



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**  
**ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

# **NÁVRH JEDNOÚČELOVÉHO STROJE PRO MĚŘENÍ PRŮHYBU**

DESIGN OF SPECIAL PURPOSE TOOL FOR SAG MEASUREMENT

**DIPLOMOVÁ práce**  
MASTER'S thesis

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**BC. JIŘÍ MEJZLÍK**

**VEDOUcí PRÁCE**  
SUPERVISOR

**ING. PAVEL HOUŠKA, PH.D.**

BRNO 2015



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automatizace a informatiky  
Akademický rok: 2014/2015

## **Zadání diplomové práce**

student(ka): Bc. Jiří Mejzlík  
který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**  
obor: **Aplikovaná informatika a řízení (3902T001)**

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

### **Návrh jednoúčelového stroje pro měření průhybu**

v anglickém jazyce:

### **Design of special purpose tool for sag measurement**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá návrhem jednoúčelového stroje pro měření průhybu tyčových polotovarů ve velkosériové výrobě. Pro návrh stroje je nutné řešit problematiku vyhodnocování průhybu, výběr měřících prvků, způsob manipulace a upínání polotovarů.

Cíle diplomové práce:

1. Seznamte se s problematikou řízení jednoúčelových strojů.
2. Řešte problematiku vyhodnocování průhybu tyčových polotovarů a proveďte volbu vhodných měřících prvků.
3. Řešte problematiku manipulace a upínání tyčových polotovarů, zohledněte požadovaný takt stroje a vybrané měřící prvky.
4. Navrhněte elektrickou část jednoúčelového stroje.
5. Navrhněte řídicí systém jednoúčelového stroje.

Seznam odborné literatury:

- [1] SHELL, Richard L a Ernest L HALL. Handbook of industrial automation. New York: M. Dekker, c2000, xii, 900 p. ISBN 0-8247-0373-1.
- [2] BLACK, Rex a Ernest L HALL. Managing the testing process: practical tools and techniques for managing hardware and software testing. 2nd ed. New York: Wiley, c2002, xxvii, 500 p. ISBN 04-712-2398-0.
- [3] HAYES, By Linda G. a Ernest L HALL. The automated testing handbook: practical tools and techniques for managing hardware and software testing. 2nd ed. Richardson, TX: Software Testing Institute, 2004, xxvii, 500 p. ISBN 09-707-4650-4.
- [4] Fraden, J.: Handbook of Modern Sensors, 2004, Springer-Verlag, ISBN 0-378-00750-4.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Houška, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 25.11.2014

L.S.

---

Ing. Jan Roupec, Ph.D.  
Ředitel ústavu

---

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

## **Abstrakt**

Cílem práce je navrhnout jednoúčelový stroj určený k měření průhybu. V textu jsou popsána tři možná řešení navrhovaného stroje, u každého z nich je vypočten výrobní takt stroje a stanoveny přibližné cenové náklady. Výsledné řešení je vybráno s ohledem na kompromis mezi oběma těmito klíčovými ukazateli.

Další část textu se zabývá výběrem vhodných pohonů manipulátoru a ostatních komponent celého elektrického zařízení. Následně je navrženo možné řešení automatizovaného řízení stroje včetně elektrického zapojení.

## **Abstract**

The aim of the thesis is to design a special purpose tool for sag measurement. Three possible solutions are proposed, for each the production cycle time is calculated and its approximate costs are estimated. The best solution in terms of a trade-off between both key quantities is suggested.

Next part of the work deals with the selection of suitable drives for the manipulator as well as of the other components for the whole electrical device. Finally, a possible automated control of the complete machinery, including the electrical wiring diagram, is presented.

## **Klíčová slova**

Manipulátor, řízení, programovatelný automat, HMI, frekvenční měnič, lineární motor, Profinet, distribuovaná jednotka, odměřovací systém, bezkontaktní odměřování polohy.

## **Keywords**

Manipulator, control, programmable logic controller, HMI, frequency convertor, linear motor, Profinet, distributed unit, measuring system, contactless position measurement.



## Prohlášení o originalitě

Prohlašuji, že předkládaná diplomová práce je mojí původní autorskou prací, kterou jsem vypracoval pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím uvedené literatury.

V Brně 23.5.2015

Bc. Jiří Mejzlík

## Bibliografická citace

MEJZLÍK, J. *Návrh jednoúčelového stroje pro měření průhybu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015, 65 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Houška, Ph.D.





## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Pavlu Houškovi, Ph.D. za cenné rady, podněty a odborné vedení.



**Obsah:**

<b>Zadání diplomové práce.....</b>	<b>3</b>
<b>Abstrakt.....</b>	<b>5</b>
<b>Prohlášení o originalitě.....</b>	<b>7</b>
<b>Poděkování.....</b>	<b>9</b>
<b>1 Úvod.....</b>	<b>13</b>
<b>2 Pracoviště měření házení.....</b>	<b>15</b>
2.1 Házení – geometrická tolerance.....	15
2.2 Stávající pracoviště ručního měření házení.....	16
2.3 Požadavky na navrhované zařízení.....	18
2.4 Náhradní metoda kontroly tyčových polotovarů – měření průhybu.....	18
<b>3 Návrh koncepce stroje.....</b>	<b>21</b>
3.1 Varianta 1 - jednoosý manipulátor.....	22
3.2 Varianta 2 – tříosý manipulátor.....	24
3.3 Varianta 3 – otočný stůl.....	26
<b>4 Výběr použitých prvků.....</b>	<b>29</b>
4.1 Motory pohánějící osy manipulátoru.....	29
4.1.1 Požadavky na pohony navrhovaného zařízení.....	33
4.2 Odměrování polohy os manipulátoru.....	39
4.3 Snímání polohy průřezu tyčového polotovaru.....	43
4.3.1 Kritéria pro výběr snímače.....	45
4.3.2 Snímače vhodné pro měření průhybu.....	46
4.3.3 Výběr snímače pro měření průhybu.....	51
<b>5 Řízení jednoúčelového stroje.....</b>	<b>53</b>
5.1 Řídicí systém.....	53
5.1.1 Simotion.....	53
5.1.2 Sinamics S120.....	54
5.1.3 Decentrální periferie Simatic ET200.....	55
5.1.4 Interface moduly lineárních pohonů.....	56
5.1.5 Zobrazovací jednotka HMI.....	56
5.1.6 Sběrníková topologie navrhovaného zařízení.....	57
<b>6 Elektrické zapojení jednoúčelového stroje.....</b>	<b>59</b>
<b>7 Závěr.....</b>	<b>63</b>
<b>8 Seznam použité literatury.....</b>	<b>65</b>



# 1 ÚVOD

Práce se zabývá návrhem jednoúčelového stroje určeného ke kontrole průhybu tyčových polotovarů. Zařízení je objednáno na zakázku firmou, jejíž majitel si nepřeje zveřejnit název a nesmí být uvedeno o jaké výrobky se jedná. Nazývám je tyčovými polotovary.

Úkolem navrhovaného zařízení je nahradit skupinu čtyř pracovišť, na kterých je kontrola a třídění tyčových polotovarů lidskou doménou. Zda-li je polotovar vyhovující nebo nevyhovující rozhoduje jeho obvodové házení. Kontrola tyčového polotovaru spočívá ve změření obvodového házení a následným porovnáním s přípustnými hodnotami vyhovujícího dílu.

Současné měření obvodového házení tyčových polotovarů probíhá manuálně ve vysokém pracovním tempu. Vzhledem k velkému objemu testovaných dílů dochází vlivem lidského faktoru k chybnému vyhodnocení kvality výrobků. Při měření házení je rotace tyčového polotovaru vyvozována monotonním pohybem ruky pracovníka. Z dlouhodobého hlediska zaměstnancům stávajícího pracoviště ručního měření hrozí možné zdravotní komplikace.

S plánovaným rozšiřováním výroby o nové typy výrobků souvisí požadavek navrhnout univerzální zařízení. Omezujícími parametry navrhovaného zařízení jsou maximální délka a průměr testovaného polotovaru.

Navrhované zařízení bude implementováno do výrobní linky. Svoji činností nesmí ovlivnit výrobní časy linky. Zásadním požadavkem na navrhované zařízení je minimalizovat čas testovacího cyklu stroje.

Vyhovující polotovary se po otestování budou zpracovávat navazující technologií, nevyhovující budou zachytávány a následně opravovány na rovnacím zařízení.

Navržený stroj bude pracovat v nepřetržitém provozu, kontrola a třídění tyčových polotovarů poběží zcela automaticky bez nutnosti trvalé přítomnosti obsluhy.

Výrobní program linky, jejíž součástí bude i navržený stroj, nezahrnuje veškerý sortiment výrobků. Část výroby, jedná se o tyčové polotovary krátkých délek, se vyrábí na jiných zařízeních. Na žádost objednatele bude možné navrhované zařízení provozovat i zcela autonomně bez výrobní linky.

Vzhledem k širokému spektru testovaných polotovarů, lišících se délkou, průměrem i tvarem profilu, není konstrukčně možné navrhnout univerzální stroj používající jednotné nastavení mechanických částí pokrývající kompletní sortiment výroby. Navrhované zařízení bude obsahovat výměnné nebo přestavitelné součásti přizpůsobené konkrétnímu typu tyčových polotovarů. Požadavkem na navrhované zařízení je minimalizovat čas potřebný k mechanické přestavbě stroje při změně testovaného artiklu.

Princip měření obvodového házení je založen na rotaci testovaného dílu. Otáčení testované součásti během měření je časově náročné. Komplikované je i mechanické řešení otočné upínací hlavy, která by měla splňovat podmínku univerzálnosti pro veškerý sortiment testovaných výrobků. Po důkladném seznámení se s funkcí tyčového polotovaru ve finálním výrobku byl z výše uvedených důvodů majiteli zadavatelské firmy předložen návrh náhradní testovací metody splňující účel původní kontroly.

Navržená metoda nahrazuje původní měření obvodového házení tyčových polotovarů měřením průhybu. Měření průhybu proběhne staticky a bezkontaktně. Odpadne problém s upínáním a rotací testovaného polotovaru při měření a tím se dosáhne kratšího času cyklu stroje. Jednodušší mechanická konstrukce přinese snížení ceny navrhovaného zařízení.

Z uvedených důvodů byla navržená změna v testování tyčových polotovarů majitelem firmy odsouhlasena. Nová metoda kontroly tyčových polotovarů si vyžádá přizpůsobení norem pro jednotlivé výrobky.



## 2 PRACOVNÍ MĚŘENÍ HÁZENÍ

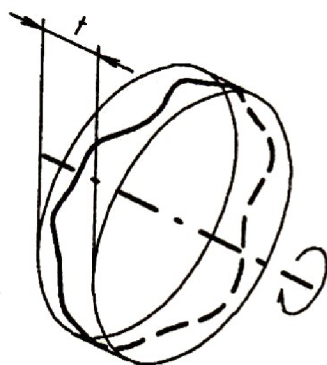
### 2.1 Házení – geometrická tolerance

Ve strojírenské výrobě není možné vyrábět součásti s absolutní přesností. Nepřesnosti vznikají vlivem použité technologie a procesu výroby i vlivem lidského faktoru. Na strojních výkresech se předepisují rozměry a tvary součástí s tolerancí odpovídající povolené odchylce vyráběného kusu od ideálního tělesa. Technický výkres určuje mezní rozměry výrobku. [1]

Pro správnou funkci strojních součástí je nezbytné vedle přesnosti rozměrů a struktury povrchu dodržet i přesný geometrický tvar funkčních ploch. Tolerance se rozlišují na rozměrové a geometrické. Rozměrové tolerance předepisují vyhovující rozměry součástí, nezabývají se dodržetím tvaru. Geometrické tolerance nejsou vztaženy k rozměrům výrobku, uplatňují se nezávisle na skutečných rozměrech. Mezi geometrické tolerance patří i házení. Nevyhovující geometrické tolerance nepříznivě ovlivňují funkci jednotlivých součástí nebo celých strojních zařízení. [1]

Rotační součásti s válcovými plochami často vykonávají otáčivý pohyb kolem osy rotace. Vlivem nedodržení předepsaných tolerancí házení se komplikuje montáž součástí, za provozu dochází k nadměrnému namáhání ložisek, vznikají rázy, vibrace, hluk. Vlivem zvýšeného opotřebování se celkově zkracuje životnost stroje. [1]

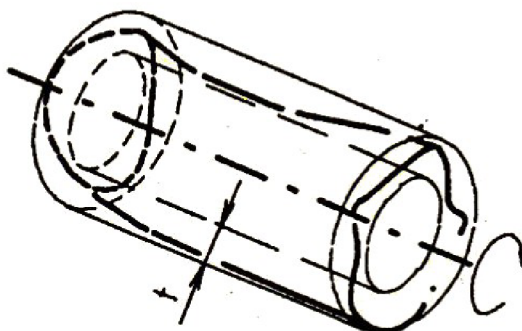
Házení se rozlišuje na axiální (čelní) nebo radiální (obvodové). U strojních součástí s požadavkem na přesnost pohybu rovinného čela ležícího v rovině kolmé k ose rotace se předepisuje tolerance axiálního házení. Axiální neboli čelní házení je určeno největším rozdílem vzdáleností bodů čela rotující součásti. Obr. 1 znázorňuje toleranční prostor čelního házení vytvořený mezi dvěma rovnoběžnými rovinami vzdálenými od sebe o hodnotu tolerance celkového čelního házení  $t$ . [1]



Obr. 1 Toleranční prostor čelního házení [1]

Dochází-li během rotace ke změnám vzdálenosti libovolného bodu ležícího na obvodu součásti od osy otáčení, hovoří se o obvodovém neboli radiálním házení. Velikost obvodového házení rotační plochy odpovídá rozdílu vzdálenosti nejbližšího a nejvzdálenějšího bodu kružnice na válcové ploše vzhledem k ose rotace. U ideálního rotačního tělesa s nulovým házením se během rotačního pohybu kolem osy otáčení všechny body na povrchu válcové plochy pohybují po společné kružnici, žádný bod válcové plochy při točivém pohybu nemění svou vzdálenost od osy otáčení. [1]

Obr. 2 znázorňuje toleranční prostor obvodového házení vytvořený mezi dvěma souosými válci. Omezující válce jsou od sebe vzdáleny o hodnotu tolerance celkového obvodového házení  $t$ . [1]



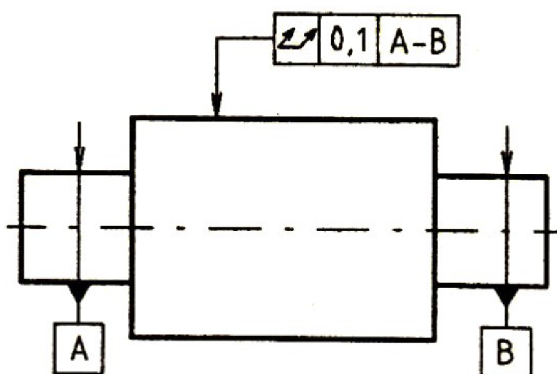
Obr. 2 Toleranční prostor obvodového házení [1]

Kontrola tyčových polotovarů, kvůli které se nové zařízení navrhuje, spočívá v měření obvodového házení. V dalším textu se bude pod pojmem házení uvažovat pouze radiální neboli obvodové házení.

Měření házení se provádí na válcových plochách rotačních součástí speciálními přístroji nebo úchylkoměry.

Kontrolovaná součást se v ose rotace uchytil mezi upínací hroty testovacího přípravku. K testované válcové ploše se přiloží úchylkoměr. Během otáčení součásti při měření se zjišťuje minimální a maximální hodnota vzdálenosti od osy rotace. Rozdíl hodnot je házení součásti.

Na Obr. 3 je znázorněna rotační součást s předpisem povolené tolerance obvodového házení. Tolerance je zadána schematickou značkou. Celkové obvodové házení rotační součásti nesmí překročit 0,1mm v kterémkoliv bodě na povrchu tělesa v průběhu několika po sobě jdoucích otáček kolem společné osy A-B.



Obr. 3 Předpis tolerance obvodového házení[1]

## 2.2 Stávající pracoviště ručního měření házení

V závěrečné fázi výroby prochází tyčový polotovar tepelným zpracováním při němž může dojít k prohnutí původně rovné součásti. Pro vlastní montáž finálního výrobku je důležité používat výhradně rovné díly.

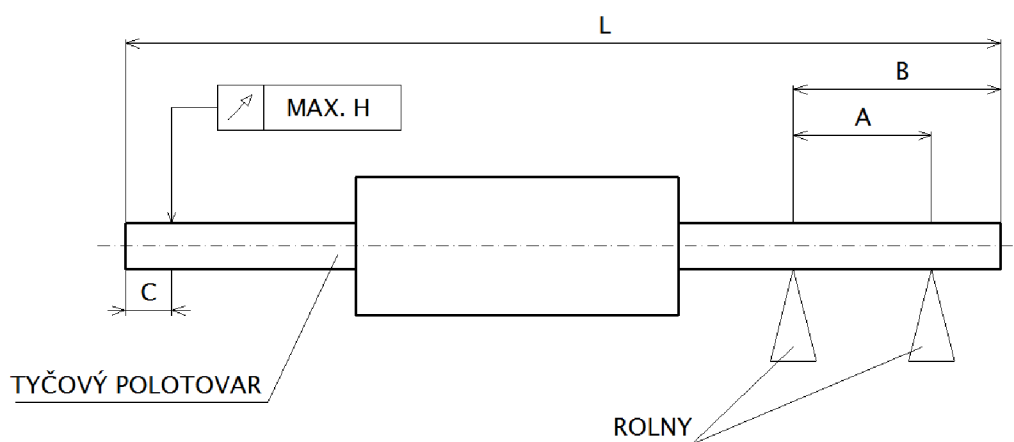


Stávající kontrola tyčových polotovarů probíhá současně na čtyřech pracovištích. Vyhovující polotovary jsou uvolněny do další výroby, nevyhovující jsou opravovány na rovnacím zařízení.

Zda-li je tyčový polotovar vyhovující nebo nevyhovující závisí na jeho obvodovém házení. Ke každému typu polotovarů je zpracována norma s maximální přípustnou hodnotou obvodového házení.

Na rozdíl od klasického zařízení pro měření obvodového házení se kontrolované výrobky neupíná mezi otočné hroty testovacího zařízení, ale pokládá se na dva páry otočných roln plnicích funkcí podpěrných bodů. Testovaný polotovar se během měření odvaluje po otočných rolnách, obvodové házení je snímáno digitálním úchylkoměrem v definovaném místě polotovarů.

V předpisu každého tyčového polotovarů je uvedeno umístění podpěrných roln měřicího zařízení včetně určení místa vlastního měření, viz. Obr. 4 .



Obr. 4 Tyčový polotovar

Použitý způsob kontroly tyčových polotovarů je výhradně lidskou doménou. Pracovník provádějící měření obvodového házení vkládá po jednom tyčové polotovary do testovacího zařízení. Během měření ručně otáčí testovaným polotovarem o předepsaný počet otáček. Digitální úchylkoměr průběžně zaznamenává nejvyšší změřenou hodnotu obvodového házení. Po ukončení měření se z displeje úchylkoměru odečte nejvyšší naměřená hodnota házení  $H$  a rozhodne se, zda-li je házení polotovarů v povolené toleranci a proto výrobek vyhovující či nikoliv.

Měření obvodového házení probíhá ve vysokém pracovním tempu. Každý pracovník během osmi hodinové pracovní doby otestuje přibližně 1000 polotovarů. S ohledem na vysoké množství testovaných polotovarů dochází vlivem lidského faktoru k chybám při měření, odečtu hodnot z měřicího přístroje, případně k chybnému vyhodnocení vyhovujícího či zmetkového kusu.

Při použitém způsobu měření házení je rotace tyčového polotovarů vyvozována monotonním pohybem ruky pracovníka. Z dlouhodobého hlediska, vzhledem k vysokým objemům testovaných polotovarů, zaměstnancům stávajícího pracoviště ručního měření hrozí možné zdravotní komplikace.

### 2.3 Požadavky na navrhované zařízení

Úkolem navrhovaného zařízení je nahradit skupinu čtyř pracovišť ručního měření obvodového házení. Zařízení bude současně plnit i funkci třidičky. Navrhovaný stroj bude implementován do výrobní linky, svojí činností nesmí negativně ovlivnit výrobní časy. Čas testovacího cyklu navrhovaného zařízení musí být kratší než výrobní takt předřazené linky.

Integrace navrhovaného zařízení přímo do výrobní linky přinese vyšší produktivitu a zefektivnění výroby. Odpadnou činnosti spojené s manipulací, transportem a skladováním tyčových polotovarů. Významná je časová úspora i během vlastního měření házení.

Použitím stroje se vyloučí chyby způsobené lidským faktorem a zabrání se možným zdravotním komplikacím pracovníků způsobených monotónní a opakující se činností.

Výrobní linka včetně navrhovaného zařízení bude pracovat v nepřetržitém provozu. Polotovary vystupující z předřazené linky budou s využitím podávacího zařízení transportovány na vstup navrhovaného stroje. Kontrola a třídění tyčových polotovarů poběží zcela automaticky bez nutnosti trvalé přítomnosti obsluhy. Vyhovující polotovary se budou transportovat k navazující technologii, nevyhovující kusy se budou zachytávat, dále opravovat a vracet do výroby.

Výrobní program linky, jejíž součástí bude i navržený stroj, nezahrnuje veškerý sortiment výrobků. Část výroby, jedná se převážně o krátké tyčové polotovary, se vyrábí na jiných strojích. Na žádost objednatele bude možné navrhované zařízení provozovat i zcela autonomně bez výrobní linky z důvodu testování i těchto výrobků.

Testovací zařízení musí být univerzální pro všechny stávající výrobky. Do budoucna se počítá s rozšířením sortimentu o další polotovary, lišící se délkou, průměrem i profilem. Z důvodu univerzálnosti je třeba zařízení vybavit výměnnými díly přizpůsobenými konkrétnímu typu tyčových polotovarů. Požadavkem zadavatele je minimalizovat čas potřebný k mechanické přestavbě stroje při změně testovaného artiklu.

### 2.4 Náhradní metoda kontroly tyčových polotovarů – měření průhybu

Metody měření obvodového házení jsou založeny na rotaci testované součásti kolem podélné osy. Navrhované zařízení musí splňovat podmínku univerzálnosti pro veškerý sortiment testovaných výrobků. S ohledem na rozdílnou délku, průměr i tvar tyčových polotovarů by bylo obtížné vyrobit univerzální upínací hlavu přizpůsobenou k upnutí a otáčení všemi typy testovaných výrobků při měření.

Po důkladném seznámení se s přesnou funkcí tyčového polotovaru ve finálním výrobku byl z důvodu univerzálnosti, zrychlení měření a zjednodušení konstrukce navrhovaného zařízení majiteli zadavatelské firmy předložen návrh náhradní testovací metody splňující účel původní kontroly.

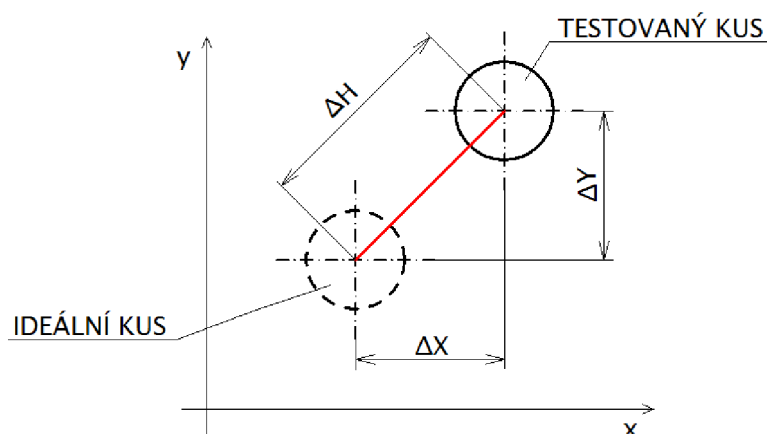
Měření obvodového házení tyčových polotovarů se nahradí rychlejší a méně náročnou kontrolou - měřením průhybu. Měření průhybu proběhne staticky, bezkontaktně, odpadne problém s upínáním a rotací testovaného kusu. Dosáhne se i kratšího času cyklu stroje. Jednodušší mechanická konstrukce přinese snížení ceny navrhovaného zařízení.

Z uvedených důvodů byla navržená změna kontroly tyčových polotovarů zadavatelem přijata. Původní měření obvodového házení bylo nahrazeno technicky i časově méně náročnou operací, měřením průhybu. Náhradní metoda kontroly tyčových polotovarů si vyžádá přizpůsobení norem jednotlivých polotovarů.

Upravená norma vyhovujících kusů bude udávat povolený průhyb tyčových polotovarů s přesností v desetinách milimetru, proto požadavek na přesnost měření i přesnost polohování navrhovaného zařízení bude v setinách milimetru. Součet chyb vzniklých polohováním zařízení a měřením průhybu nepřesáhne 0,02mm.

Průhyb tyčových polotovarů se bude vyhodnocovat výpočtem. K měření se použije dvourozměrné měřicí pole.

Před začátkem měření se určí souřadnice středu ideálně rovného kusu v definovaném místě. Během vlastního měření se budou zjišťovat souřadnice středů testovaných výrobků. Z rozdílu souřadnic středů ideálně rovného kusu a testovaného výrobku se určí odchylky  $\Delta X$  a  $\Delta Y$  ve dvou vzájemně kolmých osách.



Obr. 5 Měření průhybu

Výsledný průhyb testovaného polotovaru  $\Delta H$  se vypočítá z naměřených odchylek  $\Delta X$  a  $\Delta Y$  pomocí Pythagorovi věty (1). Princip měření průhybu je na Obr. 5 .

$$\Delta H = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2} \quad (1)$$



### 3 NÁVRH KONCEPCE STROJE

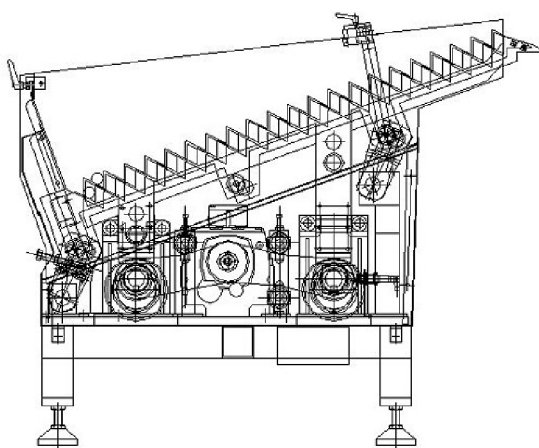
V následujícím textu jsou zpracovány tři koncepty navrhovaného zařízení z nichž se vybere nejvhodnější řešení. Rozhodujícími faktory pro výběr jsou nejkratší čas cyklu stroje a samozřejmě cena.

U každé varianty je uveden funkční popis spolu s náčrtem navrhovaného řešení a časový diagram zachycující průběh jednotlivých operací během pracovního cyklu. V časovém diagramu jsou operace přímo ovlivňující výsledný čas pracovního cyklu stroje označeny červenou barvou, žlutá barva značí operace s časovou rezervou. Předpokládaný čas cyklu stroje je stanoven z časového diagramu. U každé navrhované varianty jsou vyčísleny přibližné náklady na zařízení.

Ve všech navrhovaných řešeních se předpokládá použití shodné konstrukce měřicí stanice založené na bezkontaktním měření. Základem budou dva optické mikrometry vzájemně pootočené o  $90^\circ$ , průsečík jejich pracovních prostorů vytvoří dvourozměrné měřicí pole. Průhyb vloženého tyčového polotovaru se určí výpočtem z naměřených odchylek od ideálně rovného kusu ve dvou osách. Výběr vhodných senzorů k měření průhybu je řešen v dalším textu. Předpokládaná cena měřicího řetězce je 300 000Kč.

Transport polotovarů z předřazené linky ve všech navrhovaných variantách zajistí krokovací podavač, viz. Obr. 6. Krokovací podavač je vybaven pevnými i pohyblivými lištami, vzájemně přesazenými o polovinu rozteče zubu. Posuv polotovarů je řešen vysouváním a zasouváním pohyblivých lišt. Pohybem lišty směrem nahoru jsou dopravované polotovary odebrány z původního umístění, pohybem lišty směrem dolů se vlivem přesazení zubů posunou o jednu pozici vpřed. Krokovací podavač plní současně i funkci třídičky. V případě zahlcení vstupní části podavače je zařízení schopno díky tvaru zubů dávkovat polotovary na výstup po jednom kusu. Krokovací podavač je vybaven nastavitelnými vodícími lištami, splňuje tak požadavek univerzality.

Cena krokovacího podavače je přibližně 400 000Kč.



Obr. 6 Krokovací podavač

Všechny varianty navrhovaného zařízení shodně obsahují dva výstupy pro vyhovující a pro zmetkové polotovary.

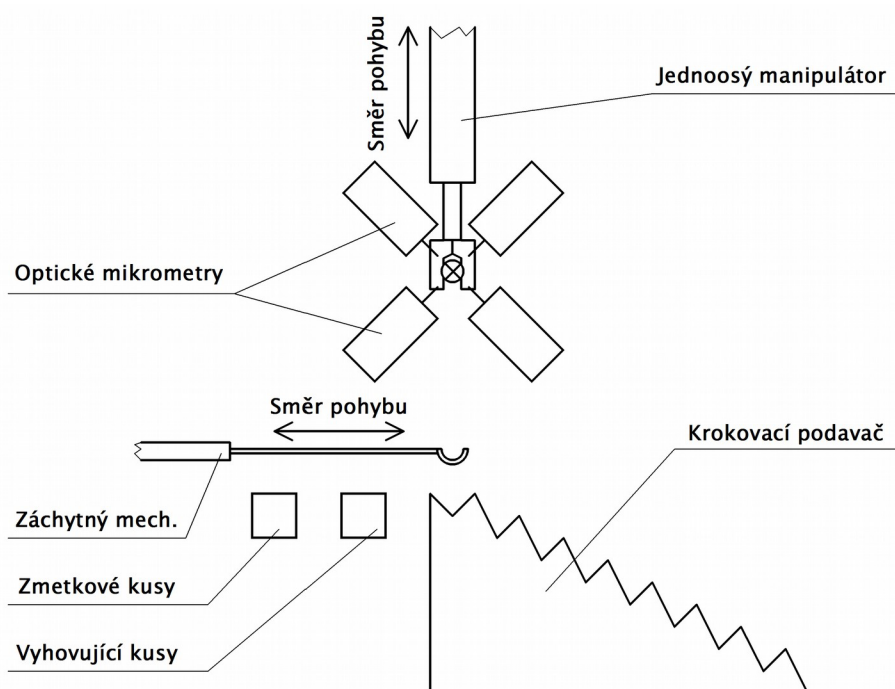
Testované tyčové polotovary se liší délkou, tvarem i průměrem. Z důvodu univerzality navrhovaného zařízení se musí zajistit nastavitelnost místa úchopu odpovídajícího rozteči podpěrných bodů i nastavitelnost polohy tyčového polotovaru při měření.

### 3.1 Varianta 1 - jednoosý manipulátor

Hlavními součástmi navrhovaného zařízení jsou měřicí stanice, krokovací podavač a jednoosý manipulátor.

Krokovací podavač postupně přesouvá testované polotovary z předřazené linky směrem k výstupu. Poslední pozice krokovacího podavače je předávacím místem nad nímž je umístěna měřicí stanice. Přesun testovaných polotovarů mezi krokovacím podavačem a měřicí stanicí zajišťuje jednoosý vertikální manipulátor.

Testované polotovary připravené na poslední pozici krokovacího podavače jsou upínány uchopovacími kleštěmi manipulátoru a přenášeny do měřicí stanice k měření průhybu. Po celou dobu měření jsou testované polotovary drženy v uchopovacích kleštích manipulátoru.



Obr. 7 Návrh koncepce stroje - Varianta 1

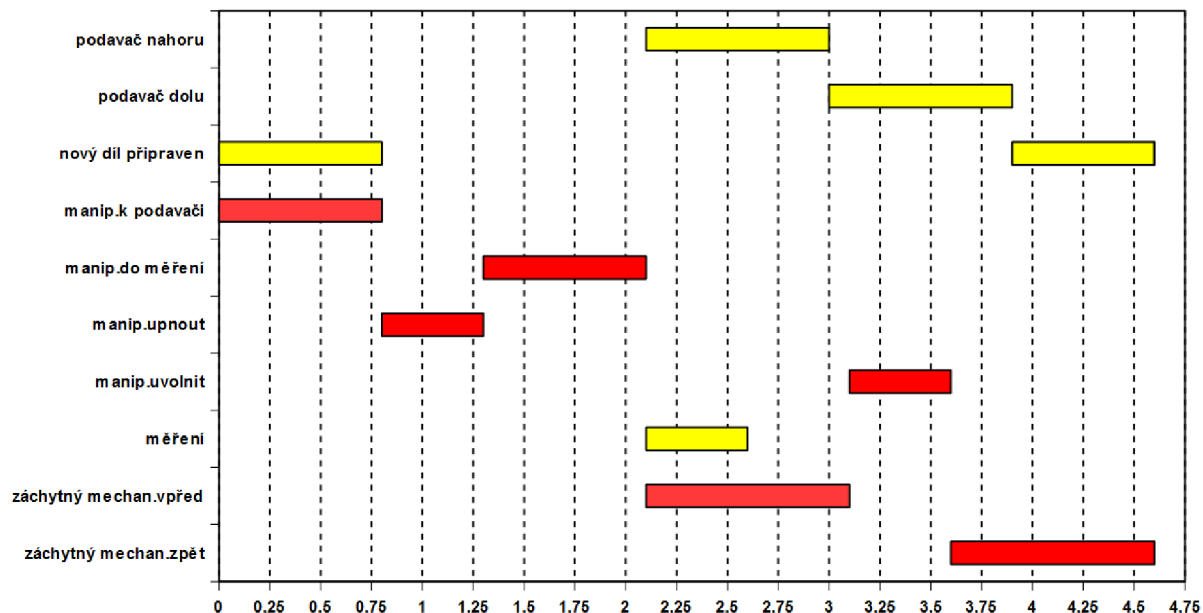
Odebírání otestovaných polotovarů po měření zajišťuje posuvný záchytný mechanismus ovládaný pneumatickou pístnicí. Ve výchozím stavu je poloha záchytného mechanismu mimo pracovní prostor manipulátoru. Po příjezdu manipulátoru do měřicí stanice, současně se začátkem měření průhybu, se záchytný mechanismus začne přesouvat pod manipulátor v měřicí stanici.

Při dosažení koncové polohy záchytného mechanismu je již měření průhybu ukončeno. Manipulátor rozevře čelisti uchopovacích kleští, vlivem gravitace otestovaný polotovar spadne do připraveného záchytného mechanismu. Pohybem záchytného mechanismu směrem zpět do výchozí polohy se uvolní pracovní prostor manipulátoru. Podle výsledku měření je otestovaný polotovar přesunut záchytným mechanismem na výstup zařízení pro vyhovující nebo zmetkové kusy.

Současně se zahájením měření se také odstartuje cyklus krokovacího podavače, na předávací místo se doplní nový polotovar určený k měření.

Variabilita úchopu tyčového polotovaru manipulátorem je zajištěna mechanickým nastavením polohy vodicích lišt krokovacího podavače. Nastavení měřicího místa na tyčovém polotovaru je zajištěno mechanickým přestavením polohy měřicí stanice.

Celkový čas pracovního cyklu stroje je 4,6s.



Obr. 8 Časový diagram - Varianta 1

Tab. 1 Cenová kalkulace – Varianta 1

	cena [Kč]
krokovací podavač	400 000,-
měřicí řetězec	300 000,-
jednoosý manipulátor včetně motoru	90 000,-
výroba mechanických komponentů včetně rámu a krytů	250 000,-
pneumatika	60 000
řídící systém a frekvenční měniče	140 000,-
elektroinstalace (rozsah, kabeláž, senzory, bezpečnost)	90 000,-
celková cena	1 330 000,-

### 3.2 Varianta 2 – tříosý manipulátor

Navrhované zařízení bude postaveno na bázi tříosého manipulátoru vybaveného uchopovacími kleštěmi. Tyčové polotovary určené k měření průhybu budou dopravovány do zakládací stanice pomocí krokovacího podavače.

Krokovací podavač postupně přesouvá testované polotovary z předřazené linky směrem k výstupu. Poslední pozice krokovacího podavače je předávacím místem pro tříosý manipulátor. Testované polotovary jsou přenášeny do měřicí stanice k měření průhybu. Po celou dobu měření jsou testované polotovary drženy v uchopovacích kleštích manipulátoru.

Z důvodu co nejkratšího času cyklu stroje se měřicí stanice umístí na samostatný pojezd umožňující pohyb v jedné ose. Poloha měřicí stanice se bude přizpůsobovat délce tyčových polotovarů. Při kontrole krátkých polotovarů se úpravou polohy měřicí stanice dosáhne zkrácení přejezdové dráhy manipulátoru a tím se docílí časová úspora. Nastavení polohy měřicí stanice proběhne před začátkem automatického cyklu stroje. Během výroby se poloha měřicí stanice nebude upravovat.

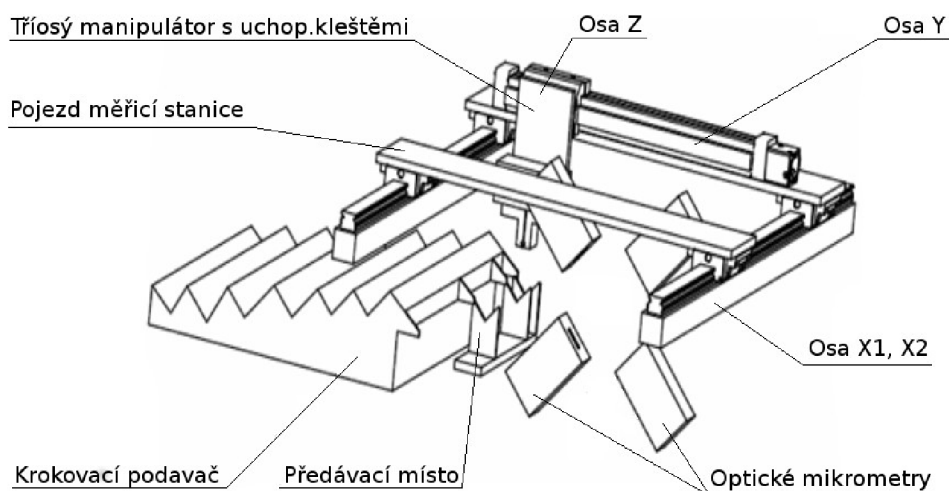
Výstupní stanice bude vybavena pohyblivou klapkou zajišťující třídění materiálu. Podle vypočteného průhybu třídící klapka přestaví propad polotovaru do dobrých nebo do zmetkových kusů.

Pracovní cyklus manipulátoru začíná z výchozí pozice nacházející se nad zakládací stanicí. Čelisti uchopovacích kleští jsou otevřeny. Jsou-li splněny všechny podmínky pro chod zařízení, start pracovního cyklu manipulátoru nastane po založení testovaného kusu do zakládací stanice. Manipulátor odebere testovaný polotovar a převeze ho do měřicí stanice. Po odebrání testovaného kusu je zakládací stanice uvolněna a krokovací podavač může dopravit další polotovar.

Po změření průhybu v měřicí stanici dojde k uvolnění čelistí uchopovacích kleští manipulátoru a otestovaný výrobek samovolně propadne na klapku zajišťující třídění. Prázdný manipulátor se přesune do výchozí pozice. Odebráním nového polotovaru začne další pracovní cyklus. Z naměřené hodnoty průhybu se vyhodnotí, zda-li je polotovar vyhovující nebo nevyhovující. Třídící klapka zajistí přesun polotovaru do příslušné kategorie.

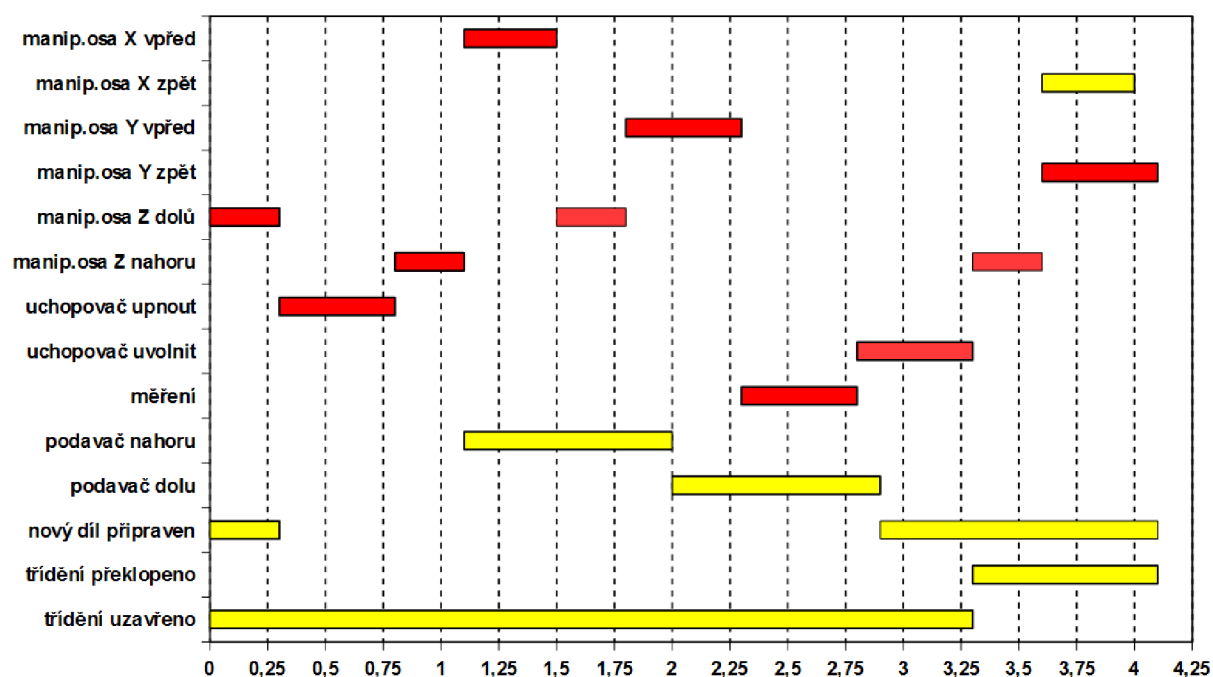
Variabilita úchopu tyčového polotovaru i polohy při měření je zajištěna tříosým manipulátorem.

Celkový čas pracovního cyklu stroje je 4,1s.



Obr. 9 Návrh koncepce stroje - Varianta 2





Obr. 10 Časový diagram - Varianta 2

Tab. 2 Cenová kalkulace – Varianta 2

	cena [Kč]
krokovací podavač	400 000,-
měřicí řetězec	300 000,-
tříosý manipulátor, pojezd měř. stanice včetně lineárních motorů	250 000,-
výroba mechanických komponentů včetně rámu a krytů	220 000,-
pneumatika	60 000,-
řídící systém a frekvenční měniče	200 000,-
elektroinstalace (rozdávěč, kabeláž, senzory, bezpečnost)	90 000,-
celková cena	1 520 000,-

### 3.3 Varianta 3 – otočný stůl

Činnost navrhovaného zařízení je rozdělena do čtyř operací. Nejdůležitější a nejdražší komponentou tohoto řešení je otočný stůl sloužící k přepravě testovaných výrobků mezi jednotlivými operacemi. Otočný stůl je rozdělen na čtvrtiny, každá část je vybavena magnetickým držákem určeným k přidržení testovaného polotovaru.

Kolem otočného stolu jsou rozestaveny pracovní stanice v nichž probíhají jednotlivé operace. Během jednoho kroku se otočný stůl otočí o úhel  $90^\circ$  a přemístí držené tyčové polotovary do následující pracovní stanice. Součástí pracovních stanic jsou pneumatické manipulátory určené k zakládání i vyjímání polotovarů z otočného stolu.

Navržené řešení umožňuje vykonávat všechny operace současně. Dokončení časově nejnáročnější operace dává povel k otáčení stolu a startu dalšího cyklu. Průchod polotovarů testovacím zařízením trvá po dobu dvou nebo tří kroků otočného stolu.

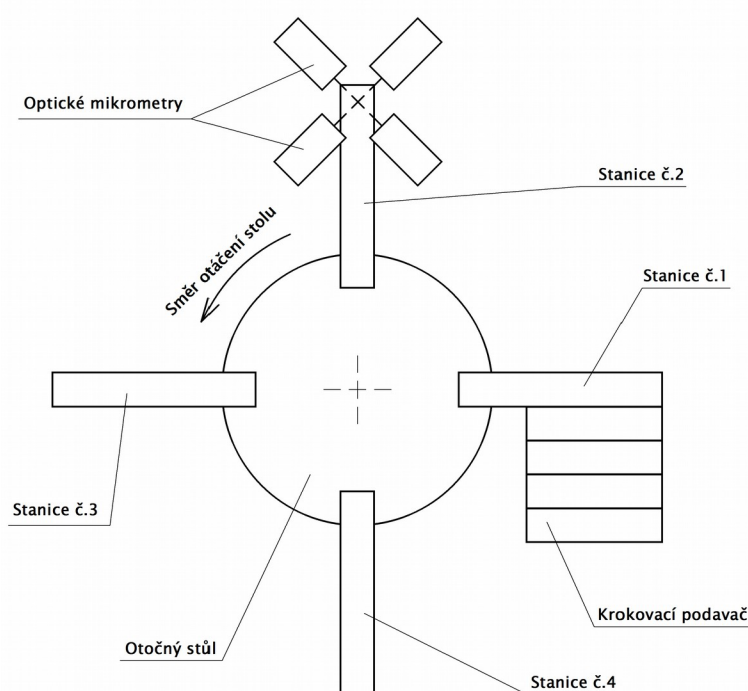
Navrhované zařízení obsahuje tyto stanice:

Stanice č.1: zakládací stanice

Stanice č.2: měřicí stanice

Stanice č.3: výstupní stanice – vyhovující polotovary

Stanice č.4: výstupní stanice – zmetkové polotovary



Obr. 11 Návrh koncepce stroje - Varianta 3

Pracovní cyklus začíná ve Stanici č.1 přesunutím testovaného polotovaru z krokovacího podavače do magnetického držáku na otočném stole. Přesun polotovaru je řešen pneumatickým manipulátorem. Po založení polotovaru a návratu manipulátoru je činnost ve Stanici č.1 ukončena. Po dokončení všech operací v ostatních stanicích dojde k odstartování pohybu stolu. Pootočením stolu se testované polotovary přesunou do následujících pracovních stanic k navazujícím operacím.

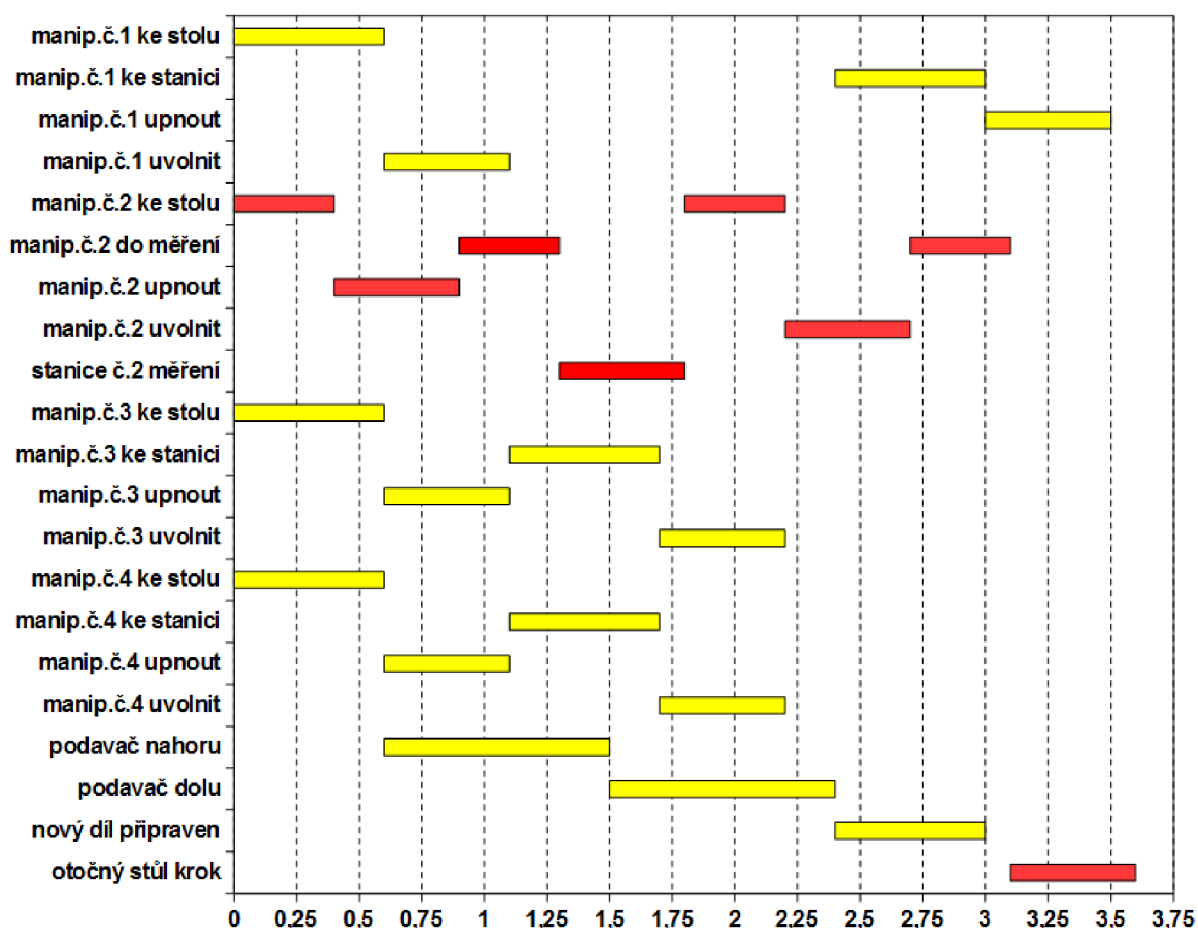
Ve Stanici č.2 probíhá měření průhybu. Měřicí stanice je vybavena stejnými optickými mikrometry jako v předchozích řešeních. Pneumatický manipulátor přemístí testovaný polotovár směrem nahoru do měřicího prostoru snímačů, následně proběhne měření a vrácení polotovaru do magnetického držáku otočného stolu. Ve Stanici č.1 je volná pozice, do níž pneumatický manipulátor založí nový polotovár. Po dokončení všech operací dojde k druhému pootočení stolu.

Stanice č.3 je určená pro výstup vyhovujících polotovárů. Patří-li polotovár mezi vyhovující díly, je pneumatickým manipulátorem vyjmut a přemístěn na pásový dopravník. Uvolněný magnetický držák na otočném stole zůstane prázdný. Po dokončení všech operací v ostatních stanicích následuje třetí pootočení stolu.

Nevyhovující kusy jsou vyjímány ve Stanici č.4 určené pro zmetkové výrobky. Stanice č.3 a Stanice č.4 jsou konstrukčně shodné, vyjmutí zmetkových dílů probíhá stejným způsobem.

Variabilita úchopu tyčového polotovaru je zajištěna mechanickým nastavením polohy vodicích lišt krokovacího podavače. Nastavení měřicího místa na tyčovém polotovaru je zajištěno mechanickým přestavením polohy měřicí stanice.

Celkový čas pracovního cyklu stroje je 3,6s.



Obr. 12 Časový diagram - Varianta 3

Tab. 3 Cenová kalkulace – Varianta 3

	cena [Kč]
krokovací podavač	400 000,-
měřicí řetězec	300 000,-
otočný stůl	350 000,-
výroba mechanických komponentů včetně rámu a krytů	300 000,-
pneumatika včetně pneumatických manipulátorů	200 000,-
řídící systém a frekvenční měniče	150 000,-
elektroinstalace (rozdávěč, kabeláž, senzory, bezpečnost)	90 000,-
celková cena	1 790 000,-

### Výběr vhodného řešení

Z porovnání navržených řešení vyplývají následující závěry. Různé délky testovaných polotovarů vyžadují variabilní úchop i nastavitelné místo pro měření průhybu.

Splnění požadavku na univerzálnost u Varianty 1 a 3 je dosaženo pomocí dodatečných mechanických úprav zařízení. Vzhledem k velkoobjemové výrobě se uvažuje manuální nastavování stroje. Variabilita místa úchopu polotovaru při odběru z předávací pozice i variabilita místa pro měření průhybu polotovaru je zajištěna manuálním přestavením stroje.

Varianta 3 s otočným stolem dosahuje časově nejkratšího pracovního cyklu stroje, uvedené řešení je však cenově nejdražší.

Varianta 2 s tříosým manipulátorem splňuje požadavek na univerzálnost zařízení. Variabilita místa úchopu polotovaru v předávací pozici i variabilita místa pro měření průhybu je zajištěna tříosým manipulátorem. Přestavování polohy měřicí stanice umožní zkrácení času cyklu stroje.

Tab. 4 Porovnání navrhovaných řešení

	čas [s]	cena [Kč]
Varianta 1 – jednoosý manipulátor	4,6	1 330 000,-
Varianta 2 – tříosý manipulátor	4,1	1 520 000,-
Varianta 3 – otočný stůl	3,6	1 790 000,-

Po projednání všech navrhovaných variant se zadavatelem bylo dohodnuto realizovat Variantu 2 s tříosým manipulátorem a polohovatelnou měřicí stanicí.

Vybrané řešení je optimální z hlediska univerzálnosti, požadovaného času cyklu stroje i cenovými náklady za zařízení.

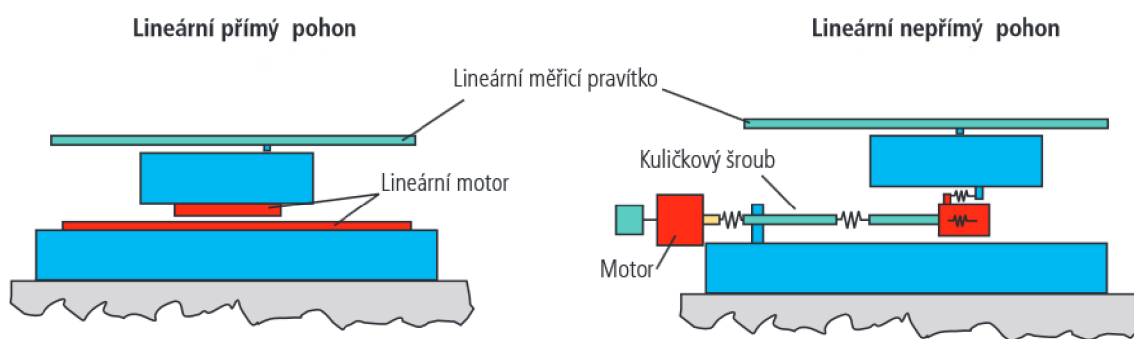
Tříosý manipulátor i polohování měřicí stanice bude řízeno softwarově. Při změně testovaného artiklu se nebude provádět žádné manuální přestavování stroje, vše bude zajištěno řídicím systémem dle receptury výrobku. Navržené řešení splňuje i požadavek na rychlost přestavby stroje při změně artiklu.

## 4 VÝBĚR POUŽITÝCH PRVKŮ

### 4.1 Motory pohánějící osy manipulátoru

Součástí navrhovaného zařízení je tříosý manipulátor jehož úkolem je přenášet tyčové polotovary v pravouhlé souřadné soustavě. Pohyby manipulátoru zajistí posuvné lineární jednotky.

K pohonu os manipulátoru lze využít přímé nebo nepřímé lineární pohony. Vzájemné porovnání obou typů je na Obr. 13. Představitelem přímého lineárního pohonu je lineární motor vyvozující tlačnou sílu přímo do pohyblivého suportu. Nepřímý lineární pohon využívá přídavný převodový mechanismus transformující rotační pohyb klasického motoru na lineární a jím poté působí na pohyblivý suport. Zástupcem nepřímého lineárního pohonu je kuličkový šroub nebo ozubený řemen. Transformace rotačního pohybu klasického motoru ovlivňuje silové i rychlostní účinky na pohyblivý suport.



Obr. 13 Porovnání lineárních pohonů [2]

V dalším textu jsou popsány tři typy lineárních jednotek. Na základě jejich vlastností a omezujících parametrů se vybere nejvhodnější řešení.

### Kuličkový šroub

Kuličkový šroub je konstrukční prvek pohybového ústrojí, stejně jako klasický šroub převádí rotační pohyb na pohyb přímočarý. Hlavními součástmi kuličkového šroubu jsou hřídel se šroubovou dráhou, matice a zařízení umožňující oběh kuliček. Limitujícím faktorem rychlosti posuvu je rychlost oběhu kuliček.

Kuličkové šrouby oproti klasickým šroubům vynikají nižším součinitelem tření projevujícím se vyšší účinností. V případě klasického šroubu dochází ke tření mezi závity šroubu a matice.

U kuličkového šroubu nedochází k přímému kontaktu hřídele a matice. Závitový prostor je vyplněn ocelovými kuličkami. Při otáčení kuličkového šroubu vzniká podstatně menší valivý odpor, než v případě třecího odporu klasického šroubu. Kuličkový šroub není samosvorný.

Ve většině případů je poháněným prvkem kuličkový šroub uložený pomocí ložisek v rámu zařízení. Lineární pohyb vykonává matice pevně spojená s pohyblivým posuvem. Pro dlouhé přejezdy je však výhodnější použít poháněné matice s pevně vetknutým kuličkovým šroubem. Sestava se vyznačuje větší tuhostí, nevýhodou je zvýšení hmotnosti pohyblivých částí se zátěží o hmotnost motoru pohánějícího matici.

Výhodou pohonu kuličkovým šroubem je mechanická konstrukce umožňující vyvodit velkou axiální sílu motorem s menším kroutícím momentem. Osazení hřídele kuličkového šroubu převodovkou do pomala umožňuje použít motor s ještě nižším kroutícím momentem, nevýhodou je vnášení nepřesností do měřicího řetězce. Na posuvnou sílu výstupní pohybové jednotky lze přeměnit přibližně 90% točivého momentu pohánějícího motoru. [4]

S použitým mechanickým převodem souvisí i menší citlivost na změny hmotnosti zátěže a zpětném působení vnějších sil. Další výhodou je velká tuhost osy. Nedostatečná tuhost systému může způsobit rozkmitání pohonu. [13]



*Obr. 14 Lineární pohon s kuličkovým šroubem [11]*

Při použití varianty s motorem pohánějícím hřídel kuličkového šroubu odpadá problém s pohyblivými přívody mezi pevnou částí stroje a motorem umístěným na pohyblivé se jednotce.

Informace o poloze pohyblivé jednotky se nejčastěji získávají prostřednictvím nepřímého odměřování. Rotační snímač polohy je přímo spojen s rotorem poháněcího motoru. Poloha pohyblivé jednotky se zjišťuje výpočtem z úhlové dráhy otáčejícího se rotoru. K získávání přesnějších informací o poloze se používají přímé optické nebo elektromagnetické odměřovací systémy s vysokým rozlišením.

Omezujícím parametrem dynamických vlastností pohonu kuličkovým šroubem je maximální povolená rychlost otáčení šroubového hřídele. U pohonů kuličkovým šroubem se udávají kritické otáčky, při kterých pohon dosáhne své rezonanční frekvence. Kritické otáčky závisí na délce, průměru a způsobu uložení konců hřídele. Maximální pracovní otáčky hřídele nesmí překročit 80% kritických otáček. Pohon kuličkovým šroubem je omezen i maximální axiální silou. [14]

Velkou nevýhodou pohonu s kuličkovým šroubem je moment setrvačnosti mechanického převodu mezi poháněcím motorem a výstupní pohyblivou jednotkou pohonu. Moment setrvačnosti převodu zvyšuje kinetickou energii pohyblivé se zátěže, zvyšují se nároky na výkon motoru.

Nižší kinetické energie pohonu kuličkovým šroubem je možné docílit snížením otáček hřídele. Rychlost posuvu výstupní pohyblivé jednotky závisí na stoupání závitu kuličkového šroubu a rychlosti otáčení poháněné hřídele. Při zachování původní rychlosti posuvu je možné otáčky hřídele snížit za současného zvýšení stoupání závitu kuličkového šroubu.

Tření mezi jednotlivými pohyblivými se komponenty jsou příčinou opotřebení. Vlivem tření dochází k ohřevu hřídele kuličkového šroubu. Teplotní roztažnost materiálu způsobuje délkové změny ovlivňující přesnost polohování. Snížením otáček hřídele se sníží i oteplení. [13]

Samotná hřídel kuličkového šroubu má omezenou životnost. Vhodným nastavením ryvu lze upravit průběh změny zrychlení motoru a tím prodloužit životnost hřídele za cenu horší dynamiky systému. Mezi nevýhody patří nutnost mazání kuličkového šroubu a matice.

## Ozubený řemen

Pohony ozubenými řemeny se používají k transformaci rotačního pohybu motoru na pohyb přímočarý. Ozubený řemen přenáší tahovou sílu mezi dvěma ozubenými koly, z nichž jedno je poháněno kroutícím momentem rotačního motoru. Ozubený řemen udržuje mezi ozubenými koly synchronní otáčky.

Ozubená kola neboli řemenice jsou vybaveny vnějším ozubením, ozubený řemen vnitřním ozubením. Tvarem i roztečí zubů si musí vzájemně odpovídat.

Na rozdíl od plochých nebo klínových řemenů se k přenosu síly mezi řemenem a řemenicí nevyužívá tření. Tahová síla je přenášena tvarovým stykem zprostředkovaným ozubením. Převody ozubenými řemeny nevyžadují velké napínací síly, ložiska řemenic jsou zatížena jen malými radiálními silami. Při správném napnutí řemene je zaručena synchronizace otáček, protože nedochází k prokluzu. Účinnost ozubených řemenů dosahuje 97 až 99%. [8]



*Obr. 15 Lineární pohon s ozubeným řemenem [9]*

Podle uchycení konců ozubeného řemene se rozlišují dva způsoby konstrukce lineárních jednotek. V prvním případě jsou oba konce ozubeného řemene spojeny s výstupní pohyblivou jednotkou. Motor pohánějící řemenici je namontován na pevnou část lineární jednotky, svojí hmotností nezatěžuje pohyblivou část.

Ve druhém případě je řemen ukotven v obou krajních polohách pojezdové dráhy. Motor pohánějící ozubené kolo je umístěn na výstupní pohyblivé části. Nevýhodou uvedeného konstrukčního řešení je zvýšená hmotnost pohybující se zátěže. Dále je nutné použít pohyblivé přívody energie pro napájení motoru, případně pohyblivé kabely ke snímačům otáček a odměřování polohy.

Velkou výhodou lineárních jednotek s ozubenými řemeny oproti jednotkám s kuličkovými šrouby je jejich nižší pořizovací cena a vysoká účinnost. Mezi další výhody patří nízká hlučnost a malé nároky na údržbu bez nutnosti mazání ozubeného řemene.

Lineární pohony s ozubeným řemenem je možné využívat k dlouhým pracovním zdvihům. Z důvodu pružnosti ozubeného řemene vykazují lineární jednotky menší tuhost projevující se pružným přenosem síly. Při dlouhých přejezdech může docházet k velkým deformacím ozubeného řemene. Nízká tuhost udává limity pro řízení rychlosti a polohování osy.

## Lineární motor

Klasické motory s mechanickým převodem rotačního pohybu na lineární se v řadě aplikací vlivem setrvačných hmot a vůlí v mechanických převodech dostávají na hranici dynamiky a přesnosti. Třením a namáháním mechanických částí dochází k opotřebování a zvětšování vůlí během provozu.

Lineární motor je rozvinutý do roviny, samostatně bez dalších mechanických převodů vykonává lineární pohyb. Stejně jako klasický rotační servomotor pracuje na indukčním principu. Veškerá tlačná síla lineárního motoru je přímo předávána pohyblivému suportu. Přesnost polohování lineárního motoru závisí na použitém odměřovacím systému. Lineární motor představuje nejvyšší stupeň integrace pohonu do zařízení. [2]

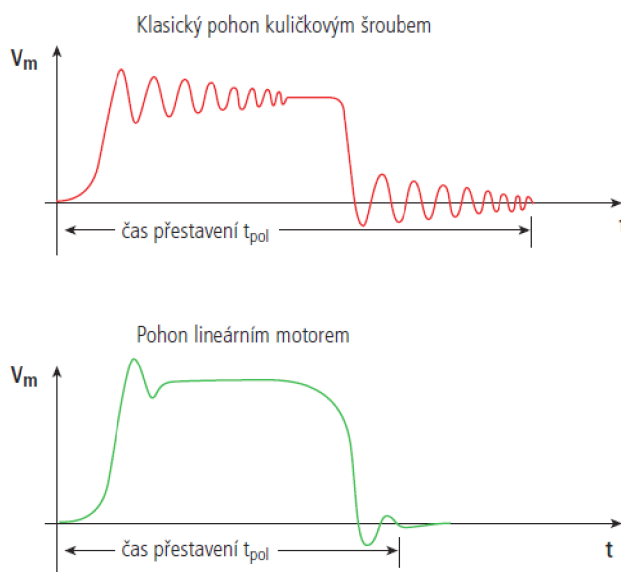
Hlavními částmi lineárního motoru jsou primární a sekundární díl. Primárním dílem se nazývá pohyblivá část odpovídající rozvinutému statoru rotačního motoru. Obsahuje feromagnetický svazek složený z elektrotechnických plechů a trojfázové vinutí uložené v jeho drážkách. Statickou částí vytvářející magnetickou dráhu je sekundární díl. Skládá se ze střídavě orientovaných permanentních magnetů umístěných v rovině. Sekundární díl odpovídá rotoru rotačního motoru. [13]

Zda-li bude pohyblivý primární nebo sekundární díl rozhoduje konstrukční uspořádání stroje. U většiny provedení lineárních motorů se pohybuje primární díl po statické magnetické dráze tvořící sekundární díl. Délku pojezdu lineárního motoru lze libovolným počtem permanentních magnetů přizpůsobit požadavkům konkrétní aplikace. Rychlost pohybu primárního dílu je synchronní s rychlostí pohybu magnetického pole.

Uvedené konstrukční uspořádání vyžaduje použití energetického řetězu s přívody napájení pohyblivého primárního dílu a pohyblivého kabelu ke snímači polohy. Při použití vodního chlazení je třeba pohyblivý přívod a odvod chladicí kapaliny. [13]

Posuvná síla lineárního motoru závisí na velikosti proudu procházejícího vinutím primárního dílu. Rychlost posuvu závisí na jeho frekvenci. [13]

Výhodou lineárních motorů je libovolná délka magnetické dráhy, vysoká přesnost polohování, vysoká rychlost přejezdu i velké zrychlení. Na jednu magnetickou dráhu je možné umístit několik na sobě nezávisle se pohybujících pojezdů (primárních dílů). [2]



Obr. 16 Reakce systému na změnu polohy [2]



Pohony s lineárními motory ve srovnání s pohony s kuličkovými šrouby dosahují kratších přechodových jevů a rychlejšího ustálení v žádané poloze s minimálním překmitem. Na Obr. 16 je srovnání reakcí na změnu polohy klasického pohonu s kuličkovým šroubem a lineárního motoru. [2]

Absence mechanického převodu u lineárního motoru přináší i jisté nevýhody. Mechanický převod kuličkového šroubu je převodem do pomala, slabým servomotorem lze dosáhnout velké tlačné síly. Úpravou stoupání kuličkového šroubu a zvýšením otáček servomotoru lze transformovanou sílu ještě zvýšit. Lineární motor musí vyvinout potřebnou tlačnou sílu sám. Lineární motory jsou vhodné pro aplikace s přesuny velmi vysokou rychlostí, ale s menším silovým zatížením. [2]

#### 4.1.1 Požadavky na pohony navrhovaného zařízení

Koncepce navrhovaného stroje obsahuje dvě pohyblivá zařízení pro něž se budou vybírat vhodné pohony.

Prvním pohyblivým zařízením je tříosý manipulátor přepravující tyčové polotovary. Manipulátor bude sestaven ze tří lineárních jednotek, každá zajistí pohyb jedné osy.

Druhým pohyblivým zařízením je pojezd osazený snímačem k měření průhybu. Pojezd se snímačem bude tvořen jednou lineární jednotkou. Jejím úkolem bude představovat polohu snímače v závislosti na délce tyčových polotovarů.

Délka pracovního cyklu navrhovaného zařízení závisí především na rychlosti pohybu manipulátoru.

Osy manipulátoru jsou označeny písmeny  $X_1$ ,  $Y$ ,  $Z$  a tvoří pravotočivou souřadnou soustavu. Směr pohybu osy  $X_1$  je souhlasný se směrem pohybu osy  $X_2$  osazené snímačem k měření průhybu.

Základ manipulátoru bude tvořen podélnou osou  $X_1$  připevněnou k nosnému rámu navrhovaného zařízení. Na pohyblivou část osy  $X_1$  bude namontována příčná osa  $Y$  a k ní svislá osa  $Z$ . Pohyblivá část osy  $Z$  bude vybavena uchopovacími kleštěmi sloužícími k upínání testovaného výrobku. Nejvíce zatíženou osou manipulátoru bude osa  $X_1$ .

Pohyb osou  $X_2$ , upravující polohu snímače měření průhybu, se bude vykonávat jen při změně artiklu mimo automatický cyklus. Rychlost pohybu osy  $X_2$  nemá žádný vliv na délku cyklu. Při výběru vhodného pohonu se zohlední jen hmotnost snímače s kabeláží.

Pracovní cyklus manipulátoru vychází z časového diagramu na Obr. 10. Pracovní cyklus se skládá z deseti kroků uvedených v Tab. 5. Jednotlivé kroky pracovního cyklu manipulátoru na sebe plynule navazují. Každému kroku manipulátoru je vyhrazen potřebný čas na provedení požadované operace. V Tab. 5 jsou uvedeny souřadnice, na kterých se po úspěšném dokončení kroku bude nacházet příslušná osa manipulátoru. Hodnota v závorce informuje o vzdálenosti a směru pohybu do žádané polohy.

Tab. 5 Pracovní cyklus manipulátoru

krok	popis	čas[s]			X <sub>1</sub> [mm] 0	Y[mm] 0	Z[mm] 0	uchopovač uvolněn
		start	krok	stop				
1	Z dolu	0,0	0,3	0,3			(-100) -100	upnut
2	upínání	0,3	0,5	0,8				
3	Z nahoru	0,8	0,3	1,1			(+100) 0	
4	X <sub>1</sub> vpřed	1,1	0,4	1,5	(+200) 200			
5	Z dolu	1,5	0,3	1,8			(-100) -100	
6	Y do M.S.	1,8	0,5	2,3		(+300) 300		
7	měření	2,3	0,5	2,8				uvolněn
8	uvolnění	2,8	0,5	3,3				
9	Z nahoru	3,3	0,3	3,6			(+100) 0	
10	X <sub>1</sub> +Y nad Z.S.	3,6	0,5	4,1	(-200) 0	(-300) 0		

Mechanická konstrukce navrhovaného zařízení omezuje nejvyšší povolenou rychlost vodorovných os manipulátoru na  $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Rychlost svislé osy nesmí překročit  $0,5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Nejvyšší možné zrychlení os manipulátoru bude zjištěno experimentálně, je dáno maximální špičkovou proudovou zatížitelností motorů a jejich výkonových dílů, dále je třeba zohlednit tuhost mechanické konstrukce stroje. Pro účely návrhu pohonů je ve výpočtech použita hodnota zrychlení  $5\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ . Časy vyhrazené jednotlivým krokům manipulátoru jsou přizpůsobeny omezujícím podmínkám.

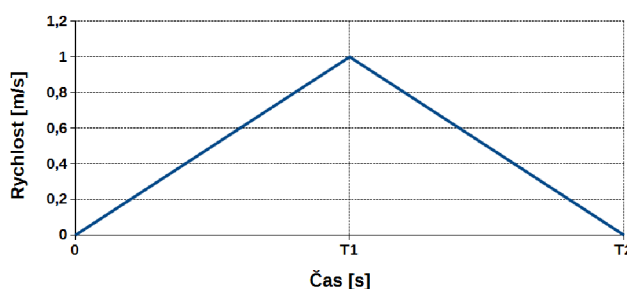
Pro výběr vhodných motorů je nezbytné určit silové zatížení jednotlivých os manipulátoru. Silové zatížení se vyhodnotí konfiguračním softwarem z průběhu rychlostí v čase. Z přejezdových vzdáleností a určených časů uvedených v Tab. 5 se každé ose manipulátoru sestaví diagram průběhu rychlostí, tzv. rychlostní profil.

Časové limity vyhrazené pro jednotlivé přejezdy os manipulátoru jsou vypočítány z kinematické rovnice (2), popisující vzájemné vztahy mezi rychlostí  $v$ , zrychlením  $a$ , dráhou  $s$  a časem  $T$ .

$$T = \frac{v}{a} + \frac{s}{v} \quad (2)$$

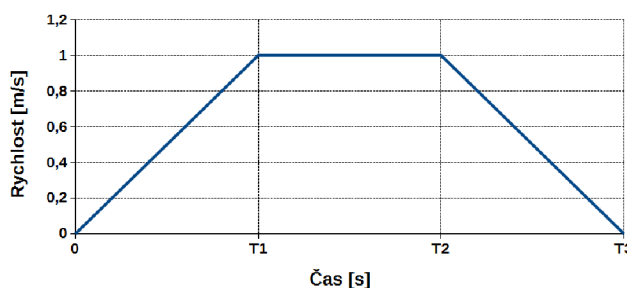
Při sestavování rychlostního profilu je třeba dodržet omezující podmínky pro rychlost a zrychlení. Každý pohyb osy je rozdělen do dvou nebo třech fází, podle toho, zda během rozjezdu zrychleným pohybem dojde k dosažení rychlostního limitu či nikoliv. Pro rozjezd i zastavení se použije stejně velká hodnota zrychlení.

Nejrychlejšího přesunu osy na definované místo se dosáhne pohybem s využitím maximálního zrychlení motoru. Nedojde-li během zrychlujícího pohybu k dosažení rychlostního omezení, graf závislosti rychlosti na čase bude ve tvaru rovnostranného trojúhelníku, viz. Obr. 17.



Obr. 17 Graf závislosti rychlosti na čase bez rychlostního omezení

Dosáhne-li osa během zrychleného pohybu rychlostního maxima, nastane rychlostní omezení. Další pohyb probíhá maximální povolenou rychlostí. Graf závislosti rychlosti na čase, viz. Obr. 18, má vlivem rychlostního omezení lichoběžníkový průběh.



Obr. 18 Graf závislosti rychlosti na čase s rychlostním omezením

Rychlostní profily os manipulátoru budou sestaveny s ohledem na maximální povolenou rychlost a zrychlení. V Tab. 5 popisující pracovní cyklus manipulátoru jsou uvedeny přejezdové vzdálenosti os během jednotlivých kroků. Nejprve je třeba určit, zda během pohybu nastane rychlostní omezení.

V grafu závislosti rychlosti na čase zrychlení udává sklon rychlosti, plocha pod křivkou odpovídá ujeté dráze. Pro rozjezd i zastavení se použije stejně velká hodnota zrychlení lišící se jen znaménkem, při výpočtech se využije symetrie.

Celková dráha žádaného pohybu osy manipulátoru se označí  $s$ . Ujeté dráhy během zrychlujícího a zpomalujícího pohybu se označí  $s_1$ ,  $s_3$  a vypočítají se ze vztahu (3).

$$s_1 = s_3 = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t_{1,3}^2 = \frac{1}{2} \cdot a \cdot \left(\frac{v_{max}}{a}\right)^2 = \frac{v_{max}^2}{2a} \quad (3)$$

Porovnáním velikostí celkové dráhy  $s$  se součtem vzdáleností ujetých během zrychlování a zpomalování vypočteným ze vztahu (4) se určí, zda při pohybu osy nastane rychlostní omezení.

$$s_{13} = s_1 + s_3 \quad (4)$$

Platí-li:  $s < s_{13}$ , maximální povolená rychlost během pohybu není dosažena, průběh rychlosti v čase bude ve tvaru trojúhelníku.

V opačném případě platí:  $s \geq s_{13}$ , během pohybu dojde k rychlostnímu omezení z důvodu dosažení nejvyšší povolené rychlosti. Průběh rychlosti v čase bude ve tvaru lichoběžníku. Dráha rovnoměrného pohybu omezenou rychlostí  $s_2$  se vypočítá ze vztahu (5).

$$s_2 = s - s_{13} \quad (5)$$

K sestavení rychlostního profilu zbývá určit dobu trvání jednotlivých fází pohybu. Opět se využije symetrie, doba trvání zrychleného pohybu  $t_1$  je stejná jako doba zpomaleného pohybu  $t_3$  a vypočte se ze vztahu (6) vyjádřením  $t_{1,3}$  ze vztahu (3).

$$s_1 = s_3 = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t_{1,3}^2 \Rightarrow t_{1,3} = \sqrt{\frac{2 s_{1,3}}{a}} \quad (6)$$

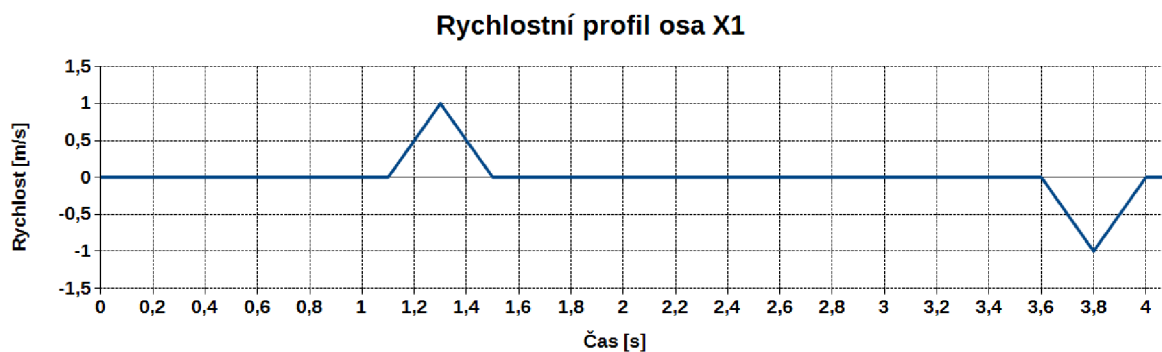
Došlo-li během pohybu osy k dosažení rychlostního omezení  $v_{max}$ , doba pohybu nejvyšší povolenou rychlostí  $t_2$  se vypočítá ze vztahu (7).

$$t_2 = \frac{s_2}{v_{max}} \quad (7)$$

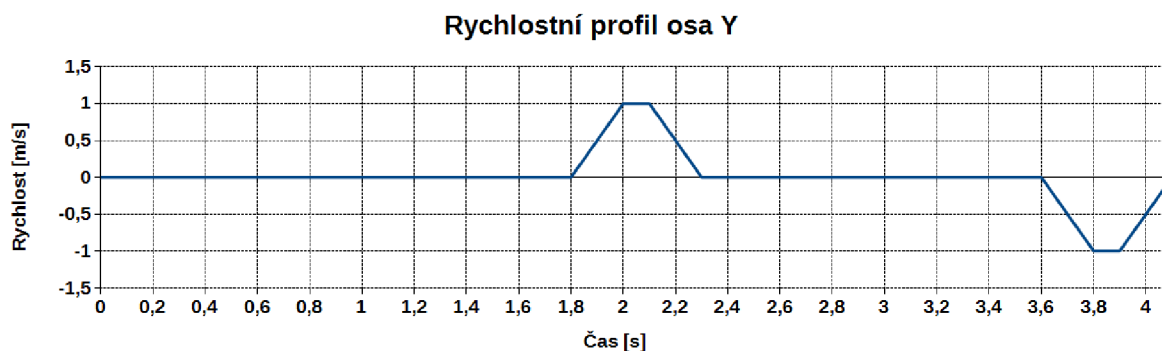
S využitím uvedených vztahů byly jednotlivým osám manipulátoru vypočteny hodnoty potřebné k sestavení průběhů rychlostí v čase. Při pohybu osy  $X_1$  nedojde k rychlostnímu omezení. Rychlost pohybu osy Y a Z bude omezoována z důvodu dosažení rychlostního maxima.

V kroku 10 pracovního cyklu manipulátoru, určeném pro dosažení výchozí pozice, se předpokládá současný pohyb osami  $X_1$  a Y. Obě osy manipulátoru se budou pohybovat současně s maximálním povoleným zrychlením. Osa  $X_1$  dosáhne cílové pozice dříve.

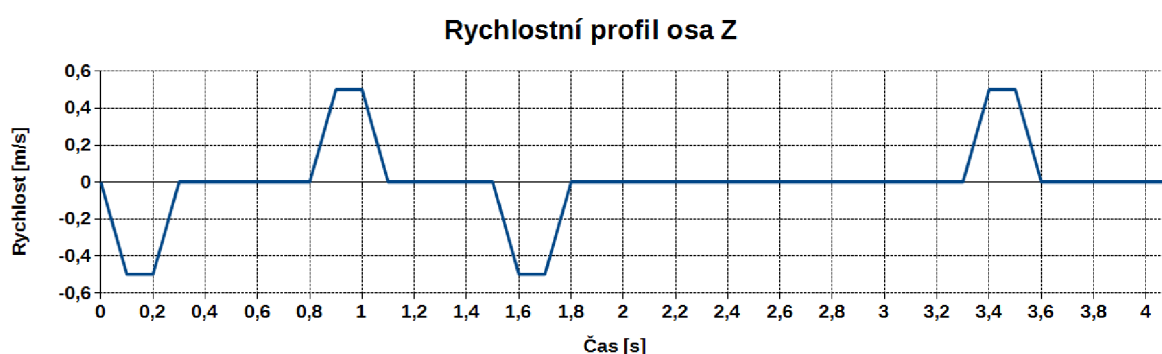
Časové diagramy průběhů rychlostí jednotlivých os manipulátoru jsou na Obr. 19, Obr. 20 a Obr. 21.



Obr. 19 Časový diagram průběhu rychlosti osy  $X_1$



Obr. 20 Časový diagram průběhu rychlosti osy Y



Obr. 21 Časový diagram průběhu rychlosti osy Z

Pro výpočet silového zatížení os manipulátoru je třeba kromě průběhu rychlostí v čase znát i hmotnostní zatížení. V Tab. 6 jsou uvedeny předpokládané hmotnosti pohybujících se zátěží.

Tab. 6 Hmotnostní zatížení os manipulátoru

osa	X <sub>1</sub>	Y	Z
hmotnost[kg]	25	12	5

Výpočet silového zatížení jednotlivých os manipulátoru, určení požadovaných parametrů motorů i vlastní výběr bude proveden pomocí konfiguračního softwaru firmy Hiwin.

### Návrh řešení s lineárními motory

Navrhované řešení s lineárními motory vychází z použití komponentů firmy Hiwin, patřící mezi přední světové výrobce lineární techniky. V nabídce se nachází jednoosé systémy, křížové stoly nebo portálové systémy. Firma Hiwin dodává i víceosé systémy konstruované přímo podle požadavků zákazníka.

Z důvodu mechanické konstrukce byly k pohánění os manipulátoru vybrány třífázové synchronní lineární motory s permanentními magnety typové řady LMS. Lineární motory LMS jsou vhodné pro aplikace se středním zatížením. Mohou být kombinovány do různých provedení Gantry systémů. Sekundární část lineárního motoru obsahující permanentní magnety se vyrábí v několika délkových modifikacích. Vhodnou kombinací lze přizpůsobit délku magnetické dráhy. Lineární motory LMS jsou chlazeny okolním vzduchem. Používají se pro balicí a řezací stroje, ploty a manipulátory.

Pro zvýšení tuhosti a zlepšení polohování bude osa  $X_1$  navržena v Gantry provedení, bude tvořena dvěma lineárními motory, vyžádá si náročnější řízení. Spojením obou pohyblivých částí osy  $X_1$  se vytvoří osa Y.

Do konfiguračního softwaru firmy Hiwin byly pro každou osu manipulátoru zadány průběhy rychlostí v čase spolu s hmotnostním zatížením. Ze zadaných údajů bylo vypočteno silové zatížení jednotlivých os manipulátoru.

K pohonu všech os manipulátoru byly shodně vybrány lineární motory LMS13. Vybrané lineární motory jsou nejméně výkonné z dané řady, jejich technické parametry jsou uvedeny v Tab. 7. Pohon osy  $X_1$  je tvořen dvěma lineárními motory, proto parametry dosahují vyšších hodnot.

Tab. 7 Technické parametry motorů LMS13

osa	typ motoru	špičková síla $F_{MAX}$ [N]	jmenovitá síla $F_{CONT}$ [N]	špičkový proud $I_{MAX}$ [A]	jmenovitý proud $I_C$ [A]
$X_1$	2x LMS13	1082	361	24,6	8,2
Y, Z	LMS13	541	180	12,3	4,1

Vybraným motorům konfigurační software vypočítal parametry potřebné k dosažení požadovaného pracovního cyklu v zadaném čase, viz. Tab. 8. Ve vypočtených parametrech je zohledněna i vlastní hmotnost lineárních motorů.

Všechny motory splňují požadovaná kritéria s dostatečnou výkonovou rezervou.

Tab. 8 Požadované parametry jednotlivých pohonů

	$X_1$	Y	Z
špičková síla $F_{MAX}$ [N]	215	108	120
jmenovitá síla $F_{CONT}$ [N]	67	41	35
špičkový proud $I_P$ [A]	4,88	2,46	2,73
jmenovitý proud $I_C$ [A]	1,52	0,93	0,8
maximální rychlost $v_{MAX}$ [m.s <sup>-1</sup> ]	1	1	0,5
maximální zrychlení $a_{MAX}$ [m.s <sup>-2</sup> ]	7,5	7,85	7,85
zrychlení $a$ [m.s <sup>-2</sup> ]	5,38	5,16	4,78
výkonová rezerva [%]	81	77	80

## 4.2 Odměrování polohy os manipulátoru

Řídicí systém využívá odměrování polohy pohyblivé části lineární jednotky k získávání informací o poloze, rychlosti a zrychlení. Okamžitá rychlost pohybující se osy je vyhodnocována derivací aktuální polohy, okamžité zrychlení odpovídá druhé derivaci. Na kvalitě odměrování polohy závisí rychlost a přesnost polohování celého pohonu.

K odměrování polohy posuvné jednotky se používá přímé lineární odměrování nebo nepřímé odměrování. Přímé odměrování snímá skutečnou polohu pohybující se osy vůči pevné části stroje. Nepřímé odměrování je založeno na převodu posuvného pohybu na rotační. Skutečná poloha osy se získává přepočtem úhlu natočení pohybového mechanismu měřeného rotačním snímačem. Rotační snímač se spojuje s hřídelí kuličkového šroubu nebo bývá integrován přímo do motoru. Nepřímé odměrování nevyžaduje žádné přídavné prvky, proto je konstrukčně jednodušší a levnější. Používá se v aplikacích s krátkými zdvihy nebo při nižších nárocích na přesnost polohování. Přesnost polohování negativně ovlivňují vůle mechanických převodů a teplotní roztažnost pohybových mechanismů. [15]

Důležitým parametrem snímače lineárního odměrování je rozlišení. Nejkratší délkový úsek, který je snímač schopen vyhodnotit, se nazývá rozlišení neboli inkrement.

Snímače odměrování polohy se dále dělí na inkrementální a absolutní. Při měření polohy inkrementálním snímačem je nutné po každém zapnutí napájení načíst aktuální polohu osy. Proces se nazývá referování, spočívá v přejetí osy přes referenční značku se známou souřadnicí. Moderní inkrementální snímače rozlišují i směr pohybu odkud byl referenční bod dosažen. Při vypnutí napájení řídicího systému nebo inkrementálního snímače dojde ke ztrátě informace o poloze. [15]

Výstupem inkrementálního snímače jsou impulzy odpovídající ujeté vzdálenosti, jejich přičítáním nebo odčítáním se vyhodnocuje výsledná poloha osy. Výstupní signály inkrementálních snímačů jsou sinusového nebo obdélníkového průběhu a jsou fázově posunuty o 90°. Sinusové signály mohou být interpolovány, čímž se zjemní krok měření a dosáhne se vyšší přesnosti. [15]

Absolutní snímače si informaci o aktuální poloze uchovávají i ve vypnutém stavu. Řídicí systém obdrží z absolutního snímače informaci o aktuální poloze ihned po zapnutí napájení.

Rozdíl mezi inkrementálním a absolutním odměrováním je jen v okamžiku po zapnutí napájení při určování aktuální polohy osy. Během provozu se skutečná poloha osy vyhodnocuje u obou typů odměrování shodně z počtu impulzů, proto je rychlost vyhodnocování polohy je u inkrementálních i absolutních snímačů stejná.

### Návrh odměrování polohy osy s lineárním motorem

K určování polohy osy lineárního motoru se nejčastěji používá přímé odměrování, využívající lineární snímače pracující na magnetickém nebo optickém principu. Součástí snímače je pásek s rastrem, kvůli němuž se snímači také říká odměrovací pravítko. Předností lineárních snímačů je jednoduchá instalace a nízké nároky na údržbu. Během provozu zařízení nedochází ke kontaktu mezi snímací hlavou a pravítkem.

Magnetické snímače jsou tvořeny snímací hlavou s Hallovými sondami, pod níž se pohybuje polarizovaný magnetický pásek odpovídající délky vytvářející magnetickou mřížku. Vzdálenost polarizovaných pólů na magnetickém pásku udává délku periody.

Optické snímače používají k odměrování polohy ocelové nebo skleněné pásky. Rastr na ocelovém pásku je tvořen ryskami odrážejícími světelné záření a mezerami pohlcujícími světelné záření. Vyhodnocení polohy je založeno na změně osvětlení měřících senzorů při vzájemném pohybu snímací hlavy a pravítka. Princip měření se nazývá reflexní. [15]

Je-li nositelem rastru skleněný pásek, princip měření se označuje jako transparentní. Mřížka je vytvořena odleptáním napařené neprůhledné vrstvy. Rysky rastru nepropouští světlo, mezery světlo naopak propouští. Rozteče rysek jsou 0,01 nebo 0,02mm. Snímací hlava optického snímače obsahuje zdroj světla a optickou soustavu s fotosenzory. Fotosenzory vyhodnocují průchozí světelný signál vznikající při vzájemném pohybu snímací hlavy a pravítka. [15]

Odměřovací pásy s rastrem se umísťují přímo do lineárního vedení nebo samostatně. Z důvodu možného křížení osy je vhodné umístit snímač co nejbližší poháněcímu prvku. Při kombinaci magnetického odměřování s lineárním motorem je třeba dbát na vhodné umístění, aby nedocházelo k ovlivňování měření magnetickým polem lineárního motoru.

### Výběr vhodného snímače pro odměřování polohy osy s lineárním motorem

Optické odměřování polohy je přesnější než magnetické. Magnetické odměřování je odolnější vůči vlivu nečistot, které lze v pracovním prostoru navrhovaného zařízení očekávat. Magnetické odměřování je cenově výhodnější. K odměřování poloh jednotlivých os manipulátoru se použije přímý odměřovací systém firmy Hiwin založený na magnetickém principu.

Firma Hiwin dodává snímací hlavy ve dvou provedeních. První variantou je snímací hlava s analogovým výstupem tvořeným dvěma sinusovými signály vzájemně posunutými o  $90^\circ$ , označovaná Sin-cos 1Vpp. Druhou variantou je snímací hlava s digitálním výstupem obdélníkového průběhu, označovaná TTL. Rozlišení snímací hlavy Sin-cos 1Vpp závisí na rozlišení AD převodníku. Rozlišení snímací hlavy TTL je 0,001mm. [3]

Technické parametry snímacích hlavic jsou uvedeny v Tab. 9. Přesnost magnetického pásku je 0,02mm/m, perioda je 1mm. [3]

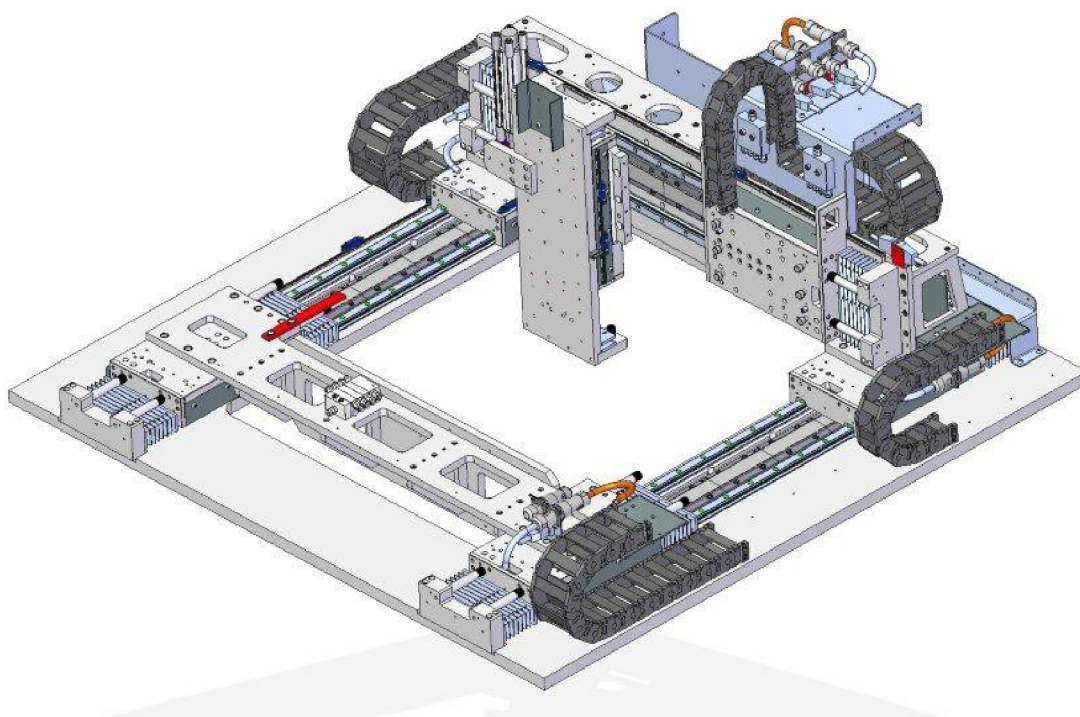
Opakovatelnost a rychlost měření jsou nejvýznamnější parametry snímačů odměřování polohy. Požadavkem je opakovaně polohovat osy manipulátoru s přesností 0,01mm při rychlosti  $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Tab. 9 Technické parametry snímacích hlavic [3]

	Analogový Sin-cos 1Vpp	Digitální TTL
výstupní signál:	sin/cos 1Vpp (0,85 - 1,2V)	5V/TTL/RS422
rozlišení:	podle AD převodníku	0,001mm
nulová značka:	po 1mm	po 1mm
fázový úhel:	$90^\circ \pm 0,1^\circ$	$90^\circ$
obousměrná opakovatelnost:	0,01mm	0,01mm
maximální měřicí rychlost:	$10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
napájecí napětí:	5V $\pm 5\%$	5V $\pm 5\%$

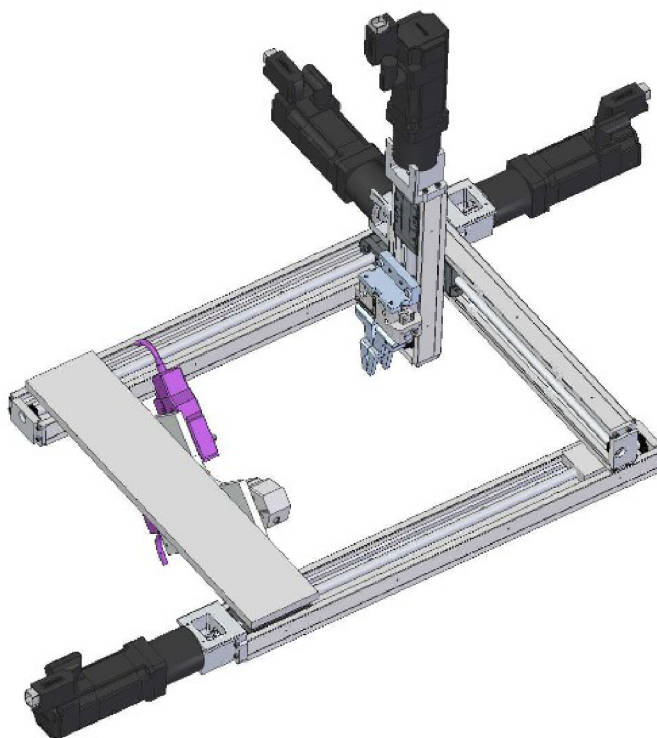
K odměřování poloh jednotlivých os manipulátoru se použije magnetický odměřovací systém s analogovým signálem Sin-cos 1Vpp a třetí stopou pro obdélníkový signál nulové značky s periodou 1mm. Snímací hlavice budou umístěny na pohyblivých částech zařízení, odměřovací pravítka na pevných částech jednotlivých os manipulátoru.





*Obr. 22 Návrh řešení pohonů s lineárními motory Hiwin*

Navržené řešení s lineárními motory Hiwin bylo zasláno do firmy Festo kvůli zpracování konkurenční nabídky obsahující pohony s kuličkovými šrouby.



*Obr. 23 Návrh řešení pohonů s kuličkovými šrouby Festo*

### Výběr vhodného řešení pohonů os manipulátoru

Požadavkem zadavatelské firmy je použití k pohonu os manipulátoru lineární jednotky jednotného typu. Z ekonomického hlediska není zásadní rozdíl mezi řešením s lineárními motory Hiwin nebo kuličkovými šrouby Festo.

Kuličkový šroub, na rozdíl od lineárního motoru, obsahuje mechanický převod v němž vznikají vůle snižující přesnost polohování. Přesnost polohování se dále snižuje i vlivem teplotní roztažnosti.

Přesnost polohování lineárního motoru s magnetickým odměřováním je 0,01mm. Přesnost polohování pohonu s kuličkovým šroubem a nepřímým odměřováním je 0,02mm. Zvýšení přesnosti polohování kuličkového šroubu na 0,01mm vyžaduje použití přímé odměřování.

Důležitými parametry pro výběr vhodného řešení jsou provozní náklady a životnost zařízení. Průměrná životnost kuličkového šroubu se odhaduje na 25 000 provozních hodin. V nepřetržitém provozu je nutno počítat s výměnou kuličkových šroubů a ložisek nejpозději každé čtyři roky. Naproti tomu použití lineárních motorů provozní náklady šetří.

Z uvedených důvodů se k pohonu os manipulátoru použijí lineární motory.

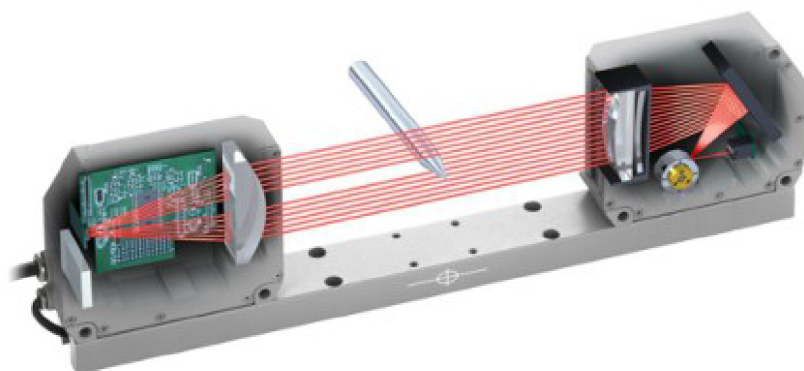


*Obr. 24 Pohony s lineárními motory Hiwin*

### 4.3 Snímání polohy průřezu tyčového polotovaru

V současné době je bezkontaktní měření polohy a rozměrů součástí častou automatizační úlohou. V těchto aplikacích nacházejí široké uplatnění optické mikrometry. Měření optickým mikrometrem patří mezi bezkontaktní metody měření. Výhodou je možnost měřit stojící nebo pohybující se objekt, přičemž nedochází ke kontaktu měřeného objektu se snímačem. Měřicí metoda založená na optice je spojena i s určitými nevýhodami, mezi které patří ochrana optických ploch přístroje před dosedajícím prachem a jinými nečistotami. Při čištění sklíček snímače hrozí jejich poškrábání. Usazování prachu lze částečně ovlivnit vhodným umístěním snímače.

Skupina velmi přesných měřicích přístrojů souhrnně nazývaných optické mikrometry v sobě zahrnuje měřicí zařízení lišící se konstrukcí i způsobem měření. Princip měření optického mikrometru je zřejmý z Obr. 25. Vysílač vyzařuje do přijímače svazek kolimovaných paprsků. Po vložení kontrolovaného předmětu do měřicího prostoru snímače dojde k zastínění části paprskového svazku detekovaného přijímačem.



Obr. 25 Optický mikrometr [5]

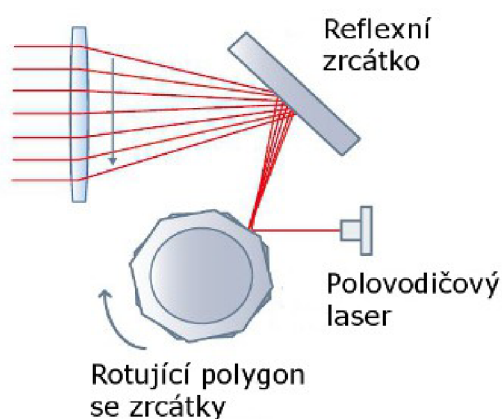
K vyhodnocení polohy nebo rozměru používají optické mikrometry dva typy přijímačů. První využívá k měření fotodiodu, na niž je pomocí čočky směřován dopadající paprsek. Množství světla dopadajícího na fotodiodu odpovídá rozměru a poloze kontrolovaného předmětu. Druhý typ přijímače využívá k měření řádkový CCD-CMOS snímač. [6]

Výhodou přijímače s fotodiodou je jednodušší konstrukce, umožňující podstatně rychlejší měření, přibližně 100kHz. Předností přijímače s řádkovým CCD-CMOS snímačem je vyšší přesnost, navíc jej lze pomocí módů přizpůsobovat konkrétnímu požadavku, například k měření průměru, mezery, pozice hrany a podobně. Přijímač s fotodiodou tuto možnost nemá. [6]

Optické mikrometry se liší i konstrukcí vysílače, respektive zdrojem vyzařovaného světla. Ve vysílačích optických mikrometrů nacházejí uplatnění laserové diody nebo obyčejné LED diody. Vysílače optických mikrometrů s fotodiodovými přijímači používají laserové diody. Přijímače s řádkovými CCD-CMOS snímači používají ve vysílačích laserové i obyčejné LED diody, podle principu vyzařování světelného paprsku se dělí na laserové, skenovací a LED. [6]

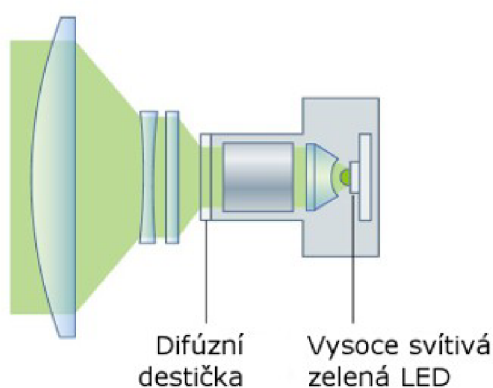
Optické mikrometry využívající ve svých vysílačích laserové diody jsou konstrukčně mnohem jednodušší než vysílače s LED diodami. Nevýhodou laserového mikrometru je vyzařovaný laserový paprsek představující nebezpečí pro oči. Frekvence měření je přibližně 2kHz. [6]

Další skupinou jsou skenovací mikrometry pracující na principu skenování laserového paprsku rozmítaného rotujícím polygonem se zrcátky, viz. Obr. 26. Předností laserových skenovacích mikrometrů je velký měřicí rozsah převyšující ostatní typy snímačů. Nevýhodou je složitá konstrukce vysílače s pohyblivými částmi. Přítomnost pohyblivých částí negativním způsobem ovlivňuje rychlost i přesnost měření. Z důvodu zvýšení přesnosti se používá průměrování vysokého počtu měřených hodnot. To se projevuje podstatným snížením měřicí rychlosti oproti běžným laserovým nebo LED diodovým mikrometrům. [6]



Obr. 26 Vysílač laserového skenovacího mikrometru [5]

Vysílače i přijímače LED diodových optických mikrometrů jsou tvořeny složitou soustavou optických prvků. Na rozdíl od laserových mikrometrů jsou přesnější, avšak podstatně konstrukčně složitější a dražší. Neobsahují žádné pohyblivé části. Absence pohyblivých částí prodlužuje životnost snímače, zvyšuje přesnost a umožňuje rychlejší měření. Na Obr. 27 je konstrukce vysílače LED diodového mikrometru. [6]



Obr. 27 Vysílač LED diodového mikrometru [5]

### 4.3.1 Kritéria pro výběr snímače

Na trhu existuje mnoho snímačů vyhodnocujících polohu a rozměry objektů. Měřicí přístroje se od sebe liší i použitou technologií odměřování. Ve specifikacích snímačů se uvádí různé parametry, například měřicí rozsah, rozlišení, přesnost, opakovatelnost, linearita, rychlost, vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem, použité napájení, výstupní a komunikační rozhraní.

Měřicí rozsah definuje pracovní prostor senzoru, ve kterém se musí nacházet měřená součást, aby byly dodrženy ostatní uvedené parametry snímače – přesnost, opakovatelnost, linearita. U některých typů mikrometrů se navíc předepisuje vzdálenost měřeného objektu od přijímače.

Rozlišení snímače udává nejmenší možnou změnu měřené veličiny, kterou je senzor schopen rozeznat.

Přesnost snímače je maximální rozdíl mezi změřenou a pravou hodnotou měřené veličiny.

Opakovatelnost určuje největší odchylku mezi měřenými hodnotami při vícenásobném měření stejného objektu za stejných podmínek.

Linearita snímače uvádí maximální odchylku měřené hodnoty od pomyslné úsečky spojující nulový bod měřicího rozsahu s koncovým bodem měřicího rozsahu.

Důležitým krokem při výběru vhodného snímače je správná volba významných parametrů. Podstatnou roli při výběru hraje samozřejmě cena.

Z důvodu požadavku na vysokou přesnost měření se z výběru vyloučí měřicí přístroje obsahující přijímače s fotodiodou. Zmiňované snímače nevyhovují ani z důvodu absence přízpusobovacího módu.

Dalším omezením okruhu vhodných měřicích přístrojů je mechanická konstrukce vysílače světelného paprsku. Kvůli delší životnosti snímače se bude vybírat mezi systémy neobsahujícími pohyblivé součásti. Absence pohyblivých prvků sníží nároky na servis, údržbu a kalibraci. Nevýhodou měřicích přístrojů obsahujících rotační součásti je i nižší vzorkovací frekvence.

Pro navrhovanou aplikaci se vyberou dva shodné optické mikrometry ze skupiny měřicích přístrojů používajících CCD-CMOS technologii. Zdroj světelného záření vysílače bude využívat laser nebo LED technologii. Vzájemným pootočením mikrometrů o 90° vznikne v průsečíku jejich pracovních prostorů dvourozměrné měřicí pole.

Z důvodu snadného připojení měřicího řetězce k řídicímu systému stroje bude vhodné použít měřicí systém vybavený průmyslovou komunikační sběrnici Profinet. Použitím jednotné komunikační sběrnice v celém zařízení se zajistí časová úspora při vývoji a oživování stroje. V případě komunikace po jiné sběrnici bude nutné rozšířit řídicí systém stroje o příslušný komunikační modul.

### 4.3.2 Snímače vhodné pro měření průhybu

#### Optocontrol 2500-35

Optický mikrometr, viz. Obr. 28, pracuje na bázi laseru snímaného CCD kamerou. Jde o bezkontaktní laserový systém s vysokým rozlišením, vysokou vzorkovací frekvencí a vynikající přesností. Pomocí módů lze snímač přizpůsobovat konkrétním požadavkům, například měřit rozměr, šířku mezery, pozici hrany. Zkřížením dvou snímačů lze vytvořit dvourozměrné měřicí pole. Naměřená data lze ze snímače získat buď analogově nebo digitálně. Konstrukce měřicího přístroje neobsahuje žádné pohyblivé části. [10]

Díky svým vlastnostem optický mikrometr nachází uplatnění ve výrobních linkách při přesném měření nebo kontrole pohybujících se výrobků.

Výrobce snímače je firma Micro-Epsilon.



Obr. 28 Laserový mikrometr Optocontrol 2500-35 [10]

#### Optocontrol 2600-40

Na rozdíl od mikrometrů řady 2500 používají mikrometry řady 2600 místo laseru LED technologii. Optocontrol 2600-40 je měřicí systém vybavený integrovanou CCD kamerou s vysokým rozlišením a vynikajícími vlastnostmi pro měření geometrických veličin. [10]

Měřicí přístroj je vybaven speciálně uspořádanými optickými čočkami, světelný zdroj vysílá viditelné červené světlo. Technologie LED spolu s absencí mechanických konstrukčních prvků zajišťují neobyčejně dlouhou životnost snímače. [10]

Výrobce měřicího přístroje je firma Micro-Epsilon.

#### LS-9030

Optický mikrometr LS-9030, viz. Obr. 29, využívá zdroj světla obsahující zelenou vysoce svítivou LED diodu. Vyniká přesností, stabilitou, rychlostí a snadností použití. Vysoká vzorkovací frekvence 16kHz je dosažena zásluhou inovovaného optického systému spočívajícího v integraci obvodů zpracovávajících signály ze senzorů CMOS do jediného čipu. [5]

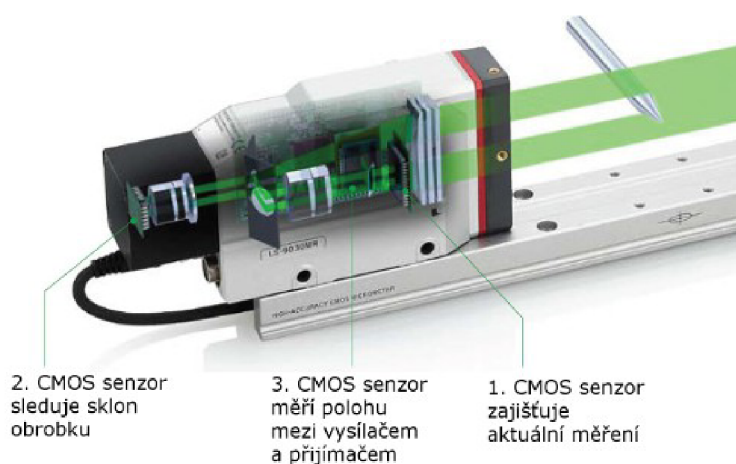
Použitá zelená vysoce svítivá LED dioda vyzařuje vysoce intenzivní kolimovaný paprsek světla v úzkém pásmu kmitočtů. Na rozdíl od běžných systémů vyzářený paprsek nepodléhá degradaci. Životnost použité diody je podstatně vyšší než životnost klasické LED diody. [5]



*Obr. 29 Optický mikrometr LS-9030 [5]*

Optický mikrometr LS-9030 obsahuje v přijímací části tři CMOS senzory podílející se na měření. První CMOS senzor zajišťuje aktuální měření. Úkolem druhého CMOS senzoru je kompenzovat chyby vzniklé při měření šikmého nebo nakloněného objektu. Vychýlení měřeného objektu může být způsobeno například vlivem silných vibrací. Pro zvýšení přesnosti a opakovatelnosti měření je optický snímač vybaven speciální funkcí umožňující přizpůsobovat ohniskovou rovinu. Z tohoto důvodu je přijímač opatřen třetím CMOS senzorem zajišťujícím detekci měřených objektů umístěných do prostoru mezi vysílačem a přijímačem. Na Obr. 30 je přijímací část optického mikrometru s rozmístěním CMOS senzorů. Snímač neobsahuje žádné pohyblivé části. [5]

Výrobce měřicího přístroje je firma Keyence.



*Obr. 30 Přijímací část snímače LS-9030 [5]*

Kombinací dvou snímačů LS-9030 vzájemně pootočených o 90° se v průsečíku jejich pracovních prostorů vytvoří dvourozměrné měřicí pole. Přímou pro tento účel firma Keyence nabízí dvouosý snímač s označením LS-9030D, viz. Obr. 31. V jednom pouzdře jsou integrovány dva na sebe kolmé mikrometry LS-9030 tvořící kompaktní celek.

Cena dvouosého snímače LS-9030D odpovídá ceně dvou snímačů LS-9030.



*Obr. 31 Snímač LS-9030D [5]*

Pro navrhované zařízení je však optický snímač LS-9030D nevhodný z důvodu absence volných prostorů mezi měřicími hlavami. S přihlédnutím k co nejkratšímu času cyklu stroje je výhodnější zkombinovat dva samostatné mikrometry umožňující využívat volné prostory k průchodu testovaných polotovarů.



V Tab. 10 je přehled technických parametrů i cen vybraných snímačů. Optické mikrometry firmy Micro-Epsilon jsou standardně dodávány společně s externí řídicí jednotkou. V ceně optického mikrometru uvedeného výrobce je tedy zahrnuta i cena řídicí jednotky.

Řídicí jednotky neboli kontroléry jsou určeny k připojení snímačů, jejich parametrizaci, ovládání a zobrazování naměřených hodnot. Kvůli komunikaci s dalšími zařízeními, například s řídicími systémy strojů, bývají vybaveny analogovým nebo digitálním rozhraním.

Tab. 10 Přehled technických parametrů vybraných snímačů

Typ:	Optocontrol 2500-35	Optocontrol 2600-40	LS-9030
Výrobce:	MICRO-EPSILON	MICRO-EPSILON	KEYENCE
Měřicí rozsah [mm]:	34	40	30
Nejmenší detek. objekt [mm]:	0,3	0,3	0,3
Opakovatelnost [ $\mu$ m]:	3	1	2
Rozlišení [ $\mu$ m]:	1	0,1	0,1
Vzorkování [kHz]:	2,3	2,3	16
Vzdálen. vysílač-přijímač [mm]:	150 - 700	250 - 350	120-200
Vzdálenost cíl-přijímač [mm]:	20 - 150	145 - 155	-
Výstup – analogový:	0 ... 10V -10V ... +10V	0 ... 10V -10V ... +10V	dle použité řídicí jednotky
– digitální:	RS232, RS422	RS232, RS422	
Napájení [V]:	24	24	24
Krytí – vysílač, přijímač:	IP64	IP64	IP67
– řídicí jednotka:	IP40	IP40	-
Světelný zdroj:	Laser.dioda, třída 1	LED červená	LED zelená

### Řídicí jednotka LS-9501P

Měřicí sestavu obsahující snímač LS-9030 firmy Keyence je třeba doplnit řídicí jednotkou LS-9501P, viz. Obr. 32. Cena je 67 660Kč. K řídicí jednotce je možno připojit dva snímače LS-9030.

Řídicí jednotka je vybavena rozhraním Ethernet, USB, RS-232. Dále je možné připojit zobrazovací panel LS-D1000 určený k parametrování a zobrazování změřených hodnot až čtyř snímačů. V naší aplikaci však uvedený zobrazovací panel nevyužijeme.

Řídicí jednotka je vybavena digitálními vstupy pro ovládání binárními signály a digitálními výstupy určenými pro vyhodnocení výsledku měření. Hodnoty změřené veličiny lze z řídicí jednotky získat i pomocí analogových výstupů, buď napětově v rozsahu  $\pm 10V$  nebo proudově v rozsahu 4-20mA. Pro každý snímač je vyhrazen jeden kanál.



Obr. 32 Řídicí jednotka LS-9501P [5]

Navrhované zařízení bude řízeno systémem Simotion vybaveným průmyslovou komunikační sběrnicí Profinet. V případě použití měřicího řetězce Keyence by se řídicí jednotka LS-9501P dovybavila komunikačním modulem CB-PN100, jehož cena je 17 010Kč.

### Řídicí jednotka CSP 2008

Řídicí jednotky standardně dodávané s optickými mikrometry Micro-Epsilon slouží pouze pro základní ovládání mikrometrů. Naměřené hodnoty lze získat z analogových nebo digitálních výstupů. Řídicí jednotky jsou vybaveny displejem pro zobrazení změřených veličin.

Dle doporučení technické podpory Micro-Epsilon by bylo vhodné při použití dvou snímačů, vytvářejících dvourozměrné měřicí pole, doplnit měřicí řetězec o univerzální řídicí jednotku CSP 2008, viz. Obr. 33 . Uvedená řídicí jednotka umožňuje synchronizaci snímačů. Cena je 35 661Kč.

Univerzální řídicí jednotkou CSP 2008 lze obsluhovat až šest snímačů. Do řídicí jednotky se mohou přímo připojit dva snímače, zbývající čtyři snímače se připojují pomocí rozšiřujícího modulu. [10]

Univerzální řídicí jednotka CSP 2008 poskytuje rozsáhlé aritmetické možnosti přepočítávání signálů. Je vhodná například pro měření tloušťky, rovinnosti a podobně. Řídicí jednotka je vybavena sběrnicovým systémem Ethercat, pracuje v reálném čase. [10]



Obr. 33 Univerzální řídicí jednotka CSP 2008 [10]

### 4.3.3 Výběr snímače pro měření průhybu

V navrhované aplikaci se použijí dva optické mikrometry, jejichž sestavením do kříže vznikne dvourozměrné měřicí pole. V tabulkách níže jsou uvedeny ceny jednotlivých měřicích řetězců. Ceny nezahrnují propojovací kabeláž mezi řídicími jednotkami a snímači, dále není započtena cena parametrizačního softwaru.

Tab. 11 Celkové náklady za měřicí řetězec se snímačem Optocontrol 2500-35

Výrobce: Micro-Epsilon	Cena za 1 kus [Kč]	Počet kusů	Cena [Kč]
Optický snímač: Optocontrol 2500-35	122 612	2	245 224
Řídicí jednotka: CSP 2008	35 661	1	35 661
			Celková cena: 280 885Kč

Tab. 12 Celkové náklady za měřicí řetězec se snímačem Optocontrol 2600-40

Výrobce: Micro-Epsilon	Cena za 1 kus [Kč]	Počet kusů	Cena [Kč]
Optický snímač: Optocontrol 2600-40	184 240	2	368 480
Řídicí jednotka: CSP 2008	35 661	1	35 661
			Celková cena: 404 141Kč

Tab. 13 Celkové náklady za měřicí řetězec se snímačem LS-9030

Výrobce: Keyence	Cena za 1 kus [Kč]	Počet kusů	Cena [Kč]
Optický snímač: LS-9030	94 720	2	189 440
Řídicí jednotka: LS-9501P	67 660	1	67 660
Komunikační modul: CB-PN100	17 010	1	17 010
			Celková cena: 274 110Kč

Měřicí systémy Micro-Epsilon jsou vybaveny komunikačním rozhraním Ethercat. Řídicí systém Simotion by se musel rozšířit o komunikační modul s uvedeným rozhraním. Další variantou měřicího systému Micro-Epsilon by bylo řešení pouze s využitím standardně dodávaných kontrolérů. Průběh měření by byl řízen binárními signály. Změřené hodnoty by byly do řídicího systému posílány analogově případně po sběrnici RS232 nebo RS422. Ve všech uvedených případech by bylo nutné doplnit řídicí systém o jednotky analogových vstupů nebo příslušné komunikační rozhraní. Nevýhodou uvedeného řešení je komplikovanější zapojení a nižší komfort ovládání měřicího řetězce. Za hlavní nevýhody považují celkové zpomalení měřicího procesu a náchylnost systému na vznik poruchy.

Výhodou měřicího řetězce Keyence je přítomnost komunikačního rozhraní Profinet umožňující přímé připojení k řídicímu systému navrhovaného stroje. Řešení s použitím optických mikrometrů Keyence vychází i cenově nejvýhodněji. Na rozdíl od řešení se snímači Micro-Epsilon není nutné rozšiřovat řídicí systém o další moduly a tím navyšovat cenu stroje. Z uvedených důvodů se v navrhovaném zařízení použije měřicí řetězec Keyence.



## 5 ŘÍZENÍ JEDNOÚČELOVÉHO STROJE

### 5.1 Řídicí systém

Technická směrnice zadavatele nařizuje používat k řízení strojů komponenty firmy Siemens. Řídicí systémy uvedeného výrobce jsou v praxi velmi rozšířené. Rozhodnutí používat řídicí systémy jednoho výrobce souvisí se snahou minimalizovat dobu výpadku výroby kvůli odstávce zařízení při poruše.

Pracovníci místní údržby jsou vyškoleni i vybaveni potřebným zařízením k diagnostice řídicích systémů jmenovaného výrobce. Jednotlivé komponenty použitých řídicích systémů zadavatelská firma drží skladem. V případě závady na řídicím systému je k dispozici náhradní díl.

#### 5.1.1 Simotion

K řízení jednoúčelového stroje se použije řídicí systém Simotion. Simotion poskytuje jednotné systémové řešení speciálně navržené pro řízení strojů vyžadujících motion control funkce.

Řídicí systém Simotion v sobě spojuje tři hlavní části. Pro řízení logických funkcí je vybaven integrovaným PLC. Řízení pohybu os, synchronizaci a polohování zajišťují motion control funkce. Technologické funkce jsou určeny pro regulaci tlaku, teploty a podobně. [12]

Simotion je multitaskový systém. Na pozadí běží cyklicky zpracovávaný Backgroundtask, v němž se stejně jako v klasickém PLC zpracovávají logické podprogramy a sekvence. K řízení pohybů jsou určeny další tasky spouštěné, pozastavované a ukončované na základě času nebo události. [12]

Hardwarové provedení řídicího systému Simotion je nabízeno ve třech variantách. Označení vychází z názvu platform: C - Controller, P - PC, D - Drive. Program vytvořený pro řídicí systém Simotion je přenositelný mezi jednotlivými platformami. [12]

Řídicí systém Simotion je vybaven sběrnici MPI určenou ke komunikaci s libovolným ovládacím panelem nebo multipanem řady SIMATIC HMI. Sběrnice Profibus nebo Profinet je určena k řízení pohonů. [12]

#### Simotion C

Modulární varianta v provedení SIMATIC S7-300. Je vhodná pro aplikace s mnoha centrálními vstupy a výstupy, pro něž se využívají běžné vstupní a výstupní karty řídicího systému SIMATIC S7-300. [12]

#### Simotion P

Otevřená varianta průmyslového PC. Kromě aplikace Simotion mohou na výkonném PC běžet i jiné programy s vysokými nároky na výpočetní výkon. Vstupy a výstupy se připojují přes decentrální periferie SIMATIC ET 200. [12]

#### Simotion D

Kompaktní varianta integrovaná do pohonu jejíž výhodou jsou velké prostorové úspory v rozváděči. Nahrazuje řídicí jednotku víceosého frekvenčního měniče SINAMICS S120. Kombinovaný modul je složen z jádra SIMOTION a druhého procesoru přebírajícího funkci řídicí jednotky frekvenčního měniče SINAMICS S120. [12]

Řídicí systém Simotion je nabízen v několika výkonových řadách vybavených komunikační sběrnici Profibus nebo Profinet. Pro jednoosé aplikace je určena modelová řada D410. Pro víceosé aplikace jsou určeny řady: D425 s nejvyšším počtem 16 os, D435 s 32 osami a nejvýkonnější D445 s maximálním počtem 64 os. [12]

Vstupy a výstupy s přímou vazbou na řízené osy měniče SINAMICS S120 jsou připojeny vlastní sběrnici měniče typu Drive CliQ. Vstupy a výstupy nesouvisející s řízením polohy se připojují přes decentralní periferie SIMATIC ET 200. [12]

Vývojovým prostředím určeným pro práci s řídicím systémem Simotion je jednotný inženýrský nástroj Simotion Scout. Ve vývojovém prostředí jsou integrovány nástroje určené k vytváření nového projektu od hardwarové konfigurace, nastavení komunikace, přes parametrizaci pohonů až k tvorbě a editaci vlastního uživatelského programu. Vývojové prostředí Simotion Scout obsahuje i diagnostické a monitorovací funkce používané k ožívování stroje při uvádění do provozu nebo k diagnostice poruchy. [12]

Navrhované zařízení obsahuje čtyři polohovatelné osy, k řízení stroje se použije řídicí systém Simotion řady D425.

### **Komunikační rozhraní Profinet**

Profinet je na výrobci nezávislý komunikační standart založený na průmyslovém Ethernetu. Po síti Profinet může zároveň probíhat standardní komunikace TCP/IP, komunikace pro reálný čas (RT - běžná komunikace při řízení) a izochronní komunikace pro reálný čas (IRT - pro řízení pohonů apod.). [18]

Identifikace vstupních a výstupních zařízení probíhá v Profinetu prostřednictvím jedinečných jmen. Jména umožňují používat označení související s významem nebo umístěním vstupních a výstupních zařízení. Vstupní a výstupní zařízení mohou být adresovány pouze pokud jim bylo přiděleno jméno. [18]

Zařízení v síti Profinet komunikují také pomocí TCP/IP protokolu. Proto musí mít každé zařízení přiřazenou IP adresu. Všechna vstupní a výstupní zařízení musí podporovat přiřazování IP adres pomocí DCP (Discovery and Configuration Protocol). IP adresu přiřadí řídicí jednotka při inicializaci zařízení nebo se může IP adresa přiřadit napevno. Řídicí jednotka potom kontroluje, zda se shoduje jméno zařízení s IP adresou v HW konfiguraci. [18]

Pokud je síť izolovaná od okolních sítí, mohou se použít IP adresy i maska automaticky vygenerovaná v HW Configu vývojového prostředí Step7. Je-li síť připojená k místní síti, je nutné získat IP adresy včetně masky od síťového administrátora.

### **Komunikační rozhraní Drive CliQ**

Drive CliQ je otevřený komunikační protokol firmy Siemens založený na 100Mbit/s Ethernetu. Umožňuje cyklickou komunikaci vysokou rychlostí, při níž jsou vyloučeny kolize nebo ztráty paketů do vzdálenosti 100m. Protokol není vhodný pro bezdrátové komunikace.

Drive CliQ je využíván k vnitřnímu propojení jednotlivých komponent pohonu Sinamics.

#### **5.1.2 Sinamics S120**

Sinamics S120 je modulární nízkonapěťový frekvenční měnič. Umožňuje s vysokou dynamikou polohovat i synchronizovat více motorů. Uvedenými měniči lze řídit motory pomocí klasického PLC Simatic, u obráběcích strojů se používá řídicí systém Sinumerik. V náročných aplikacích typu motion control se s výhodou využívá řídicí systém Simotion.

Součástí sestavy pohonu je i napájecí modul. Převádí střídavé třífázové napětí na stejnosměrné napětí, které napájí motorové moduly. Pohony Sinamics S120 jsou nabízeny se třemi typy napájecích modulů.

Basic line modul vytváří neregulované stejnosměrné napětí. Je určen pro provoz motorů ve dvou kvadrantech, neumožňuje rekuperovat energii. Energií vzniklou při generátorickém provozu je nutno mařit v brzděném odporu. Účinnost napájecího modulu je 99%. [7]

Smart line modul vytváří také neregulované stejnosměrné napětí, umožňuje rekuperovat energii. Modul je vybaven řízením s rychlou reakcí na změny zátěže. Účinnost napájecího modulu je 98,5%. [7]

Active line modul vytváří konstantní regulované napětí a umožňuje rekuperaci. S předřazeným vstupním filtrem je možné dosáhnout odběru proudu ze sítě ve tvaru sinusovky. Napájecí modul je schopen překlenout krátkodobé výpadky i kolísání síťového napětí. Účinnost napájecího modulu je 97,5%. [7]

K řízení pohonu Sinamics S120 slouží řídicí jednotka pohonu Control Unit, označovaná CU. Řídicí jednotka může být samostatná, která komunikuje s řídicím systémem po sběrnici nebo může být integrovaná do řídicího systému, což je případ naší aplikace. Řídicí jednotka pohonu Sinamics S120 je obsažena v použitém řídicím systému Simotion D425. [7]

Motorové moduly jsou nabízeny ve dvou variantách, pro napájení jednoho motoru nebo pro napájení dvou motorů. Cenově je výhodnější používat moduly pro dva motory.

Pro napájení pohonů Sinamics S120 se použije Smart line modul. Navrhované zařízení je vybaveno čtyřmi lineárními motory, které se připojí ke dvěma dvumotorovým modulům 6SL3120-2TE13-0AA0.

### 5.1.3 Decentrální periferie Simatic ET200

Řídicí systém Simotion bude rozšířen o vstupy a výstupy pomocí decentrální periferní jednotky Simatic ET200. Distribuované systémy Simatic ET200 jsou vhodné k použití v místních i vzdálených rozváděcích nebo přímo k umístění na stroji. [16]

Decentrální jednotky Simatic ET200 se k řídicímu systému připojují pomocí komunikačních modulů, označovaných IM, vybavených potřebným komunikačním rozhraním. [16]

Pro navrhované zařízení je možné použít decentrální periferní jednotky řady ET200M nebo ET200S. Periferní jednotky ET200M jsou vyráběny v designu klasických modulů řídicího systému Simatic S7-300. Periferní jednotky ET200S se umísťují na DIN lištu, jsou multifunkční a více modulární, zahrnují širší spektrum modulů. [16]

V navrhovaném zařízení se využijí jen digitální vstupní a výstupní moduly. Z cenových důvodů je pro danou konfiguraci výhodnější použít k rozšíření počtu vstupů a výstupů distribuovaný systém ET200S s komunikačním modulem IM151-3PN vybaveným komunikačním rozhraním Profinet. [16]

#### 5.1.4 Interface moduly lineárních pohonů

##### SME 120

Ke zpracování analogových signálů z lineárních motorů tříosého manipulátoru se použijí interface moduly SME 120 komunikující s řídicím systémem po sběrnici Drive CliQ. Každé ose manipulátoru je přiřazen jeden interface modul do něhož jsou přivedeny signály z inkrementálního odměřování polohy osy, dále signály z teplotních senzorů i signál z Hallova snímače určeného k řízení komutace. Interface modul SME 120 je vyroben v krytí IP67 a proto je vhodný k montáži na stroj. [17]

Získaný signál z odměřování polohy se přepočítává na aktuální rychlost a polohu osy. Interface modul vyhodnocuje signál inkrementálního snímače do frekvence 500kHz. Rozlišení jedné periody je standardně 11bitů. [17]

##### SMC 20

Signál z odměřování polohy osy  $X_2$ , osazené snímačem k měření průhybu, je vyhodnocován interface modulem SMC 20 komunikujícím s řídicí jednotkou také po sběrnici Drive CliQ. Interface modul SMC 20 bude umístěn v rozváděči. Aktuální poloha i rychlost osy  $X_2$  se vyhodnocuje stejným způsobem.

Interface modul SMC 20 není vybaven rozhraním pro připojení teplotních senzorů ani pro připojení Hallova snímače.

#### 5.1.5 Zobrazovací jednotka HMI

Rozhraní mezi obsluhou a řídicím systémem navrhovaného zařízení bude tvořeno operátorským panelem OP177B s objednacím číslem 6AV6642-0DA01-1AX1. Operátorský panel je vybaven barevným dotykovým 6“ displejem s 32 konfigurovatelnými klávesami.

Ke komunikaci s řídicím systémem Simotion se využije komunikační rozhraní Profinet. OP177B je vybaven i komunikačním rozhraním MPI a Profibus DP.

Operátorský panel je určen pro vizualizaci provozních stavů zařízení, k nastavování parametrů stroje a v neposlední řadě pro práci s recepty jednotlivých výrobků.

Použité HMI obsahuje SD card slot, do něhož se vloží paměťová karta, na níž budou uloženy recepty jednotlivých výrobků včetně nastavení parametrů stroje.

OP177B je vybaveno i rozhraním USB, které se využije k importu i exportu dat z paměťové karty.

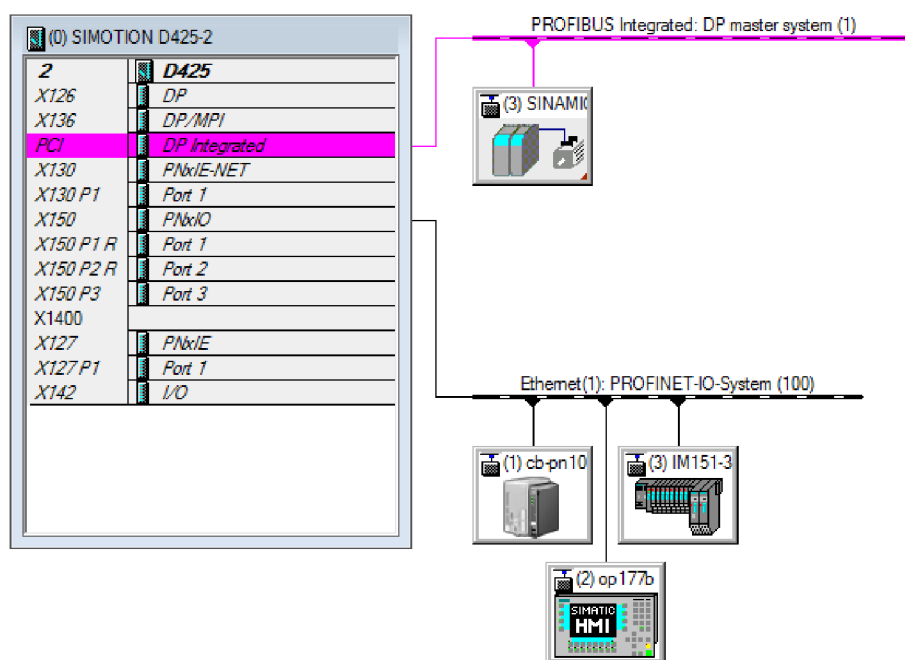


### 5.1.6 Sběrníková topologie navrhovaného zařízení

Obr. 34 znázorňuje schéma topologie sběrnic navrhovaného zařízení. Na sběrnici Profinet je připojen řídicí systém Simotion D425. Přes komunikační rozhraní IM151-3PN je připojena decentrální periferie ET200S. Přes komunikační modul CB-PN100 je připojena řídicí jednotka mikrometru Keyence LS-9501P a dále zobrazovací jednotka OP177B.

Na interní sběrnici Profibus DP jsou připojeny frekvenční měniče Sinamics S120 pohánějící osy manipulátoru.

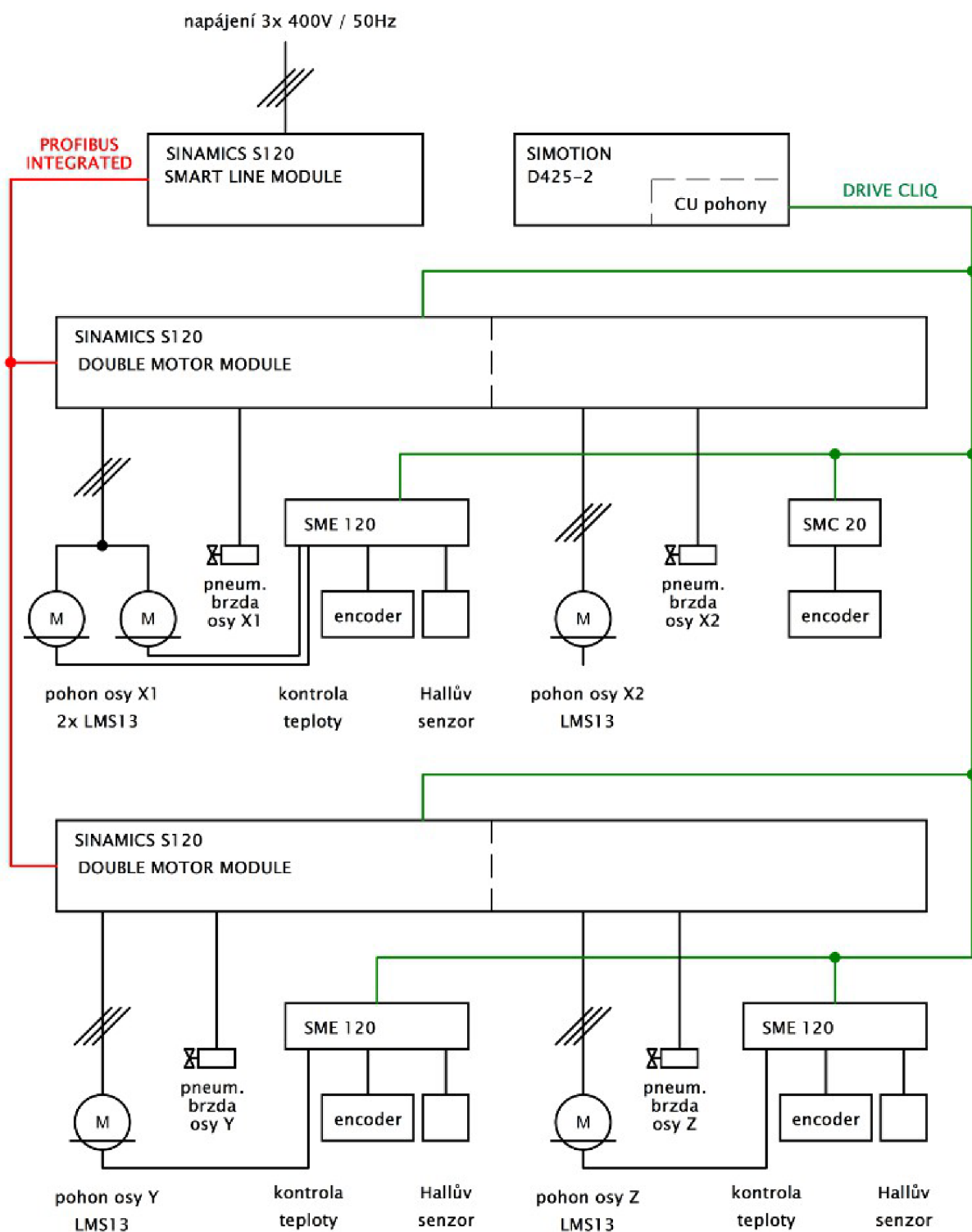
Schéma topologie je pořízeno z konfiguračního nástroje Netpro integrovaného do vývojového prostředí STEP 7.



Obr. 34 Topologie sběrnic navrhovaného zařízení



## 6 ELEKTRICKÉ ZAPOJENÍ JEDNOÚČELOVÉHO STROJE

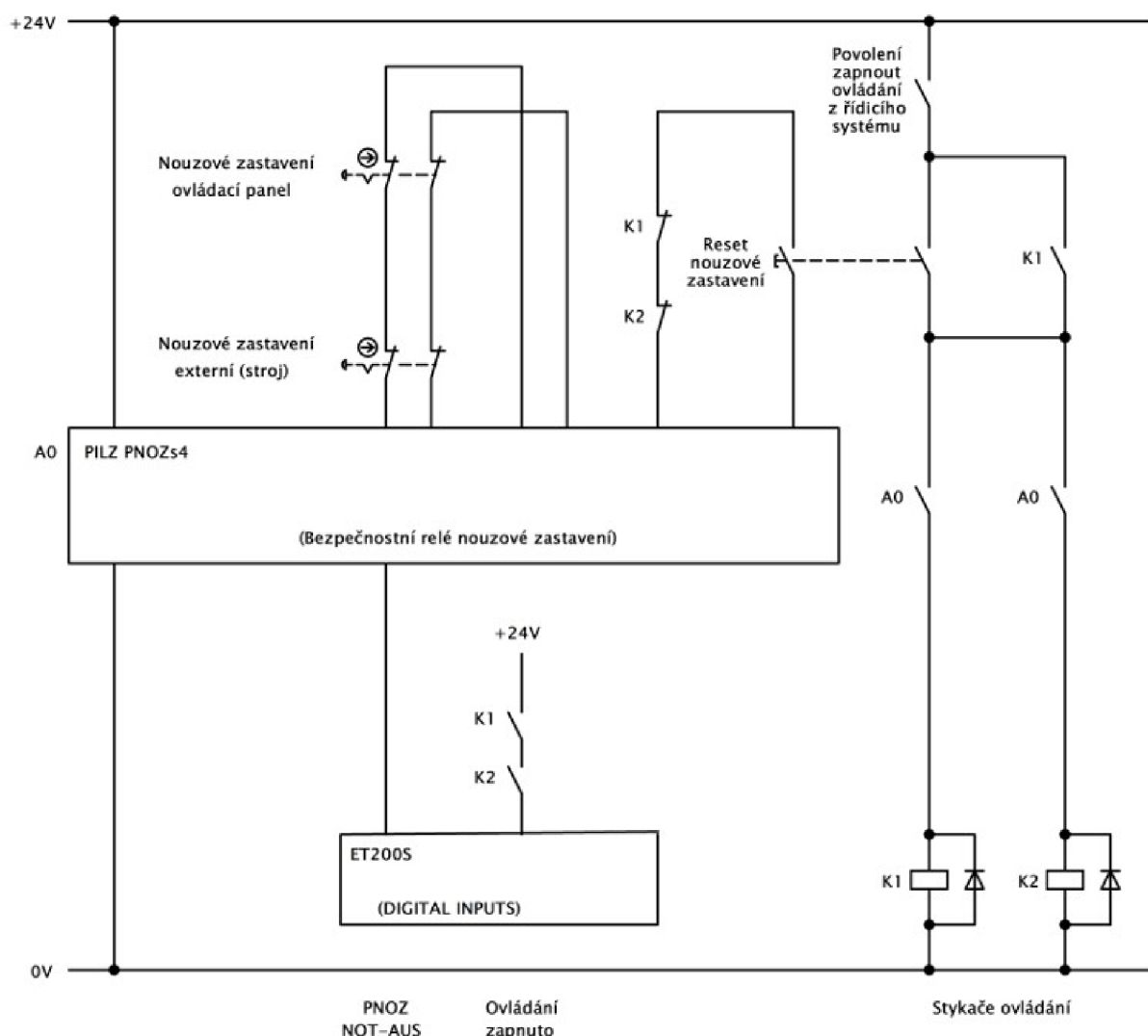


Obr. 35 Blokové schéma elektrického zapojení pohonů navrhovaného zařízení.

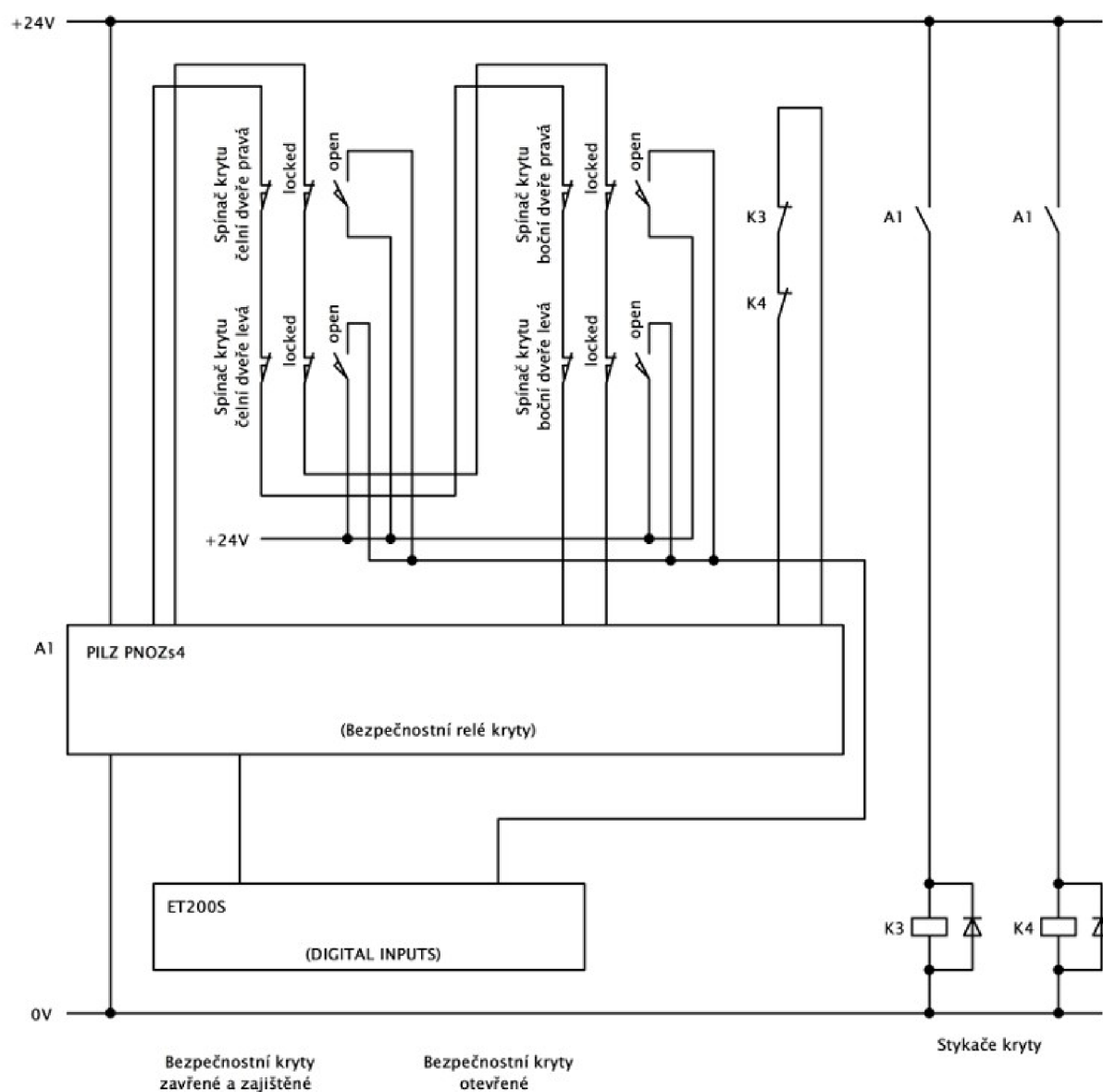
Na Obr. 36 je schéma elektrického zapojení obvodů nouzového zastavení a na Obr. 37 je schéma elektrického zapojení obvodů bezpečnostních krytů.

Zapojení bezpečnostních obvodů je navrženo tak, aby vyhovělo požadované úrovni bezpečnosti PLr = d podle ČSN EN ISO 13849-1. Dosažení požadované úrovně je podmíněno provedením bezpečnostních obvodů v kategorii 3. To znamená dvoukanálové zapojení vstupních, výstupních i vyhodnocovacích členů bezpečnostních obvodů. Detekce příčného zkratu mezi oběma vstupními kanály není požadována.

Jako vyhodnocovací člen je použito bezpečnostní relé PNOZs4 firmy Pilz, které taktéž splňuje požadavky na danou kategorii. Jako výstupní členy jsou použity stykače s nuceným vedením kontaktů opět ve dvoukanálovém provedení.



Obr. 36 Schéma elektrického zapojení obvodů nouzového zastavení

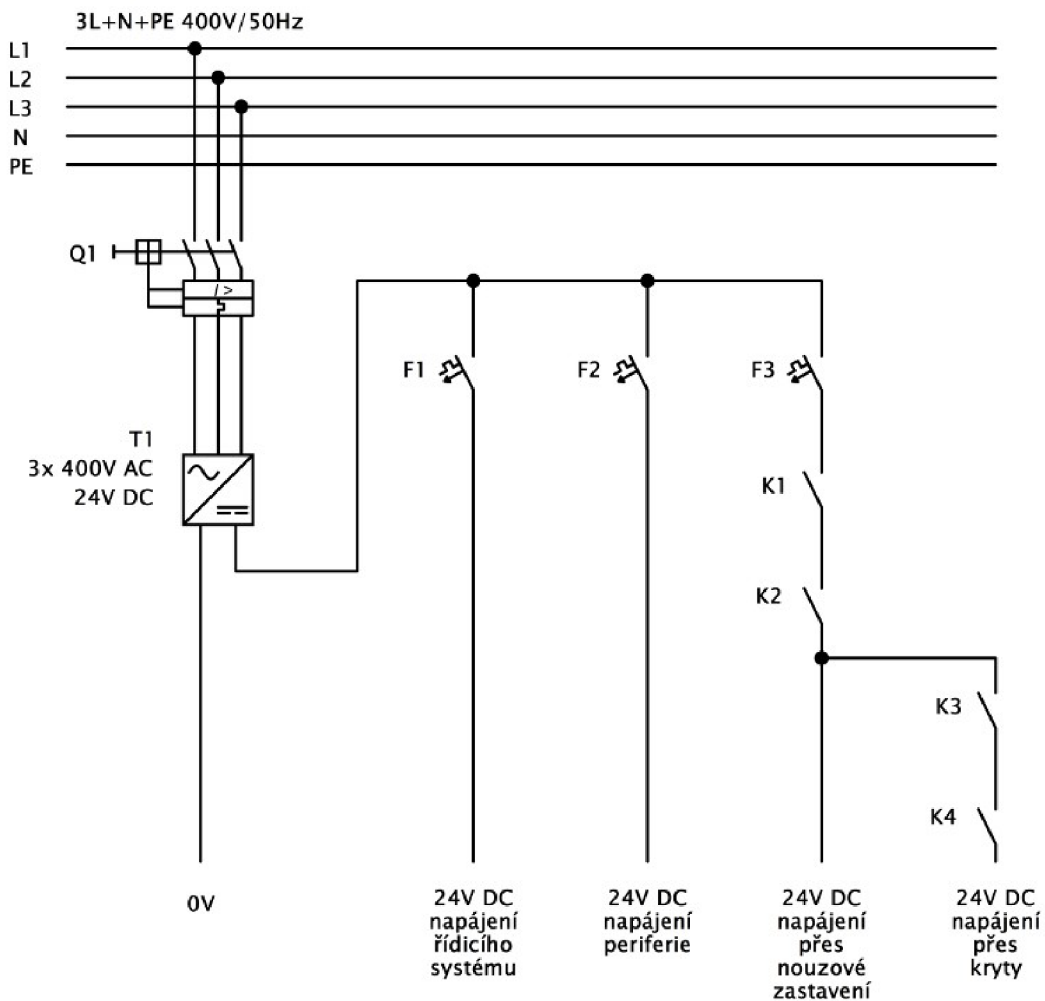


Obr. 37 Schéma elektrického zapojení obvodů bezpečnostních krytů

Na Obr. 38 je schéma zapojení ovládacího napětí 24V DC. Ovládací napětí je rozděleno do čtyř větví. První a druhá větev je určena k napájení řídicího systému a jeho periferií. Třetí a čtvrtá větev je odpínaná stykači nouzového zastavení, navíc čtvrtou větev odpínají stykače bezpečnostních krytů.

K odpínání ovládacího napětí třetí a čtvrté větve jsou použity kontakty stykačů bezpečnostních obvodů v sériovém zapojení.

Kontakty těchto stykačů jsou použity i k aktivaci bezpečnostní funkce zastavení elektrických pohonů kategorie 1. Kategorie 1 znamená řízené zastavení pohybu stroje. Přívod elektrické energie je odpojen v okamžiku dosažení klidového stavu pohonu.



Obr. 38 Schéma elektrického zapojení napájení

## 7 ZÁVĚR

V diplomové práci je řešena problematika návrhu jednoúčelového stroje určeného ke kontrole průhybu.

Původní záměr objednavatele nového zařízení byl nahradit skupinu čtyř pracovišť určených ke kontrole a třídění tyčových polotovarů. Vyhodnocování kvality polotovaru spočívalo v měření obvodové házivosti tyčového polotovaru zjištěné pomocí ručního měření.

Po seznámení se s požadavky na navrhované zařízení a s přesnou funkcí tyčového polotovaru ve finálním výrobku byl z důvodu univerzálnosti, zrychlení měření a zjednodušení konstrukce navrhovaného zařízení majiteli zadavatelské firmy předložen návrh náhradní testovací metody splňující účel původní kontroly.

Měření obvodového házení tyčových polotovarů se nahradilo rychlejší a jednodušší kontrolou - měřením průhybu. Měření probíhá staticky a bezkontaktně, tím byl vyřešen problém s upínáním a rotací testovaného výrobku během měření.

Po analýze aktuálních potřeb na navrhované zařízení a s přihlédnutím k parametrům požadovaných technologií, byly zpracovány tři koncepty možného řešení pracovního stroje. U každé navrhované varianty byl uveden předpokládaný čas pracovního cyklu stroje a cenové náklady na zařízení. Výsledné řešení bylo vybráno s ohledem na kompromis mezi oběma těmito klíčovými ukazateli. Součástí navrhovaného stroje je tříosý manipulátor s polohovatelnou měřicí stanicí.

Další část práce se zabývala výběrem vhodných pohonů manipulátoru a měřicího řetězce. Z požadavků na navrhované zařízení bylo vypočteno silové zatížení jednotlivých os manipulátoru a určeny parametry jednotlivých pohonů. Požadovaným kritériím nejlépe vyhověly lineární motory firmy Hiwin s přímým magnetickým odměřováním. Použité motory disponují dostatečnou výkonovou rezervou.

K měření průhybu tyčových polotovarů se použil měřicí řetězec firmy Keyence. Optické mikrometry uvedeného výrobce svými technickými parametry dané aplikaci vyhovují. Řídicí jednotka snímačů je snadno rozšiřitelná o komunikační rozhraní Profinet umožňující přímé připojení k řídicímu systému navrhovaného zařízení. Cenové náklady na vybraný měřicí řetězec byly ze všech uvažovaných řešení nejnižší.

Dle požadavků zadavatelské firmy byl k řízení navrženého jednoúčelového stroje použit řídicí systém Simotion D425 od firmy Siemens vybavený komunikačním rozhraním Profinet. Řídicí systém je vhodný pro polohování všech čtyř os jednoúčelového stroje.

Mechanika jednoúčelového stroje byla sestavena podle vytvořeného návrhu. K navrženému zařízení byla zpracována dokumentace elektro, podle které byl sestaven a zapojen rozváděč elektrické energie včetně instalace a zapojení elektrovýzbroje na stroji.

Navržené řešení se daří realizovat. Po oživení řídicího systému, nastavení komunikace a naparametrování pohonů zařízení funguje v ručním režimu. V současné době probíhá programování automatického cyklu stroje.

Řízení tříosého manipulátoru je aplikovatelné i na jiná zařízení vyžadující transport a manipulaci s předměty ve třech osách.





## 8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] SVOBODA, Pavel. *Základy konstruování*. Vyd. 3., upr. a dopl. Brno: CERM, 2009, 234 s. ISBN 978-80-7204-633-1.
- [2] HIWIN S.R.O. *Polohovací systémy: Lineární osy* [online]. [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: [http://www.hiwin.cz/media/files/05\\_Polohovaci\\_systemy\\_Linearni\\_osy.pdf](http://www.hiwin.cz/media/files/05_Polohovaci_systemy_Linearni_osy.pdf)
- [3] *Betriebsanleitung: HIWIN MAGIC-Wegmess-System*. HIWIN, 2009. MAGIC-BA2.3-07/2009.
- [4] *Polohovací systémy: katalog CZ* : Hiwin, 2011.
- [5] KEYENCE. *LS-9000 Series: High-speed optical micrometer*. 2013. vyd. Japan, 16 s.
- [6] *Automa: časopis pro automatizační techniku*. Praha: FCC Public, roč. 2009, č. 4. ISSN 1210- 9592. Dostupné z: <http://automa.cz/res/pdf/38860.pdf>
- [7] *SINAMICS - Low Voltage Projektierungshandbuch*. Version 6.0 - Juni 2010 : Siemens AG, 2010.
- [8] *MM Průmyslové spektrum: Konstrukce CNC obráběcích strojů*. Praha: Vogel Publishing, roč. 2006, Speciální vydání Průmyslové spektrum. ISSN 1212-2572.
- [9] FESTO. *Pohony s ozubeným řemenem EGC-TB-KF, s kuličkovými oběžnými pouzdry*. 56s. Dostupné z: [http://www.festo.com/cat/en-gb\\_gb/data/doc\\_CS/PDF/CZ/EGC-TB\\_CZ.PDF](http://www.festo.com/cat/en-gb_gb/data/doc_CS/PDF/CZ/EGC-TB_CZ.PDF)
- [10] *OptoCONTROL ODC: katalog EN: Micro-Epsilon*, 2014.
- [11] FESTO. *Pohony s vřetenem EGC-BS-KF, vedení v kuličkových oběžných pouzdech*. 56s. Dostupné z: [http://www.festo.com/cat/cs\\_cz/data/doc\\_cs/PDF/CZ/EGC-BS\\_CZ.PDF](http://www.festo.com/cat/cs_cz/data/doc_cs/PDF/CZ/EGC-BS_CZ.PDF)
- [12] Řídicí systém SIMOTION. SIEMENS ČESKÁ REPUBLIKA. [online]. [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://stest1.etnetera.cz/ad/current/?ctxnh=d86d92be87&ctxp=home>
- [13] SOUČEK, Pavel. *Servomechanismy ve výrobních strojích*. Praha : ČVUT Praha, 2004. ISBN 80-01-02902-6.
- [14] *Kuličkové šrouby & příslušenství*. HIWIN, 2012. KAT-KS-2012.
- [15] *Automa: časopis pro automatizační techniku*. Praha: FCC Public, roč. 2014, č. 4. ISSN automa. Dostupné z: <http://automa.cz/res/pdf/52629.pdf>
- [16] SIEMENS. *Novinky v SIMATIC ET 200 decentralních perifériích*. 2012. Dostupné z: [https://www.cee.siemens.com/web/cz/cz/corporate/portal/home/produkty\\_a\\_sluzby/IAD\\_T/tia\\_na\\_dosah/Documents/TIA\\_ET200SP\\_web.pdf](https://www.cee.siemens.com/web/cz/cz/corporate/portal/home/produkty_a_sluzby/IAD_T/tia_na_dosah/Documents/TIA_ET200SP_web.pdf)
- [17] *Sinamics S120 Booksize Power Units Manual*. Siemens AG, 01/2012.
- [18] *Siemens: Profinet* [online]. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://w3.siemens.com/mcms/automation/en/industrial-communications/profinet/Pages/Default.aspx>