanie teplotných polí na základe poznatkov z vedeckého článku

Teplotné pole a modelovanie teplotných chýb sa vykonáva pomocou metódy konečných prvkov v prostredí „COMSOL Multiphysics“. Je vytvorený zjednodušený 3D model hliníkovej extrúzie lineárneho snímača spolu s meracou stupnicou z nehrdzavejúcej ocele. Neskôr je tento model rozdelený na konečné štvorstenné prvky. Tento fragmentovaný model lineárneho snímacieho zariadenia je znázornený na obr. 4.2. [10]



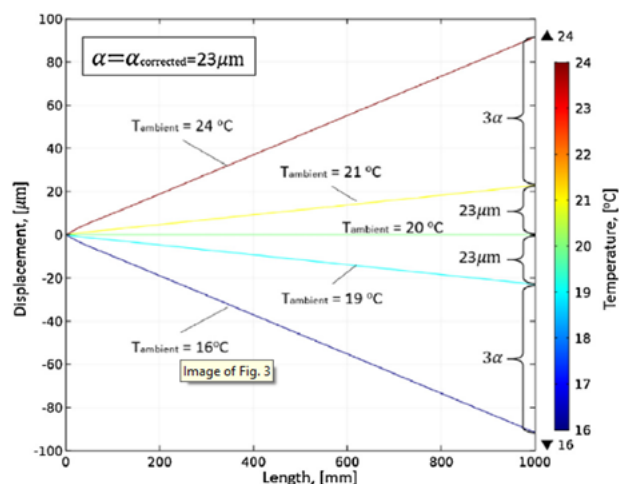
Obr. 4.2: 3D model profilu lineárneho snímacieho zariadenia a meracej stupnice rozdelený na konečné prvky [10]

Modelovaná termomechanická úloha spočíva v simulácii teplotných polí a modelovaní mechanických deformácií pod vplyvom zistených teplotných gradientov. Prvá časť úlohy je riešená pomocou matematického balíka „*Heat transfer in solids*“. Pozdĺžne teplotné deformácie pásky z nehrdzavejúcej ocele majú priamy vplyv na presnosť merania snímacieho zariadenia. Zväčšenie alebo zmenšenie meracej stupnice pri termálnom účinku je možné nájsť pomocou balíka „*Solid Mechanics*“. Správne riešenie sa dosiahne spojením týchto dvoch úloh do bežnej úlohy „*Multiphysics*“. [10]

### 4.2.1 Rovnomerný vplyv teploty okolia. Stanovenie korigovaného koeficientu lineárnej tepelnej rozťažnosti

Fragment analyzovaného optického lineárneho snímača sa skladá z 1 metrového hliníkovej extrúzie a zabudovanej pásky z nehrdzavejúcej ocele s meracou stupnicou vyrytou laserom. Lineárny koeficient tepelnej rozťažnosti hliníkového profilu je  $= 23 \mu\text{m}/\text{m}$ . Použitá páska z nehrdzavejúcej ocele má koeficient  $= 10,5 \mu\text{m}/\text{m}$ . Keď je do extrúzie pripojená meracia stupnica, tieto koeficienty sa začnú líšiť v dôsledku rozdielnej hmotnosti, geometrických parametrov a typu upevnenia. Vykonáva sa počítačová simulácia, počas ktorej sa pri rôznych jednotných teplotách okolia určuje celková expanzia a kontrakcia zostavy. Celkový posun pozdĺž hliníkového profilu lineárneho snímacieho zariadenia je vynesný na obr. 4.3. [10]





Obr. 4.3: Posun hliníkovej extrúzie pri rôznych jednotných teplotách okolia [10]

Ako je zrejmé z grafu, pri 20 °C, nedochádza k žiadnemu posunu. Táto teplota okolia sa používa ako referencia a podľa nej sa počítajú všetky deformácie. Keď sa teplota prostredia zvýši alebo zníži o jeden stupeň Celzia, 1-metrový profil sa relatívne rozšíri alebo stiahne o 23  $\mu\text{m}$ . Takáto hodnota lineárnej tepelnej rozťažnosti zostáva konštantná a dá sa akceptovať ako opravená hodnota:  $\alpha = \alpha_{\text{opraven}} = 23 \mu\text{m}/\text{m}$ . [10]

Podobný graf je vynesenej pre pásku z nehrdzavejúcej ocele. Bližšie informácie sú zobrazené na obr. 4.4. [10]

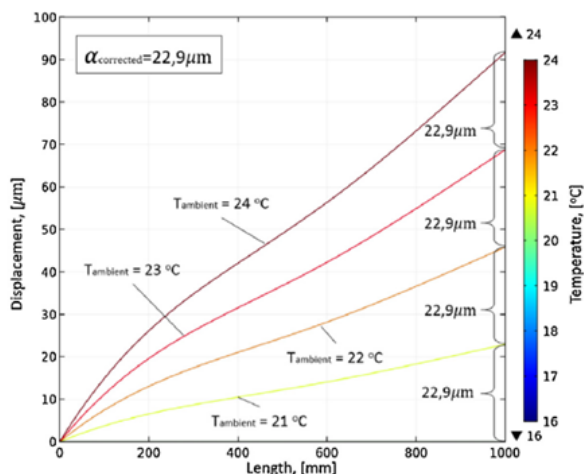
Vykonané modelovanie ukazuje, že 1 meter dlhá meracia stupnica rozširuje 22,9  $\mu\text{m}$  na jeden stupeň Celzia. Koeficient tepelnej rozťažnosti pásky z nehrdzavejúcej ocele sa drasticky mení, pretože hmotnosť a geometrické rozmery extrúzie hliníka sú v porovnaní s páskou z nehrdzavejúcej ocele omnoho väčšie. Je tiež zrejmé, že profil posunu meracej stupnice sa znižuje lineárne pri zvyšovaní teploty okolia. Bude to mať vplyv na postup kompenzácie v reálnom čase, najmä pri teplotách, ktoré sú oveľa vyššie alebo menšie ako 20 °C. Avšak v malom rozmedzí teplôt  $\pm 5$  stupňov Celzia by také rozdelenie posunu mohlo byť celkom presne aproximované lineárnou funkciou. Korigovaný koeficient lineárnej tepelnej rozťažnosti meracej stupnice by sa mohol akceptovať ako: korigovaný = 22,9  $\mu\text{m}/\text{m}$ . [10]

#### 4.2.2 Statické tepelné účinky v lineárnom enkodéri

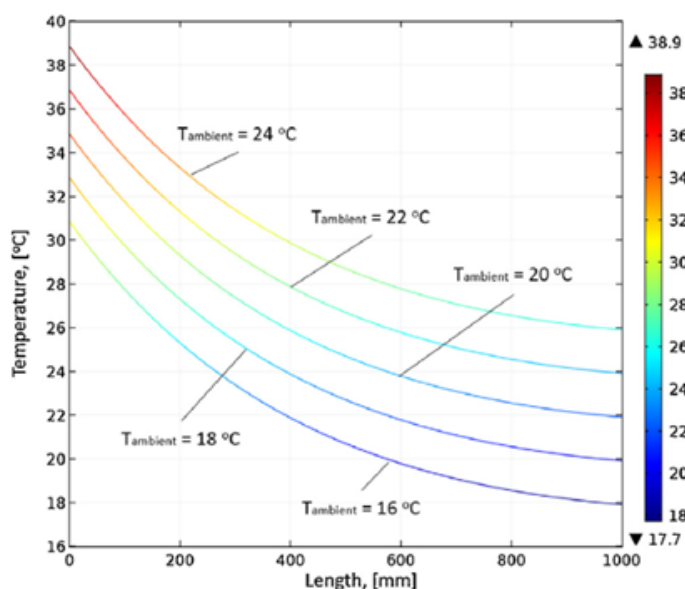
Keď je merací systém ovplyvňovaný konštantným externým zdrojom tepla, vytvorí sa nadčasový geometrický gradient pozdĺž geometrie snímacieho zariadenia. Takéto nerovnomerné rozloženie teplotných polí ovplyvňuje aj výskyt nerovnomerných teplotných deformácií. Ďalej uvádzame príklad, keď je jeden koniec optického lineárneho snímacieho zariadenia ovplyvnený zdrojom tepla pri teplote 35 °C. Rovnovážne teplotné gradienty a celkové posuny spôsobené termoelastickou deformáciou sa simulujú pri niekoľkých rôznych teplotách okolia: 16 °C, 18 °C, 20 °C, 22 °C a 24 °C. Distribúcia teploty pozdĺž hliníkovej extrúzie je vynesena na obr. 4.5. [10]

Pretože hliník je dobrým tepelným vodičom (tepelná vodivosť 210 W/(mK)), teplo generované zdrojom sa vedie cez celú extrúziu dlhú 1 meter. Profil teplotného gradientu sa udržiava približne rovnaký pri každej simulovanej jednotnej teplote okolia. [10]

Distribúcia teploty pozdĺž meracej stupnice z ocele je vynesena na obr. 4.6. [10]



Obr. 4.4: Celkový posun pozdĺž ocelej stupnice pri rôznych jednotných teplotách okolia [10]

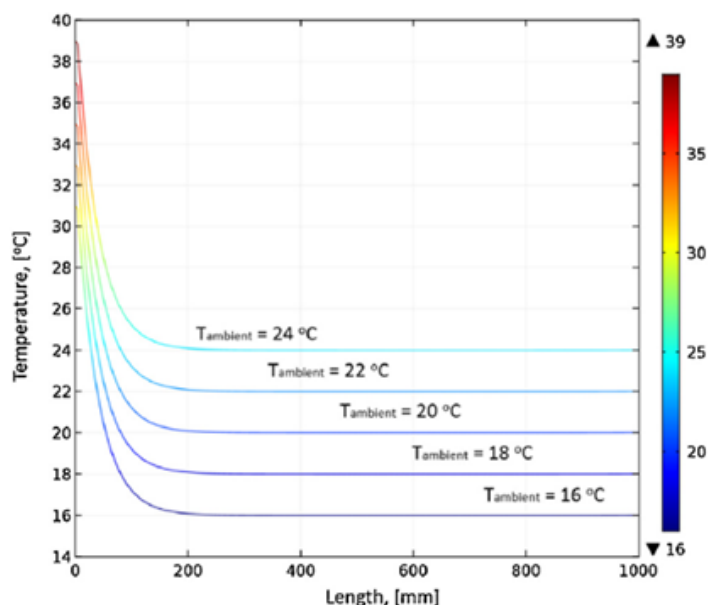


Obr. 4.5: Distribúcia teploty pozdĺž hliníkovej extrúzie pri rôznych rovnomerných okolitých teplotách, zatiaľ čo jeden koniec snímacieho zariadenia je ovplyvňovaný externým zdrojom tepla [10]

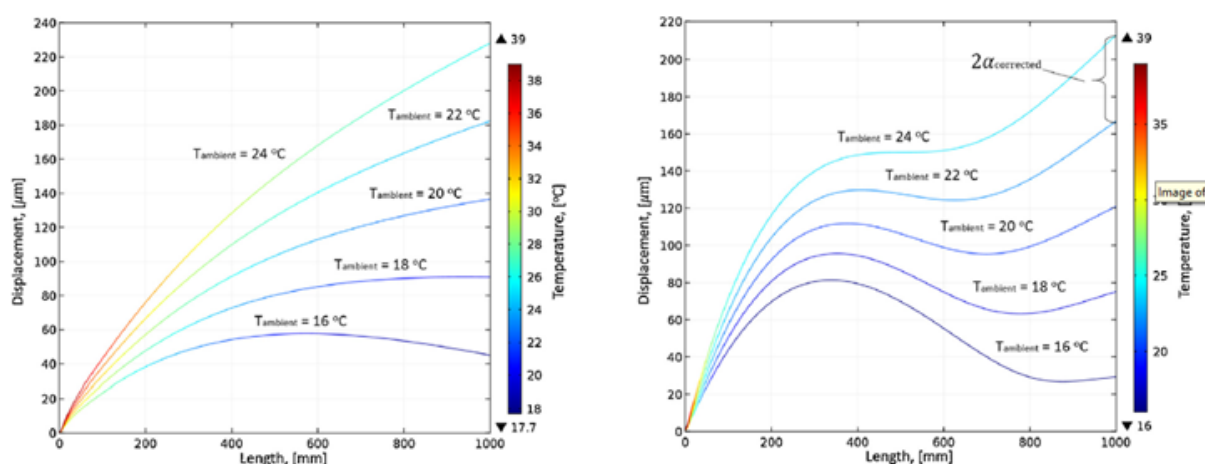
Tepelná vodivosť pásky z nehrdzavejúcej ocele je  $30 \text{ W} / (\text{mK})$ . Je to v porovnaní s hliníkovou extrúziou snímacieho zariadenia sedemkrát menšia hodnota. Teplo zo zdroja sa distribuuje na konci, kde vzniká. Teploty, ktoré sa približne rovnajú okolitým teplotám, sa ustália po dĺžke meracej stupnice 250 mm. [10]

Podľa týchto simulovaných teplotných gradientov sa modelujú nimi vyvolané termoelastické deformácie. Celkové posuny pozdĺž hliníkovej extrúzie a meracej mierky sú vynesené na obr. 4.7. [10]

Prezentované grafy ukazujú, že posuny pozdĺž analyzovaných častí snímača, spôsobené termoelastickou deformáciou, sú distribuované rôzne. Takéto rozdelenia však zachovávajú približne rovnaký profil, zatiaľ čo sa mení okolitá teplota, a líšia sa iba strmosti grafov. Táto variácia je konštantná a mohla by sa lineárne aproximovať použitím korigovaných



Obr. 4.6: Distribúcia teploty pozdĺž meracej stupnice pri rôznych rovnomerných teplotách okolia, zatiaľ čo jeden koniec snímacieho zariadenia je ovplyvňovaný externým zdrojom tepla [10]



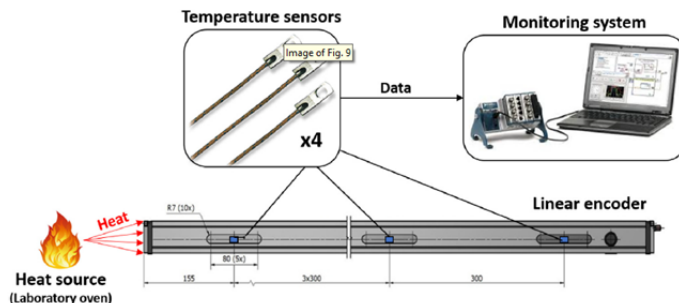
Obr. 4.7: Celkový posun pozdĺž hliníkovej extrúzie vľavo a meracej stupnice vpravo pri rôznych jednotných teplotách okolia, zatiaľ čo jeden koniec snímacieho zariadenia je ovplyvnený externým zdrojom tepla [10]

hodnôt súčiniteľa tepelnej rozťažnosti lineárneho ucha. Preto, ak teplo generované externým zdrojom tepla zostáva konštantné a mení sa iba okolitá teplota, mohli by sa raz určené posuny ľahko prepočítať v reálnom čase, ak je známa okolitá teplota. [10]

#### 4.2.3 Dynamické tepelné procesy v lineárnom enkodéri

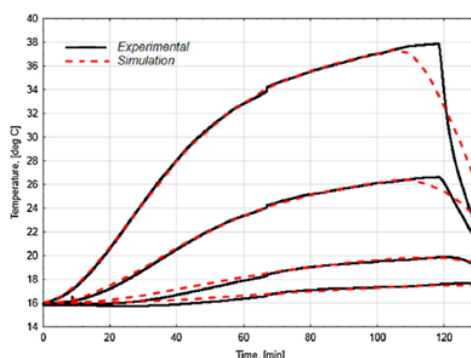
Experiment, ktorý slúžil na určenie dynamiky teplotných procesov prebiehajúcich v meracom systéme poskytol zaujímavé informácie. Získané údaje sú použité na korekciu vytvoreného počítačového modelu. Počas experimentu s pomocou laboratórnej pece, jeden

koniec lineárneho snímacieho zariadenia bol zahriaty a odchýlka teploty bola pozorovaná v reálnom čase v štyroch bodoch vzdialených od vyhrievaného konca o 150 mm, 450 mm, 750 mm a 1 000 . Experimentálna schéma je znázornená na obr. 4.8. [10]



Obr. 4.8: Schéma experimentu [10]

Počas experimentu bola teplota okolia  $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Bol zapnutý externý zdroj tepla a koniec snímača sa pomaly zahrieval asi 120 minút. Kúrenie sa potom vyplo a snímač sa nechal ochladiť na teplotu okolia. Pomocou takéhoto experimentu by sa mohla sledovať dynamika tepelných procesov, keď sa tok tepla šíri pozdĺž meracieho zariadenia. Monitoroval sa tiež proces ochladzovania a hodnotil sa vplyv hysterézie. Experimentálne a výpočtové údaje sú uvedené na obr. 4.9. [10]



Obr. 4.9: Údaje experimentu a počítačovej simulácie [10]

Získané výsledky ukazujú, že simulačný model vo vykurovacej sekcii, celkom presne odráža výsledky experimentu. Maximálna chyba je  $0,38\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Počas chladenia meracieho zariadenia je však možné pozorovať nezrovnalosti. Je to spojené s meniacimi sa podmienkami prostredia a koeficientmi dôležitými pre modelovanie. [10]

## 5 Návrh dilatačnej podložky

V poslednej kapitole tejto práce sa budeme zaoberať konštrukčným návrhom dilatačnej podložky pod lineárny snímač dĺžky, ktorá umožní voľnú dilatáciu a uľahčí tvorbu kompenzačných modelov termálnych chýb.

### 5.1 Montážne charakteristiky

#### 5.1.1 Lineárne snímacie zariadenia s malým prierezom

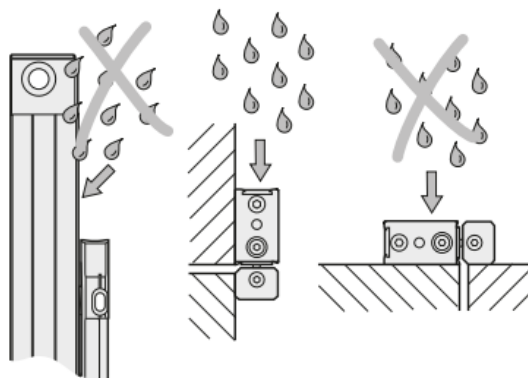
Štíhle lineárne snímacie zariadenia LC, LF a LS by sa mali montovať na obrábaný povrch po celej dĺžke - najmä pre vysoké dynamické požiadavky. Väčšie meracie dĺžky a vyššia kapacita zataženia vibráciami sa dajú dosiahnuť použitím montážneho nosníka alebo upínacích prvkov (iba pre LC 4x5). [3]

Tenké lineárne snímače sa vyznačujú rovnakými montážnymi rozmermi. To umožňuje napríklad výmenu inkrementálneho LS alebo LF za absolútny LC na konkrétnej konštrukcii stroja (upozorňujeme, že dĺžka merania LF je menšia o 20 mm ako u LC alebo LS). Okrem toho je možné použiť aj rovnaké upevňovacie nosníky bez ohľadu na verziu snímacieho zariadenia (LC, LF alebo LS). [3]

#### Tepelné charakteristiky

Kvôli tomu že sú lineárne snímacie jednotky pevne pripevnené pomocou dvoch skrutiek M8, prispôbujú sa do značnej miery montážnej ploche. Keď je snímač pripevnený k montážnemu nosníku, býva väčšinou pripevnený v jeho strede k montážnej ploche. Flexibilné upevňovacie prvky zaisťujú reprodukovateľné tepelné vlastnosti. [3]

LF 485 so svojim stupňovým nosičom z ocele má rovnaký koeficient tepelnej rozťažnosti ako montážna plocha zo šedej liatiny alebo ocele. [3]

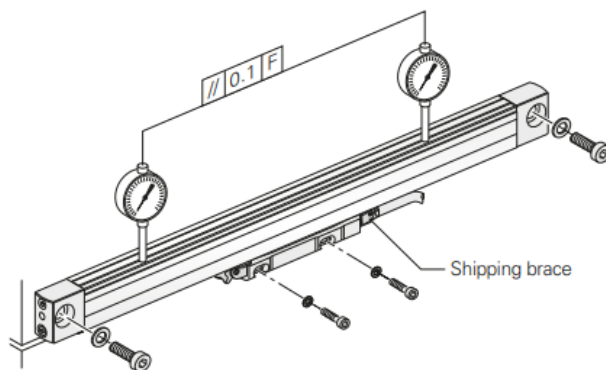


Obr. 5.1: Správnosť upnutia snímacieho zariadenia [3]

#### Montáž

Montáž obr. 5.2 zapuzdrených snímacích zariadení od spoločnosti HEIDENHAIN je prekvapivo jednoduchá: mierková jednotka je vyrovnaná iba na niekoľkých miestach pozdĺž

vodiacej dráhy stroja. Môžu sa na to použiť aj dorazové plochy alebo dorazové čapy. Prepravná výstuha už nastavuje správnu medzeru medzi mierkou a skenovacou jednotkou, ako aj bočnú toleranciu. Ak je z dôvodu nedostatku miesta potrebné pred namontovaním odstrániť prepravnú vzperu, potom sa pomocou montážneho meradla ľahko a presne nastaví medzera medzi stupnicou a skenovacou jednotkou. Musia sa tiež zachovať bočné tolerancie. Snímacie zariadenie sa musí upnúť tak, aby nedošlo k prieniku vody a iných látok do skenovacej jednotky obr. 5.1. [3]



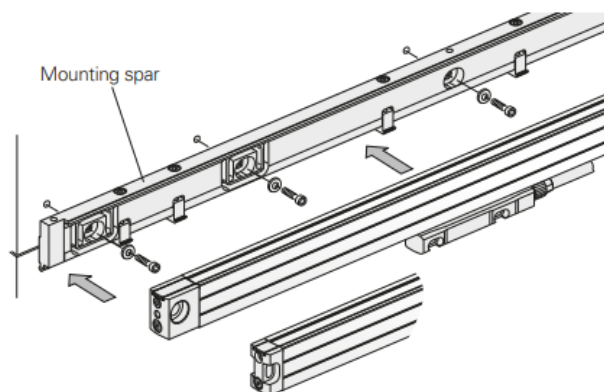
Obr. 5.2: Upnutie a geometrická tolerancia [3]

### Inštalácia s montážnou dilatačnou podložkou (nosníkom)

Upevnenie snímacieho zariadenia pomocou montážneho nosníka obr. 5.3 môže byť obzvlášť výhodné. Montážnu podložku je možné upevniť ako súčasť procesu montáže stroja. Enkodér sa potom počas konečnej montáže jednoducho upne. Ľahká výmena tiež uľahčuje údržbu. Spoločnosť HEIDENHAIN odporúča montáž s montážnou lištou (podložkou), ak sú meracie dĺžky väčšie ako 620 mm a vysoké dynamické požiadavky. Pri meraní dĺžok väčších ako 1240 mm je vždy potrebné použiť nosník. [3]

Pre montážny nosník MSL 41 sú komponenty potrebné na upnutie už vopred zostavené. Je určený pre lineárne snímače s normálnym alebo krátkym koncom blokov. Modely LC 4x5, LF 4x5 a LS 4x7 je možné namontovať z oboch strán, aby sa umožnil káblový výstup na oboch koncoch. MSL 41 montážny nosník je potrebné objednať zvlášť. [3]

Montážna pomôcka je upevnená na montážnu podložku a optimálne simuluje montážnu jednotku. [3]

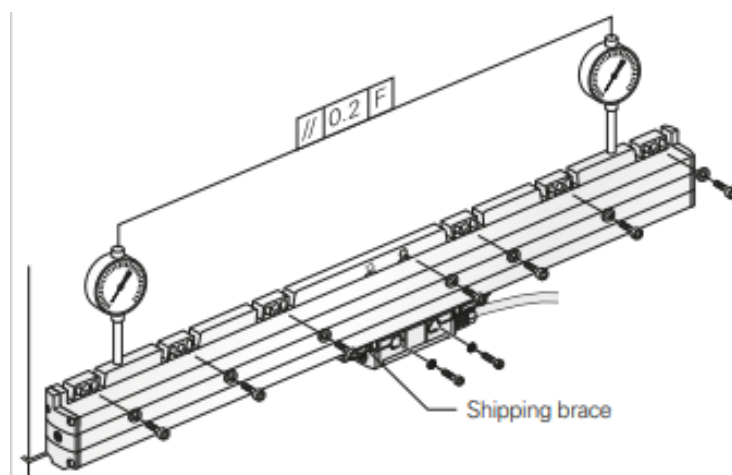


Obr. 5.3: Upevnenie snímacieho zariadenia pomocou montážneho nosníka [3]

### 5.1.2 Lineárne snímacie zariadenia s veľkým prierezom

LB, LC, LF a LS ,lineárne snímače plnej veľkosti, sú pripevnené v celej svojej dĺžke na obrábaný povrch. Kvôli tejto charakteristike majú vysoké vibračné hodnotenie. Šikmé usporiadanie tesniacich chlopní dovoľuje univerzálne upevnenie so zvislým alebo horizontálnym umiestnením, s vysokým stupeňom ochrany. [3]

LC 1x5 má optimalizovaný tesniaci systém s dvoma po sebe nasledujúcimi párami tesniacich pier. Pri čistení stlačeného vzduchu, ktorý sa zavádza do krytu, dva páry tesniacich pier chránia vnútrajšok proti okolitému vzduchu. Toto optimálne chráni vnútro snímacieho zariadenia pred kontamináciou. [3]



Obr. 5.4: Montáž snímača LC 200 [3]

#### Tepelné charakteristiky

Tepelné správanie LB, LC, LF a lineárneho snímača LS 100 s veľkým prierezom bola optimalizovaná. [3]

Na LF je ocelová stupnica cementovaná a ocelový nosič je pripevnený priamo k prvku stroja. [3]

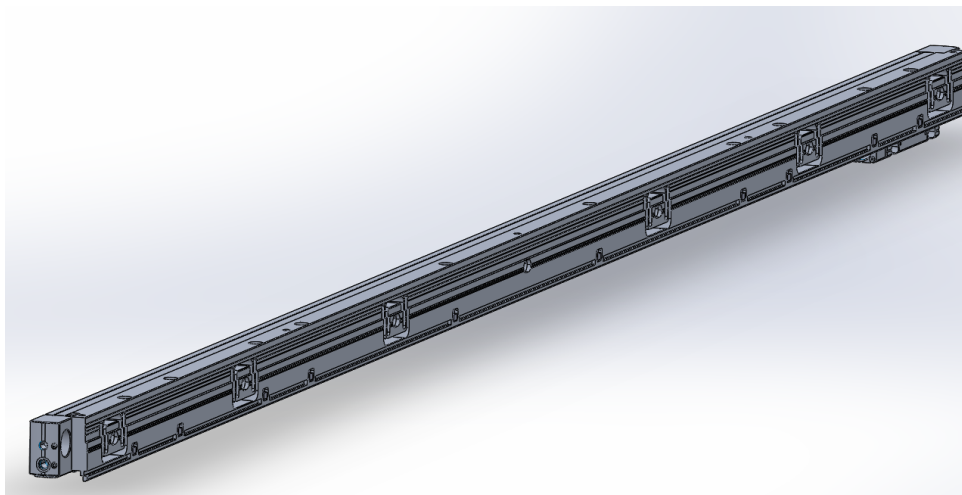
Pre viacdielne LC 200 obr. 5.4 a LB platí, že ocelová stupnica sa upne priamo na prvok stroja. Týmto spôsobom snímacie zariadenie podlieha rovnakým teplotným podmienkam a zmene dĺžky ako dosadacia plocha. [3]

LC a LS sú pripevnené k povrchu v ich strede. Flexibilné upevňovacie prvky umožňujú reprodukovateľnosť tepelného správania. [3]

## 5.2 Konštrukčné varianty dilatačnej podložky

### 5.2.1 Konštrukčný variant č.1

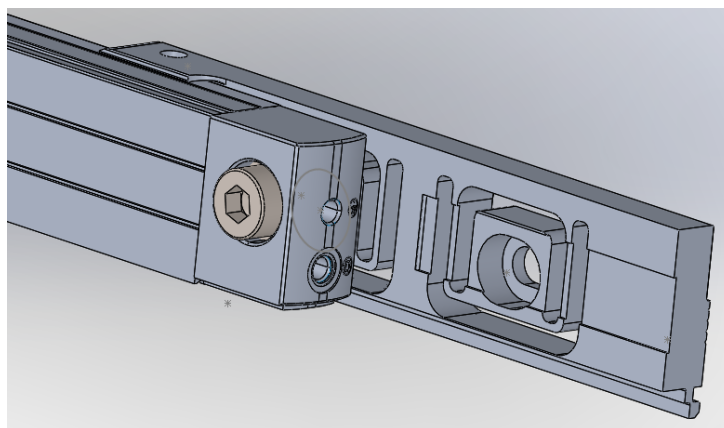
Konštrukčný variant č.1 (obr. 5.5) sa vyznačuje tým, že sa upína ako celok. Samotná montáž dilatačnej podložky prebieha tak, že podložka sa priskrutkuje na plochu obrábacieho stroja pomocou skrutiek M5, až po samotnej montáži podložky sa upína lineárny enkodér.



Obr. 5.5: Konštrukčný variant č. 1 na enkodér LF485

### 5.2.2 Konštrukčný variant č.2

Konštrukčný variant č. 2 (obr. 5.6) sa vyznačuje tým, že sa upína na konce lineárneho enkodéra vo dvojiciach. Montáž by mala prebiehať tak, že ako prvý krok by sa mali upnúť konce lineárneho enkodéra na dilatačnú podložku. Tento spoj môže byť realizovaný pomocou inzerťov alebo skrutkovým spojom. V našom prípade sme zvolili kombináciu jedného inzerťu (konštrukcia rovnaká ako vo variante č. 1) a skrutky M8x20 (obr. 5.6) (skrutka s vnútorným šesťhranom). Následným krokom by malo byť upnutie enkodéra s dilatačnou podložkou na plochu stroja.

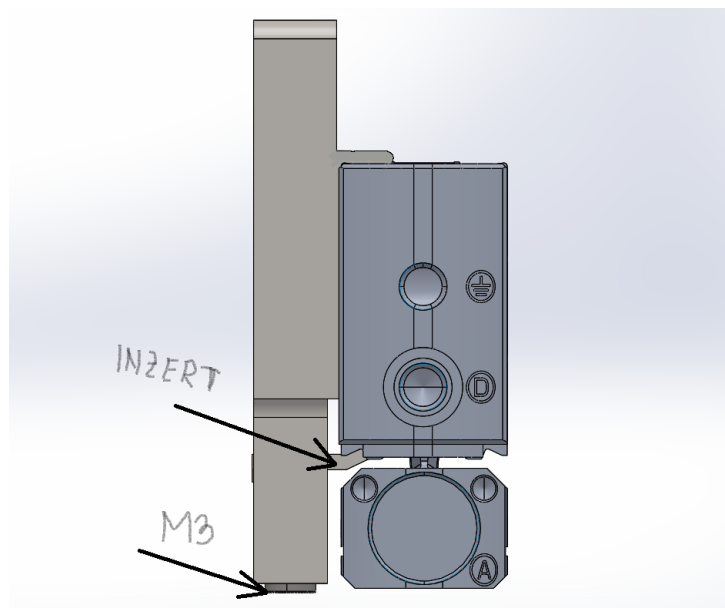


Obr. 5.6: Konštrukčný variant č. 2 na enkodér LF485

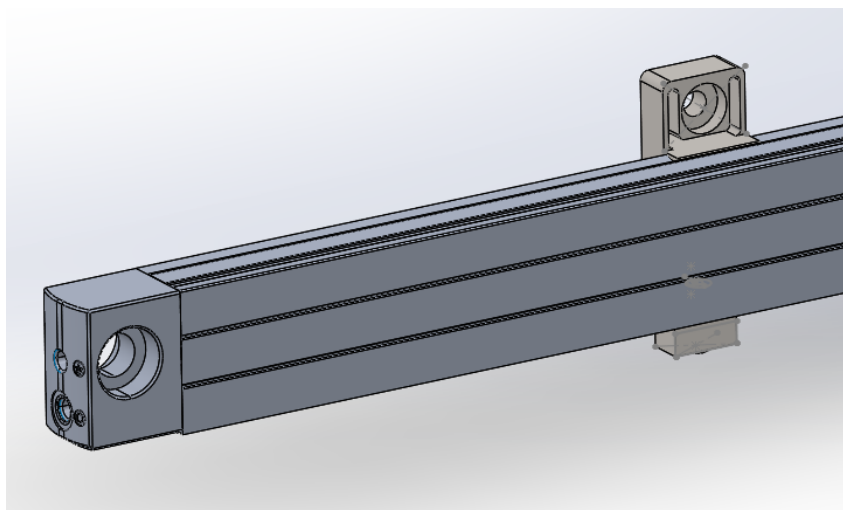
### 5.2.3 Konštrukčný variant č.3

Konštrukčný variant č. 3 je navrhnutý v zmysle svorky, ktorá je uchytená na enkodér podobne ako variant č.1. Rozdiel je ten, že variant č. 3 sa neupína ako celok ale ako samostatné časti. Každá časť má vlastnú dieru pre skrutku M5 obr. 5.8 pre upnutie na plochu stroja a dieru M3 obr. 5.7 na spodnej strane pre pritiahnutie inzerťu.





Obr. 5.7: Konštrukčný variant č. 3: skrutka M3 pre utiahnutie inzertu.



Obr. 5.8: Konštrukčný variant č. 3: skrutka M5 pre uchytenie na plochu stroja

### 5.3 Hodnotenie

Hodnotenie daných variant sa bude sústreďovať hlavne na cenu, technologická náročnosť obrábania, univerzálnosť, rýchlosť montáže a použitie v praktickom živote.

Materiál variantu č. 1 je EN-AW 2007, z ktorého vlastností vyniká veľmi dobrá obrobitelnosť. Cena polotvaru EN-AW 2007 sa pohybuje okolo 290 Kč, za plochú tyč o rozmere 40x15x1350mm. Technologická náročnosť obrábania je relatívne veľká, ale jeho montáž zvyšuje kapacitu pohlcovania vibrácií. Univerzálnosť modelu je na vysokej úrovni. Tento model môže byť upnutý na LF 485, LC 400, LS 400. Montáž nie je časovo náročná a nevyžaduje žiadne špeciálne nástroje.

Materiál variantu č. 2 je EN-AW 2007 je rovnaký ako u prvej varianty. Cena polotvaru za 2 kusy sa pohybuje okolo 100 Kč. Technologická náročnosť obrábania je menšia ako u

variantu č. 1. Univerzálnost na menšej úrovni a pevnostné charakteristiky spojenia nie sú úplne definované.

Materiál variantu č. 3 je konštrukčná oceľ. Cena polotovaru sa pohybuje okolo 80-100 Kč za sadu 6ks. Technologická náročnosť menšia ako u variantu č.1. Variant č.3 nieje je úplne detailne domyslený, je otázne či by sa dal daný návrh uskutočniť v realite.

Celkové hodnotenie variantov najdem v tab. 5.1

Tabuľka 5.1: Celkové hodnotenie variantov

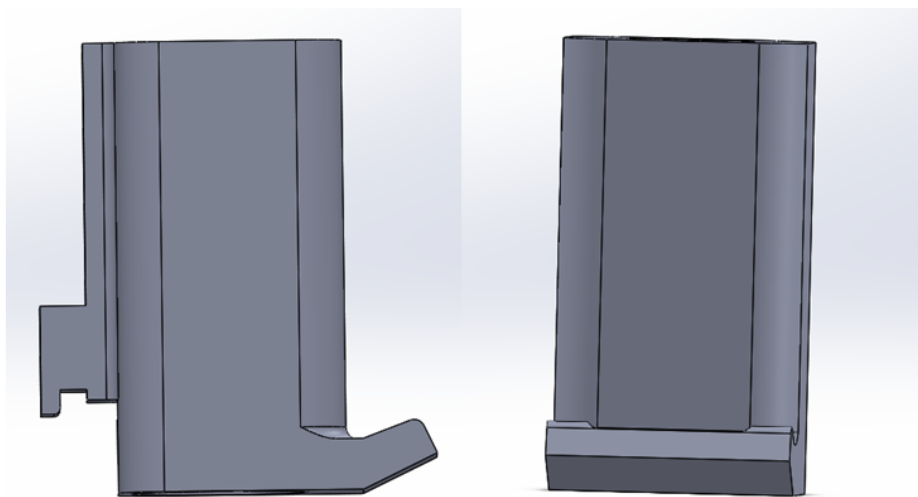
| Požiadavky         | Váha | V1         | V2         | V3         |
|--------------------|------|------------|------------|------------|
| Cena polotovaru    | 20   | 1          | 2          | 3          |
| Nročnosť obrábania | 15   | 1          | 3          | 2          |
| Použitie v praxi   | 13   | 3          | 2          | 1          |
| Univerzálnost      | 10   | 3          | 2          | 1          |
| Lahkosť montáže    | 8    | 3          | 2          | 1          |
| <b>Súčet bodov</b> |      | <b>128</b> | <b>116</b> | <b>121</b> |

## 5.4 Detailné spracovanie najlepšej varianty

Najvhodnejšou variantov sa podľa vyhodnotenia stal variant č.1. Tento variant disponuje univerzálnostou, využitím v praktickom živote a ľahkou montážou na úkor vyššej ceny.

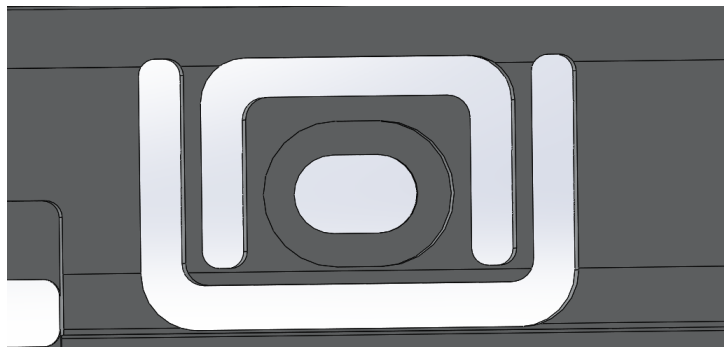
### 5.4.1 Charakteristika

Spoj medzi dilatačnou podložkou a lineárnym enkodérom je navrhnutý tak, že medzi danými prvkami sa nachádza 10 inzertov (MSL 41 má iba 8) (obr. 5.9). Inzert sa nachádza na spodnej časti podložky a upína sa po montáži podložky na plochu obrábacieho stroja a bude dodávaný v spojení s podložkou. Dilatačná podložka a inzert sa spájajú pomocou skrutky M4 s vnútorným šesťhranom s valcovou hlavou obr. 5.11.

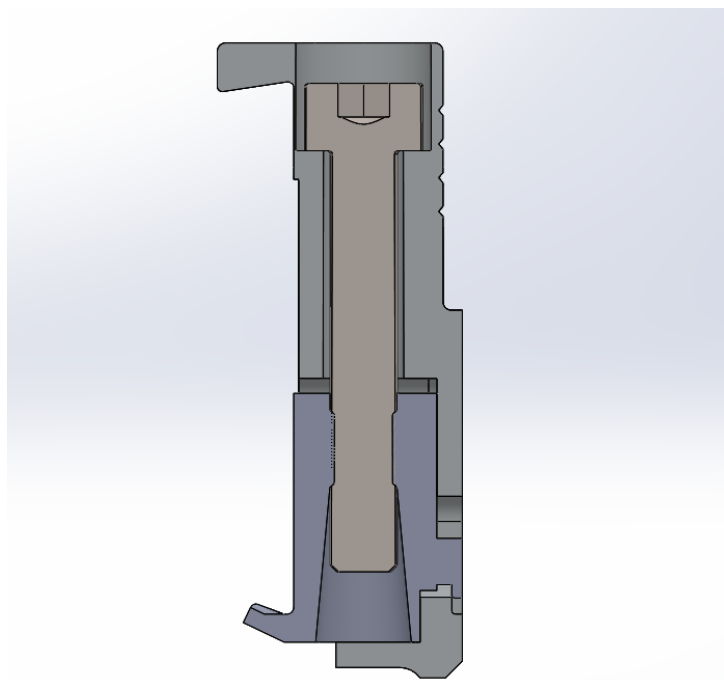


Obr. 5.9: Konštrukčný návrh inzertu

Dilatačné prvky (obr. 5.10) na podložke umožňujú dilatáciu v axiálnom zmysle a tým umožňujú flexibilné sťahovanie a rozťahovanie materiálu reprodukovateľným spôsobom. Princíp sťahovania sa a rozťahovania možno aproximovať mechanickou pružinou.



Obr. 5.10: Dilatačný prvok



Obr. 5.11: Spojenie inzertu a podložky

### 5.4.2 Voľba materiálu

Podľa predchádzajúcich citácií z vedeckého článku je zrejmé, že materiálové charakteristiky podložky by sa mali čo najviac priblížiť materiálovým charakteristikám samotného enkodéra. Dilatačná podložka je uchytená na enkodér po celej dĺžke svojej konštrukcie, tým pádom by sa výrazný rozdiel materiálových charakteristík podpísal na prenose tepla z obrábacieho stroja do podložky a následne na enkodér.

Po zvážení voľby materiálu, bola nakoniec použitá zliatina hliníka EN-AW 2007, ktorá má vlastnosti zobrazené v tabuľke 5.2.

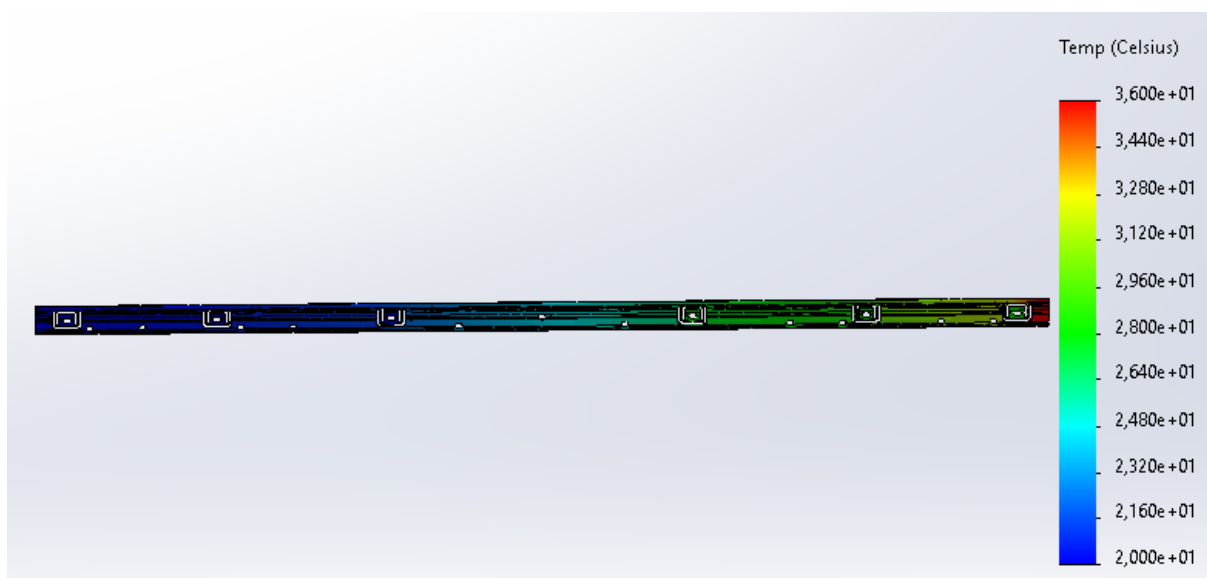
Duraly (tab. 5.2) sa vyznačujú veľmi vysokou pevnosťou a tvrdosťou, sú veľmi dobre obrábatelné - vŕtanie, frézovanie a sústruženie.

Tabulka 5.2: Vlastnosti Materiálu

| Vlastnosti                     | Hodnota         | Jednotky     |
|--------------------------------|-----------------|--------------|
| Modul pružnosti                | 70000           | $N/mm^2$     |
| Poissonov pomer                | 0,3897          | bez jednotky |
| Modul pružnosti v šmyku        | 27000           | $N/mm^2$     |
| Pevnosť v ťahu                 | 370             | $N/mm^2$     |
| Pevnosť v tlaku                |                 | $N/mm^2$     |
| Hustota                        | 2700            | $Kg/m^3$     |
| Medz klzu                      | 250             | $N/mm^2$     |
| Súčiniteľ tepelnej rozťažnosti | $2,4 * 10^{-5}$ | $/K$         |
| Súčiniteľ tepelnej vodivosti   | 204             | $W/(m * k)$  |

### 5.4.3 Termálna úloha

Pri návrhu dilatačnej podložky sme simulovali teplotné polia v programe SolidWorks. Pri simulácií termálnej skúšky sme predpokladali, že podložka bude vystavená nerovnomernému teplotnému zaťaženiu z jednej strany pri teplote 36 °C. Rozloženie teplotného poľa je zobrazené na obr. 5.12.

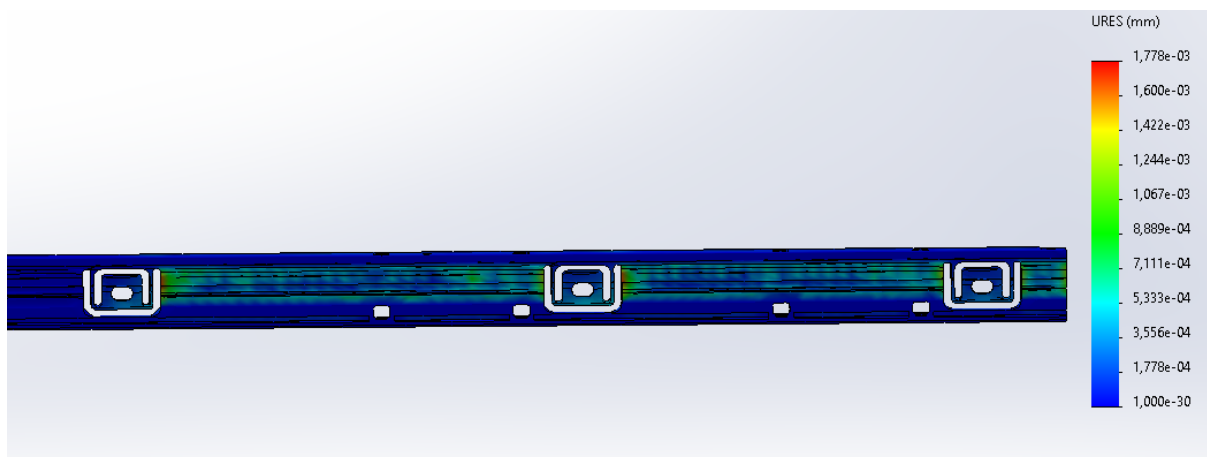


Obr. 5.12: Rozloženie teplotného poľa podložky pri tepelnom zaťažení na jednej strane

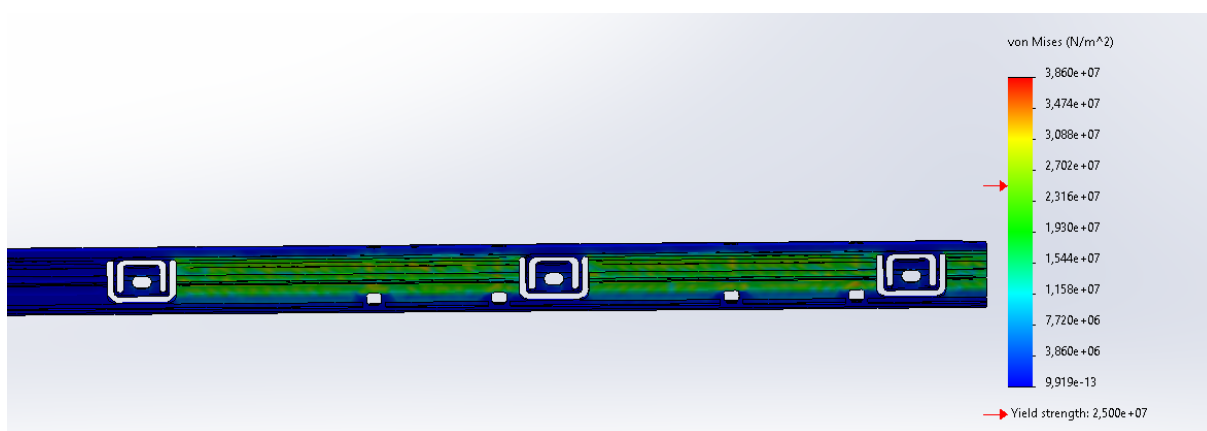
### 5.4.4 Statická úloha

Simulácia bola sústredená na deformáciu a napätie podložky. Počiatočné podmienky boli podobné ako v prvej simulácii, až na rozdiel v tom, že teraz bol zahrnutý aj prestup tepla a spoj medzi kontaktnou plochou podložky a plochou stroja na zhruba polovici plochy ich kontaktu. Na obr. 5.14 vidíme napätie a na obr. 5.13 teplotnú deformáciu podložky, ktorá je z materiálu EN-AW 2007.

Výsledky nám ukazujú že najväčšia teplotná deformácia obr. 5.13 je na koncoch dilatačných prvkov, a diera pre skrutku sa skoro vôbec nedilatuje. To nám zobrazuje jav pri ktorom sa teplotná dilatácia zastaví a koncentruje pri dilatačnom prvku a nerozvíja sa ďalej tak rapídne.

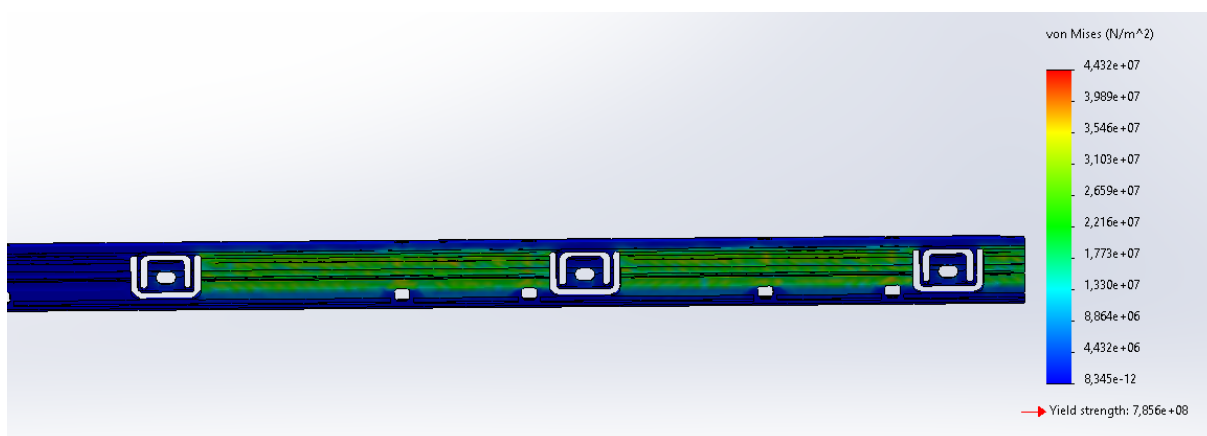


Obr. 5.13: Deformácia v dilatačnej podložke z duralu



Obr. 5.14: Napätie v dilatačnej podložke z duralu

Posledná časť simulácie zobrazuje porovnanie napätia v podložke z dvoch materiálov. Z analýzy vyplýva, že hliník obr. 5.14 je dobrý vodič a lepšie znáša tepelný stres ako ocel obr. 5.15.



Obr. 5.15: Napätie v dilatačnej podložke z ocele 18NiCr5-4

## Záver

Bakalárska práca sa zaoberala problematikou lineárnych snímačov dĺžky, ich rešeršnému spracovaniu, analýze teplotného modelu, návrhu a hodnoteniu konštrukčných variant a výkresovému spracovaniu najlepšej varianty. Rešeršné spracovanie bolo vytvárané za pomoci literatúry, a to hlavne z kníh, vedeckých článkov a príspevkov v katalógoch. Popis tepelného správania bol inšpirovaný vedeckým článkom, kde bola do detailov rozobraná analýza a simulácie tepelného správania lineárneho snímača dĺžky. Varianty návrhu dilatačnej podložky boli miestami inšpirované prototypom dilatačného nosníka od firmy HEIDENHEIN. Niektoré prvky na podložkách boli prebrané z iných zariadení resp. mechanizmov.

Spracovanie tejto práce sa vo veľkej miere opieralo o teoretické poznatky, ako princíp funkcie a konštrukcia používaných variant. V práci je detailne rozobraná podstata fungovania senzora a jeho častí, fyzikálne princípy snímania polohy, priame, nepriame, inkrementálne a absolútne snímanie polohy. Ďalej sa práca sústreďovala na konštrukciu a špecifikáciu zapuzdrených snímačov polohy. Teoretické poznatky sú zhrnuté do 3 kapitol a vysvetľujú všetko čo mala táto časť obsahovať. Nasledujúca časť sa zaoberala tepelnou analýzou ktorá so sebou priniesla zaujímavé výsledky. Táto kapitola v úvode naznačuje akou filozofiou eliminácie tepelných chýb sa moderná doba udáva. Za zmienku určite stoja kompenzačné modely, ktorým predchádza veľmi náročný matematický proces. Poznatky z vedeckého článku o teplotnej analýze hovoria o korigovaní koeficientov rozťažnosti hliníkového obalu a meracej stupnice lineárneho enkodéra. Z výsledkov vyplýva, že koeficient tepelnej rozťažnosti ocelevej mierky sa drasticky zmenil a dokonale sa prispôbil hliníkovému obalu. Ďalší simulačný model hovorí o termálnom zatažení z jednej strany. Z danej simulácie vidíme že deformácia hliníkového obalu je rovnomernejšia ako deformácia ocelevej stupnice. Tento jav môže byť vysvetlený rôznym koeficientom tepelnej vodivosti, ktorý má hliník 7-krát väčší. Pri dynamickej simulácii môžeme pozorovať že simulačný model skoro úplne presne odráža výsledky experimentu.

Návrh dilatačnej podložky sa skladal s 3 konceptuálnych návrhov. Prvý konceptuálny návrh bol zameraný na celistvosť a je pripojený na enkodér po celej jeho dĺžke. Toto riešenie so sebou prináša univerzálnosť montáže na LF 485, LC 400, LS 400. Návrh prebehá podobný dizajn ako montážny nosník od HEIDENHEIN, s rozdielmi v dĺžke rozmerov, konštrukčných prvkov a použitých skrutiek. Spoj je vyriešený pomocou inzertu a pritiahnutý pomocou skrutky s vnútorným šesťhranom. Zvolený materiál je zliatina hliníka nazývaná tiež dural. Dural bol zvolený kvôli vysokej obrobiteľnosti, dobrým pevnostným charakteristikám a výbornej tepelnej vodivosti. Nevýhodou materiálu je slabá odolnosť voči korózií a zlá zvariteľnosť. Variant č.2 a variant č.3 sú navrhnuté tak, aby sa neupínali po celej dĺžke enkodéra, ale iba v určitých segmentoch. Variant č. 2 je spojený pomocou skrutky M8. Jedná sa o originálne riešenie, ktoré zatiaľ nikde nebolo použité. Pre použitie je odporúčaný variant č. 1, z dôvodu toho, že dosiahol najväčší počet bodov, tj. 128 v našom hodnotení.

Prínosom práce je vysvetlenie a utvrdenie poznatkov o lineárnych snímačoch dĺžky. Vďaka vedeckým poznatkom v práci je možné pochopenie dilatačného problému rýchlejšie a ľahšie. Navrhnuté konceptuálne riešenia môžu byť vhodným podkladom pre budúci návrh podobných resp. vylepšených súčastí.

Hlavným odporúčaním pre prax je uvedomenie si dilatačného javu, ktorý nastane v momente, keď sa ocelová mierka pripojí na hliníkový obal. Tento jav je veľmi zaujímavý a

konštruktéri lineárnych enkodérov by s tým mali počítať. Pri návrhu dilatačnej podložky treba klásť dôraz na cenu, technologickú náročnosť výroby, ľahkosť montáže, použitie v praxi, kompaktnosť a univerzálnosť.

# Literatúra

- [1] NOVÁK, Martin. *Technická měření*. 1. Praha: ČVUT, 2018. ISBN 978-80-01-06388-0.
- [2] MAREK, Jiří. *Konstrukce cnc obráběcích strojů iii: Jiří Marek a kol.* 3. Praha: MM publishing, 2014. ISBN 978-80-260-6780-1.
- [3] *Linear Encoders for Numerically Controlled Machine Tools* [online]. 06/2019, , 48 [cit. 2021-5-13]. 571470-2C. Dostupné z: [heidenhain.cz/fileadmin/pdb/media/img/571470-2C\\_Linear\\_Encoders\\_For\\_Numerically\\_Controlled\\_Machine\\_Tools.pdf](http://heidenhain.cz/fileadmin/pdb/media/img/571470-2C_Linear_Encoders_For_Numerically_Controlled_Machine_Tools.pdf)
- [4] ÁBRAHÁM, Gabriel. *HALLOVE SNÍMAČE PRE AUTOMOBILY*. Bratislava, 10.júna 2010n. l., 71 s. Diplomová práca. Slovenská technická univerzita. Vedoucí práce Doc. Ing. Ján Vlnka, PhD.
- [5] *Snímače polohy* [online]. Hradec Králové: SPŠ,SOŠ a SOU Hradec Králové, 2016 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/7317902-Snimace-polohy-snimace-polohy-odporove-snimace-polohy-spojite.html>
- [6] Zapuzdrené lineárne snímače. [Https://www.heidenhain.sk](https://www.heidenhain.sk) [online]. Trenčín: Kopretina TN, 2019 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: [https://www.heidenhain.sk/sk\\_SK/produkty/meranie-dlzok/zapuzdrene-linearne-snimace/](https://www.heidenhain.sk/sk_SK/produkty/meranie-dlzok/zapuzdrene-linearne-snimace/)
- [7] Otvorené lineárne snímače. [Https://www.heidenhain.sk](https://www.heidenhain.sk) [online]. Trenčín: Kopretina TN, 2019 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: [https://www.heidenhain.sk/sk\\_SK/produkty/meranie-dlzok/otvorene-linearne-snimace/](https://www.heidenhain.sk/sk_SK/produkty/meranie-dlzok/otvorene-linearne-snimace/)
- [8] Magnetické snímače polohy. [Https://www.mmspektrum.com/](https://www.mmspektrum.com/) [online]. Přípotoční 1519/10a, 101 00 Praha 10: MM publishing, s. r. o, 2004, 01. 09. 2004 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/magneticke-snimace-polohy>
- [9] Posuvové zariadenia CNC strojov. [Https://cloud6n.edupage.org](https://cloud6n.edupage.org) [online]. Neznáme: Neznáme, 2012 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: [https://cloud6n.edupage.org/cloud/Posuvove\\_zariadenia\\_CNC\\_strojov.pdf?z%3AGLq0c7NSfJT7vri9M3EWYQB3fXDB26Yq0SjTK56r3P2lQh-tYr%2FF9b49dqCQo%2FWS0](https://cloud6n.edupage.org/cloud/Posuvove_zariadenia_CNC_strojov.pdf?z%3AGLq0c7NSfJT7vri9M3EWYQB3fXDB26Yq0SjTK56r3P2lQh-tYr%2FF9b49dqCQo%2FWS0)
- [10] GURAUSKIS, Donatas, Arturas KILIKEVIČIUS, Sergejus BORODINAS a Albinas KASPARAITIS. Analysis of geometric and thermal errors of linear encoder for real-time compensation. *Sensors and Actuators A: Physical* [online]. Vilnius: Elsevier B.V., 2019, **20**(296), 9 [cit. 2021-5-13]. ISSN 0924-4247. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924424718322386>
- [11] LC 200 series: Absolute linear encoders with full-size scale housing. [Https://www.heidenhain.com/](https://www.heidenhain.com/) [online]. Hannover: DR. JOHANNES HEIDENHAIN, 2019 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.heidenhain.com/products/linear-encoders/sealed/lc-200>



- [12] LC 400 series: Absolute linear encoders with slimline scale housing. *Https://www.heidenhain.com* [online]. Hannover: DR. JOHANNES HEIDENHAIN, 2019 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.heidenhain.com/products/linear-encoders/sealed/lc-400>
- [13] LF 485 series: Incremental linear encoder with slimline scale housing. *Https://www.heidenhain.com* [online]. Hannover: DR. JOHANNES HEIDENHAIN, 2019 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.heidenhain.com/products/linear-encoders/sealed/lf-485>
- [14] General Catalog. *Https://www.heidenhain.com* [online]. Hannover: DR. JOHANNES HEIDENHAIN, 2020 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: [https://www.heidenhain.com/fileadmin/pdf/en/01\\_Products/Prospekte/PR\\_General\\_Catalog\\_ID350457\\_en.pdf](https://www.heidenhain.com/fileadmin/pdf/en/01_Products/Prospekte/PR_General_Catalog_ID350457_en.pdf)

## Zoznam skratiek a značiek

|            |                        |
|------------|------------------------|
| atd        | A tak ďalej            |
| C          | Kapacita kondenzátora  |
| č          | Číslo                  |
| $\epsilon$ | Epsilon                |
| kg         | Kilogram               |
| N          | Newton - jednotka sily |
| m          | Meter                  |
| mm         | Milimeter              |
| $\mu$      | Mikro                  |
| obr        | Obrázok                |
| R          | Odpor                  |
| resp       | Respektíve, alebo      |
| tab        | Tabuľka                |
| tj         | To jest                |
| tzv        | Takzvané               |

# Zoznam príloh

1. vykres-dilatacnej-podlozky.pdf