



ČVUT
ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A
METROLOGIE



Bakalářská práce

Digitalizace lineárního odměřování konvenčního soustruhu

Autor práce: **Jan Šafka**

Vedoucí práce: **Ing. Petr Mikeš, Ph.D.**

Studijní obor: **Teoretický základ strojního inženýrství**

Praha 2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Šafka Jméno: Jan Osobní číslo: 467290
Fakulta/ústav: Fakulta strojní
Zadávající katedra/ústav: Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství
Studijní obor: bez oboru

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Digitalizace lineárního odměřování konvenčního soustruhu

Název bakalářské práce anglicky:

Digitalization of linear scales on conventional lathe

Pokyny pro vypracování:

1. Principy odměřování polohy pohyblivých částí obráběcích strojů
2. Aplikace odměřování polohy v oblasti výrobních strojů
3. Přehled dostupných komponent pro digitalizaci lineárního odměřování konvenčního obráběcího stroje
4. Návrh digitalizace odměřování soustruhu SV18

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Petr Mikeš, Ph.D., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: 18.10.2019 Termín odevzdání bakalářské práce: 20.04.2020

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Petr Mikeš, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis otkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

„Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval(a) samostatně a použil(a) jsem literárních pramenů a informací, které cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů informací.“

Praha

.....

podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Petrovi Mikešovi, Ph.D. za vedení celé práce. Dále bych chtěl poděkovat všem, kteří mi pomohli nebo poradili při realizaci praktické části této práce.

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá digitalizací odměřování konvenčního soustruhu. V první části se práce věnuje odměřováním polohy ve strojírenství, a to odměřováním vzdálenosti a úhlů. V práci je zpracován přehled používaných snímačů pro digitalizaci odměřování a popsán základní princip jejich funkce. Dále je v práci přehled dostupných setů pro digitalizaci odměřování konvenčního soustruhu. Druhá část práce se věnuje návrhu a realizaci digitálního odměřování konvenčního soustruhu SV 18 RA z roku 1973 instalací setu SNS6-2V. V práci je popsána výroba a způsob montáže potřebných dílů pro instalaci. V závěru se práce věnuje ověření přesnosti instalovaného systému a kalkulací ceny realizace.

Klíčová slova: odměřování, digitalizace, obráběcí stroj, snímač

Annotation

This bachelor thesis deals with installation of digital read-out system on conventional lathe. The first part is about position measuring in mechanical engineering, namely length and angle measuring. The thesis maps sensors used for digital measuring and explains it's basic function. Next part maps applicable digital read-out sets for conventional lathes. Second part of thesis is about installation design and realisation of SNS6 digital read-out set on SV 18 RA conventional lathe made in 1973. The thesis deals with fabrication of installation parts. The conclusion is about verifying precision of system and evaluation of set installation.

Keywords: position measuring, digitalisation, machining machine, sensor

Obsah

1	Úvod	7
2	Odměrování polohy	8
2.1	Odměrování vzdálenosti	8
2.2	Odměrování úhlů	8
2.3	Přímé a nepřímé měření	8
2.4	Absolutní a relativní poloha	9
3	Možnosti odměrování polohy u obráběcích strojů	11
3.1	Typy snímačů	11
3.2	Ochrana snímačů	16
4	Aplikace odměrování polohy ve strojírenství	18
4.1	Digitální odměrování u konvenčních obráběcích strojů	18
4.2	CNC obráběcí stroje	19
4.3	Souřadnicové měřicí stroje (SMS)	20
4.4	Přípravky pro kontrolu rozměrů	20
5	Přehled dostupných komponent pro digitalizaci odměrování konvenčního obráběcího stroje	22
5.1	Komponenty systémů digitálního odměrování	22
5.2	Komponenty a sety dostupné v ČR	22
5.3	Komponenty a sety dostupné na Asijském trhu	26
5.4	Shrnutí	29
6	Návrh digitalizace odměrování soustruhu SV18	31
6.1	Návrh instalace	35
7	Realizace digitálního odměrování konvenčního soustruhu	38
7.1	Výroba dílů pro instalaci digitálního odměrování	38
7.2	Montáž odměrovacího systému	46
8	Závěr	55
9	Seznam použité literatury a zdrojů	58

1 Úvod

Pro zefektivnění výroby je většina obráběcích strojů určených pro sériovou výrobu automatizována. Stroj je řízen počítačem pomocí NC kódu (numeric control) a nazývá se CNC obráběcí stroj (computer numerical control). Základ tvoří konvenční obráběcí stroj – soustruh, frézka, bruska, apod.

U konvenčních obráběcích strojů obsluha ovládá vedlejší pohyb při obrábění na stroji pomocí kliček. Ty přes pohybový šroub nebo jiný prvek převádí rotační pohyb na posuvný pro suport nebo stůl stroje. K určení polohy se používá nonius na kličce. Při tomto způsobu odměřování je na kličce aretovaný prstenec, na kterém jsou vyznačeny rysky. Pootočení o dílek mezi ryskami odpovídá vzdálenosti, kterou urazí matice po pohybovém šroubu. Pohon pro vedlejší pohyb může být realizován také krokovým elektromotorem nebo hlavním motorem stroje, na který je pohybový šroub připojen pomocí spojky a převodovky. Toto provedení je technicky poměrně komplikované, protože pro dosažení optimálních řezných podmínek je nutné měnit převod mezi motorem a šroubem. Dobrým příkladem je tzv. Nortonova skříň u soustruhů. Na ní se řadí převod pro strojní posuv nástroje nebo řezání závitů.

Odměřování pomocí noniů je zatíženo chybou, protože se určuje natočení pohybového šroubu, obsluha musí počítat s vůlí pohybové matice a nerovnoměrným opotřebením šroubu. Tato chyba se nejvíce projeví při změně směru pohybu.

Pro zjednodušení a zpřesnění práce na konvenčních strojích se používá místo odměřování pomocí noniů digitální odměřování. K pohyblivým částem stroje jsou připevněna pravítka, po kterých se posunuje jezdec. Poloha jezdce vůči pravítku generuje signál do výstupního rozhraní – displeje, ze kterého obsluha přímo odečte polohu. Pokročilejší rozhraní navíc může poskytnout mnoho doplňujících funkcí, například přepínání mezi souřadnými systémy, prováděním pracovních výpočtů, apod.

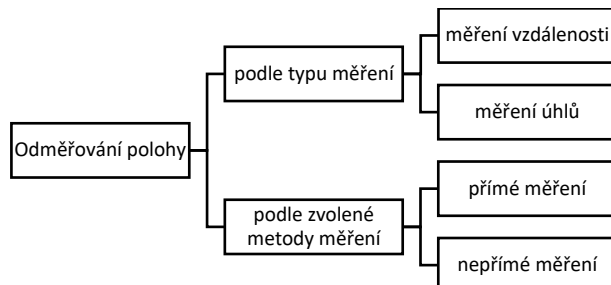
U CNC strojů jde výstupní signál o poloze do počítače a tím umožňuje určovat polohu nástroje vůči obrobku. Počítač podle této informace dále řídí krokové motory a celou činnost stroje.

Digitální odměřování může být ve strojírenství aplikováno také pro měřicí stroje, přípravky pro kontrolu a další potřeby.

I když je vyráběna většina obráběných součástí na CNC strojích, pro výrobu jednodušších částí, přípravků, prototypů, pro úpravy a opravy dílů je vhodné použít konvenční stroj. Pro tyto práce je to časově méně náročné než modelování, generování, odladění NC kódu a následná výroba.

2 Odměřování polohy

Odměřování lze rozdělit podle typu měření na měření vzdálenosti a měření úhlů, podle zvolené metody měření pak na měření přímé a nepřímé. Výsledné určení polohy je popsáno souřadným systémem, ten může být absolutní nebo relativní.



Obrázek 1 Rozdělení odměřování

Pro odměřování polohy je možné využít několik způsobů a technologií. Ty se odvíjí od typu stroje, požadované přesnosti odměřování, typu pohonu vykonávaného pohybu, pracovních podmínek a v neposlední řadě ceně.

Způsob odměřování by měl být určen podle typu a vlastností stroje. Požadavky na přesnost odměřování je vhodné volit úměrně k možnostem stroje a výsledné požadované přesnosti výrobku. [13]

2.1 Odměřování vzdálenosti

Je použito pro přímé měření na jednotlivých lineárních osách. Může být provedeno také nepřímo, odměřováním úhlů - např.: k měření natočení pohybového šroubu a následného přepočítání na lineární posuv.

2.2 Odměřování úhlů

Je použito k určení natočení u otočných stolů nebo polohovatelného vřetene u CNC soustruhu při výrobě složitějších součástí.

2.3 Přímé a nepřímé měření

U přímého měření jsou naměřená data přímo hodnoty požadované měřené veličiny (např. měření vzdálenosti pomocí posuvných měřidel). Za přímé měření jsou považovány také metody, u kterých je na stupnici odečtena hodnota nebo kód a z tohoto údaje je určena měřená veličina pomocí tabulky nebo diagramu.

U nepřímého měření se z naměřených dat dále výpočtem určuje požadovaná veličina. Nepřímé měření je zatíženo nejistotou a nepřesností, jejich velikost je dána použitým matematicky popsaným fyzikální vztahem nebo jinými okolnostmi měření.[1]

Přímé měření vzdálenosti

Provádí se pomocí lineárních snímačů připevněných přímo na lože nebo stůl stroje. Samotný snímač se skládá z pravítka a sondy. Pravítko je zapouzďeno, aby nedošlo k jeho poškození nebo znečištění. Sonda se připevňuje k pohyblivé části stroje

a pojíždí po pravítku. Utěsnění mezi sondou a pravítkem je kritické pro správné fungování celého systému odměřování. Signál ze snímače jde do vyhodnocovací jednotky a ta jej dále zpracovává pro výstup.[3][13]

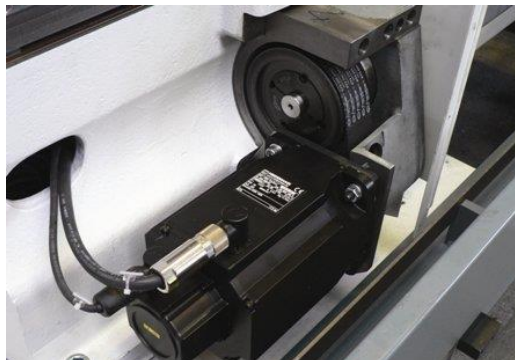
Přímé měření úhlů

Provádí se pomocí snímačů, které převádí rotační pohyb na elektrické pulzy přímo úměrné úhlu natočení. Pulzy jsou dále zpracovány vyhodnocovací elektronikou pro výstup.[4]

Nepřímé měření vzdálenosti

Vzdálenost je také možné měřit nepřímo. Při této metodě je určen úhel natočení pohybového šroubu a následně vypočtena hodnota posunutí podle vlastností závitu pohybového šroubu (stoupání závitu). Toto měření je méně přesné. Naměřená hodnota je zatížena větší chybou, zároveň je přesnost ovlivněna vůlí mezi pohybovým šroubem a maticí. Tato chyba se může nepříznivě projevit zejména při změně směru pohybu, kdy bude matice po změně smyslu otáčení pohybového šroubu stát, dokud závit šroubu neurazí vzdálenost vůle a nezačne maticí pohybovat v opačném směru. Pohybový šroub může být opotřeben nerovnoměrně, např. u soustruhu bude většina práce prováděna blíže k vřetení.

Toto řešení je často použito u levnějších a hobby strojů. Některé softwary umožňují kompenzaci vůle mezi pohybovým šroubem a maticí (funkce backlash compensation), vůle ovšem musí být předem změřena a nastavena v programu v korekční tabulce. Tuto funkci nabízí například ovládací rozhraní Mach 3 controller. Softwary této firmy jsou velmi oblíbené pro svou dostupnost a množství funkcí, které jsou schopny zajistit. [2][13]



Obrázek 2 Nepřímé odměřování délky přes natočení osy krokového motoru [13]

2.4 Absolutní a relativní poloha

Odměřování vždy probíhá v souřadném systému s počátkem. Pro různé operace se používají různé systémy určování polohy, např.: jednoduchý, rovinný ortogonální systém se dvěma osami, ve které je poloha určena pomocí dvou souřadnic.

Poloha počátku souřadných systémů může být v rámci stroje absolutní nebo relativní.

Absolutní poloha je poloha vzhledem k hlavnímu souřadnému systému v rámci stroje (absolutní souřadný systém), např.: pro soustružení to může být souřadný systém osy z (osa rotace vřetene, směr posuvu nástroje) a na ní kolmá osa x (směr přířuvu nástroje). Pomocí tohoto systému lze popsat polohu a seřídít nástroj. Pro CNC stroj to může být např. poloha pro výměnu nástroje.

Relativní souřadný systém má pak nejčastěji směry os rovnoběžně s osami absolutního souřadného systému, ale poloha jeho počátku je jiná. Relativní souřadný systém je tedy možné umístit libovolně podle potřeby v rámci pracovního prostoru stroje.

Relativní souřadný systém se používá pro určení pozice polotovaru (okraj, střed apod.), polohy právě vyráběného prvku na součásti (např.: osazení, zápichy, apod.) nebo pro korekci polohy referenčních bodů jednotlivých nástrojů (např.: špička nože). Na každý nástroj je potřeba seřídít výchozí polohu. [13]

3 Možnosti odměřování polohy u obráběcích strojů

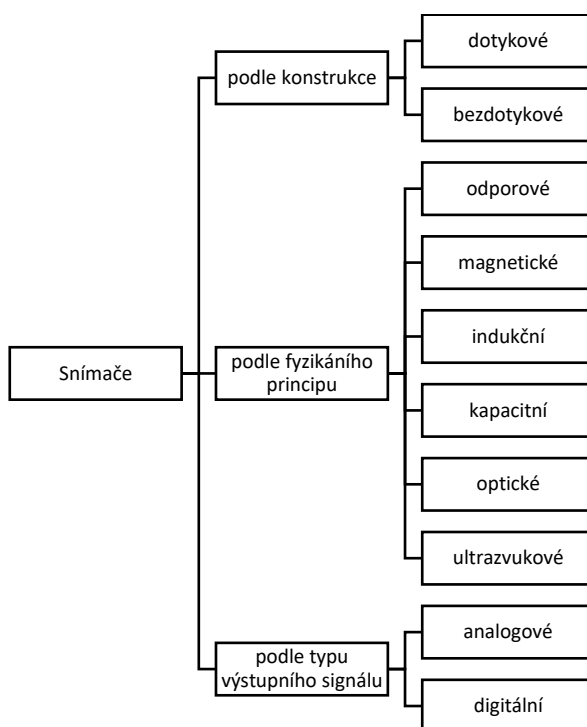
Hlavním komponentem pro všechny odměřovací systémy je systém snímače, tedy senzor a pravítko nebo disk (odměřování úhlů). Snímače jsou rozděleny podle principu jejich funkce. Nejvíce se liší přesností měření, která je uváděna v jednotkách [$\mu\text{m/m}$], použitelností pro daný účel (tepelná odolnost apod.) a cenou.

3.1 Typy snímačů

Snímače lze rozdělit podle konstrukce na dotykové a bezdotykové, podle typu výstupního signálu, který je dále zpracováván, na spojité (analogové) a číslicové (digitální) výstupy.

Podle fyzikálního principu se dělí na odporové, magnetické, indukční, kapacitní, optické a ultrazvukové.

Výstupní charakteristika snímačů může být lineární nebo nelineární (např. logaritmická, exponenciální apod.)



Obrázek 3 Rozdělení snímačů polohy

Odporové snímače

Měří se úbytek napětí na odporu. Ten se mění v závislosti na poloze, v podstatě se jedná o potenciometr (proměnný odpor), kde se jezdec pohybuje po cívce odporového drátu.

Změna odporu v závislosti na poloze může být lineární nebo nelineární.

Rezistivní materiál může být: odporový drát, metalizovaný povrch, uhlík nebo konduktivní plast. Používá se také tzv. Cermet (kompozit z kovu a keramiky) - je odolný proti vysokým teplotám a má velmi přesný lineární výstup.

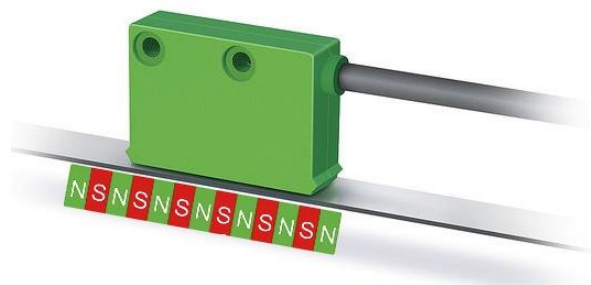
Výhodou odporových snímačů je jednoduchá konstrukce a nižší cena. Nevýhodou je tepelná proměnnost elektrického odporu, která může zapříčinit chybná měření.[5]



Obrázek 4 Odporový snímač polohy [5]

Magnetické snímače

Používají ke zjištění polohy Hallovu sondu a pásek s proměnným magnetickým polem (pravidelně se na jeho délce střídají magnetické póly). Pohybem sondy po pásku se generuje signál. [17]



Obrázek 5 Magnetický snímač polohy [18]

Indukční snímače

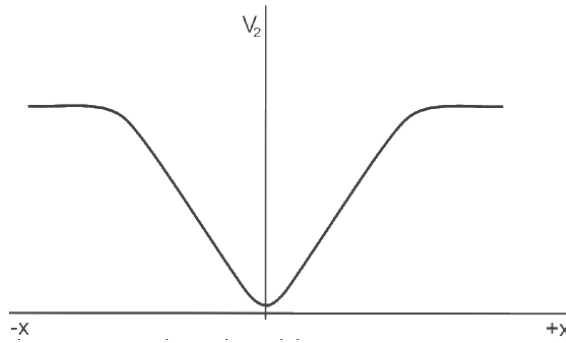
Pracují na principu změny indukčnosti. Změna polohy jádra transformátoru způsobí změnu vzájemné indukčnosti mezi primární a sekundární cívkou. Výstupem je napětí na sekundární cívce úměrné poloze pohyblivého jádra.



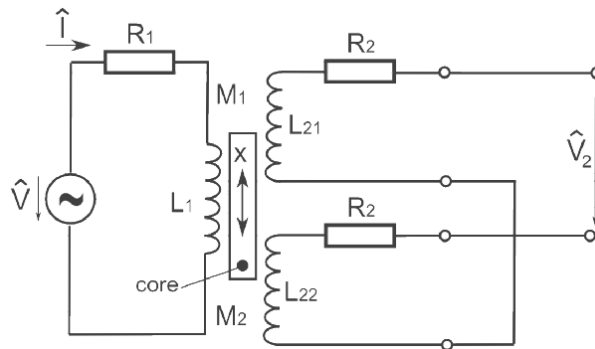
Obrázek 6 Indukční LVDT snímač RAC [15]

LVDT senzor (Linear Variable Differential Transformer)

K měření se používá transformátor napájený střídavým proudem s jednou primární a dvěma sekundárními cívkami. Pohybem jádra se mění napětí na obou sekundárních cívkách. Výstupní charakteristika není lineární, proto se senzor používá ve své přibližně lineární oblasti. [5][15]



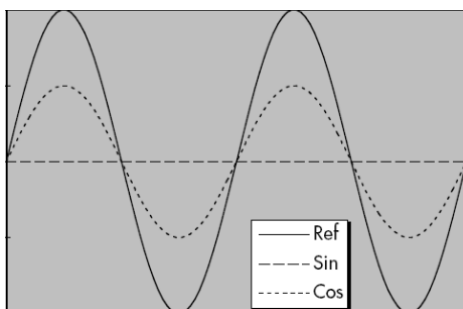
Obrázek 7 Příklad statické charakteristiky LVDT senzoru [5]



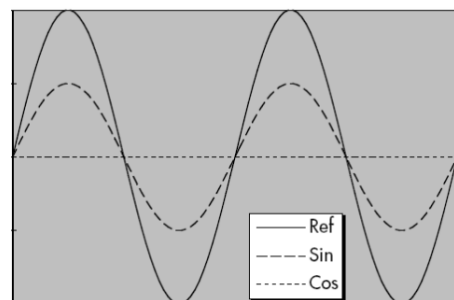
Obrázek 8 Schéma funkce LVDT senzoru [5]

Resolver

Je indukční snímač pro určení úhlu natočení. Jeho konstrukce je podobná elektromotoru, používá ale dvě na sebe kolmá statorová vinutí, aby se kombinací jejich výstupů dalo určit natočení v rozsahu celé otáčky, každé z nich má svůj vlastní výstupní signál (napětí). Výstupní signály se různě mění v závislosti na natočení rotoru. Na rotor je přivedeno střídavé napětí a podle napětí na sekundárních cívkách se určí úhel natočení.[5]



Obrázek 9 Výstup resolveru pro natočení 0° [5]



Obrázek 10 Výstup resolveru pro natočení 90° [5]

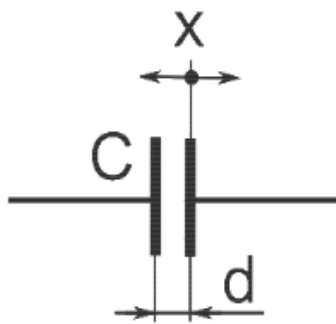


Obrázek 11 Resolver [16]

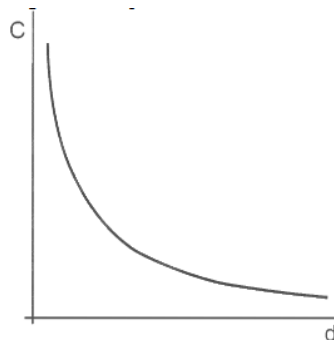
Kapacitní snímače

Fungují na principu elektrického kondenzátoru. Poloha je určena v závislosti na změně kapacity.

Kapacitu je možné ovlivnit změnou vzdálenosti kondenzátorových desek, změnou plochy, ve které se desky překrývají nebo změnou polohy dielektrika (výplň mezi deskami). Každá z těchto metod má různé průběhy závislosti kapacity na poloze.[5]



Obrázek 12 Schéma kapacitního senzoru se změnou vzdálenosti desek [5]



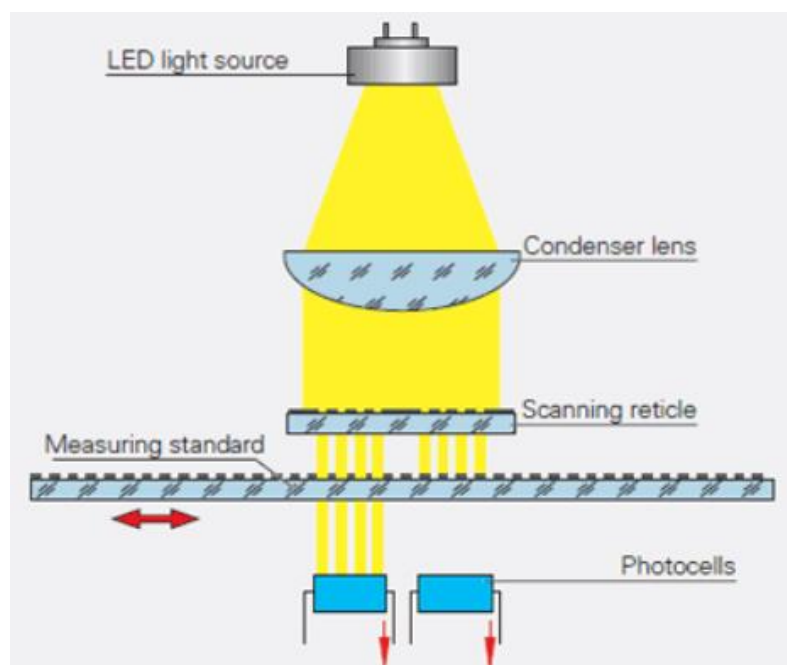
Obrázek 13 Příklad změny kapacity v závislosti na vzdálenosti desek [5]

Optické snímače

Obecný princip spočívá v clonění světelného toku mezi zdrojem a fotocitlivými prvky pomocí pravítka. Pravítko je rozděleno na pro světlo prostupné a nepropustné části, které tím tvoří periodicky se opakující kroky. Posunutí senzoru o jeden krok způsobí přerušení a obnovení světelného svazku.

Měří se rozdíl mezi výstupem senzoru a parametry zdroje optického záření. Jako zdroj záření se dá použít např. LED dioda. Záření může být ve viditelném nebo infračerveném spektru. Paprsky jsou usměrněny pomocí optiky – kondenzátoru. Jako snímač se používá fototranzistor nebo fotodioda.

Optické senzory také mohou odečítat konkrétní značky na pravítku, ty jsou umístěny u jednotlivých rysek. Pro zjednodušení odečítání mohou být rysky označeny kódovým obrazcem (např. Grayův kód).

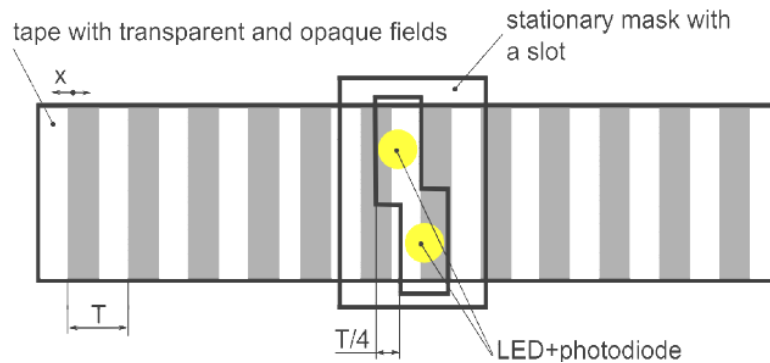


Obrázek 14 Princip funkce optického snímače [7]

Optický inkrementální senzor

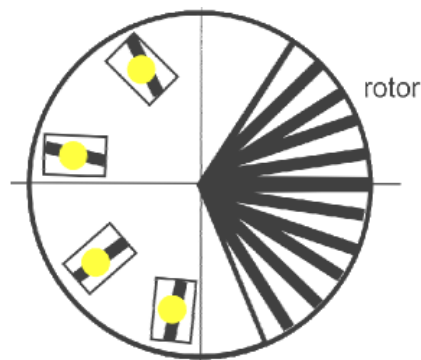
Optický inkrementální senzor používá více optických snímačů, které jsou umístěny vůči sobě o vzdálenost jinou než celočíselné násobky periody T .

Typický senzor snímá najednou 3 kanály, které jsou vůči sobě mechanicky posunuty o vzdálenost $T/4$. Dva slouží k určení přesné vzdálenosti, třetí zjišťuje směr pohybu. U jednosenzorového snímače polohy je indikována pouze značka nebo mezera, oproti tomu inkrementální čidlo zjišťuje polohu pomocí kombinace signálů z více snímačů. Z jejich hodnot a pořadí pak může určit i polohu menší, než je vzdálenost mezi značkami.



Obrázek 15 Princip lineárního inkrementálního snímače [5]

Na stejném principu funguje i inkrementální čidlo natočení, místo pravítek se používají disky s dělicím obrazcem.



Obrázek 16 Inkrementální čidlo natočení [5]

Inkrementální senzory mají velkou rozlišovací schopnost, malé rozměry a malou hmotnost. Jejich nejmenší krok je omezen difrakcí světla (odchýlení světla od směru šíření) na přibližně $7 \mu\text{m}$. V některých případech se tento problém dá řešit použitím jiného světelného zdroje s kratší vlnovou délkou. [5]

Chyby tohoto senzoru pochází nejčastěji od proměnlivé svítivosti LED, citlivosti fotodiód a špatným umístěním pravítek nebo disků v případě měření úhlu natočení. [6]

3.2 Ochrana snímačů

Snímače jsou jemná zařízení, jejich funkčnost je ovlivněna podmínkami, ve kterých pracují. Snímače mohou být ovlivněny vniknutím nečistot a kapalin do pouzdra, vibracemi stroje, elektromagnetickým polem a mechanickým zatížením.

Ochrana před vniknutím nečistot a kapalin

Snímače jsou uzavřeny v ochranných pouzdech a přechod mezi pohyblivými částmi (pravítka-sonda) je chráněno gumovým těsněním, aby třísky a řezná media, případně oleje, se nemohly dostat dovnitř a zařízení poškodit. Dále se při montáži nad pravítka může namontovat plechový okap, aby přímo na pouzdro pravítka nepadaly třísky a aby kapaliny nemohly vzlínat skrz gumové manžety.

Některé snímače jsou chráněny přetlakem, tedy přivedením stlačeného vzduchu do těla pravítka, který nečistoty a kapaliny vytlačí ven.[13]



Obrázek 17 Přívod stlačeného vzduchu do snímače [13]

Ochrana před vibracemi

Nejsilnější vibrace nastávají při používání rychloposuvů, při hrubování nebo při přerušovaném řezu (např.: soustružení nerotačních obrobků). Při těchto operacích nebývá většinou požadována velká přesnost, proto se tento faktor často zanedbává. Případná ochrana proti vibracím může být řešena pomocí gumových tlumících elementů, tento způsob ovšem zhorší přesnost měření. Další možností je softwarové zpoždění signálu, aby výstup nepřeskakoval mezi několika hodnotami. V některých případech je vhodnější použít bezkontaktní snímač a tím se problémům s vibracemi vyhnout.[13]

Ochrana před mechanickým zatížením

Mechanické zatížení může být způsobeno montážní vůlí, tepelnou roztažností nebo vnějšími vlivy. Ochranou před mechanickým namáháním je přimontování pravítka na vhodné místo a na podpůrnou desku, která případné zatížení přenesou. Chránit je potřeba hlavně delší snímače, které jsou připevněny na koncích a nejsou jinak podepřeny. [13]

4 Aplikace odměřování polohy ve strojírenství

4.1 Digitální odměřování u konvenčních obráběcích strojů

Ve výrobě v malých a středních sériích se dnes nejvíce používají CNC obráběcí centra, přesto jsou pro kusovou výrobu, opravy, úpravy a výrobu prototypů používány konvenční obráběcí stroje. Pro zjednodušení práce se na ně instalují digitální odměřování (zkratka DRO – Digital Read-Out) místo nóniů na jednotlivých klíčcích.



Obrázek 18 Soustruh Optimum s digitálním odměřováním

Systemy umožňují zrychlení a usnadnění práce pro obsluhu, zajišťují funkce pro zjednodušení výměny nástrojů a obrobků a provádí pracovní výpočty (sčítání délek, dělení apod.). Nejčastěji jsou dnes použity optické a optické inkrementální snímače, případně kapacitní a odporové snímače.

Pro usnadnění výměny nástrojů je vhodné použít na stroji kombinaci digitálního odměřování a systému pro rychlou výměnu nástroje namísto obyčejné univerzální nožové hlavy. Nástroje jsou umístěny v držácích, jejich upnutí na nožovou hlavu se pak provádí přes rybinovou drážku nebo jiným svěrným systémem s dobrou přesností opakovaného upnutí. V systému odměřování je možné přednastavit korekce pro jednotlivé nástroje.



Obrázek 19 Nožová hlava se systémem rychlé výměny nástroje multifix



Obrázek 20 Nožová hlava se systémem rychlé výměny nástroje s rybinovou drážkou [11]

V současné době jsou k vidění starší konvenční obráběcí stroje, na které byl systém odměřování nainstalován až později. Protože se s montáží pravítek a senzorů nepočítalo při konstrukci stroje, je potřeba vymyslet správný způsob upevnění, který zpravidla nebývá ideální z hlediska funkčnosti a ochrany odměřovacího systému. Pravítka je nutné chránit před fyzickým poškozením např. neopatrnou manipulací s ostatními komponenty stroje (u soustruhu např.: nabouráním koníka nebo lunety do pravítka apod.). Funkce, obsluha a vlastnosti stroje mohou být instalací odměřování omezeny.

4.2 CNC obráběcí stroje

CNC obráběcí stroje jsou používány hlavně pro výrobu v malých a středních sériích. Jednoduché levné a hobby stroje používají krokové motorky s odměřováním úhlu natočení pohybového šroubu. Pro jejich indikaci se nejčastěji používají optické snímače nebo resolvery.

U CNC obráběcích strojů pro výrobu jsou nejčastěji používány optické inkrementální snímače.



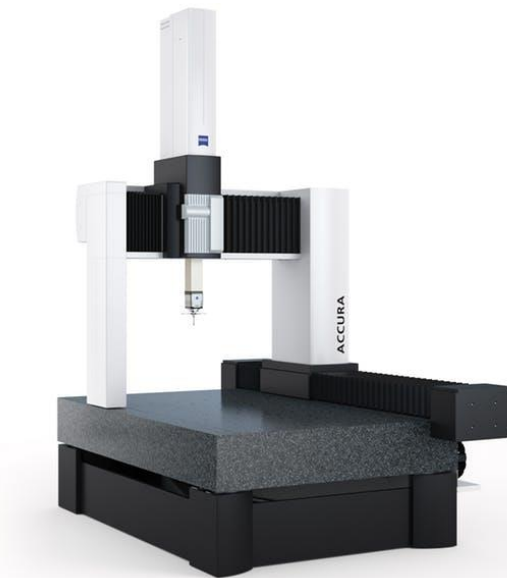
Obrázek 21 CNC Soustruh OKUMA Genos L200E-M [27]

Již při návrhu stroje je počítáno s instalací odměřovacího zařízení, díky tomu mohou být pravítka umístěna zcela odděleně od pracovního prostoru.

4.3 Souřadnicové měřicí stroje (SMS)

Jsou používány pro přesné měření a kontrolu součástí. Jejich hlavní výhodou je provázanost s původním modelem a kódem, podle kterého byla součást vyrobena. Dají se tak kontrolovat i tvarově složité součásti. Princip SMS spočívá v tom, že se na součásti určí základní bod, polohy dalších bodů na měřené součásti měříme formou souřadnicových rozměrů v jednotlivých osách.

Souřadnice jsou indikovány pomocí přesných snímačů. Používají se dotykové sondy, které se fyzicky dotknou měřeného objektu a zaznamenají souřadnice. Takto se vytvoří kompletní mapa bodů a kontroluje se, zda všechny body leží v požadovaných tolerančních polích. Tímto systémem je možné měřit tvarově složité součásti.



Obrázek 22 Souřadnicový měřicí stroj ZEISS Accura [28]

Oproti obráběcím (a obecně výrobním strojům) je u snímačů použitých na SMS požadována hlavně přesnost. Odolnost proti vlivům prostředí není tolik kritická, protože měření většinou probíhá v čistém prostření za konstantních okolních podmínek (teplota, vlhkost apod.). [19]

4.4 Přípravky pro kontrolu rozměrů

Při výrobě a následné kontrole některých dílů je možné použít digitálního odměřování. Systém pak slouží jako metrologická pomůcka pro kontrolu různých rozměrů. Takovýto měřicí stroj se skládá z přípravku pro upevnění dílu nebo sestavy a senzoru.



Obrázek 23 Přípravek pro kontrolu délky



Obrázek 24 Pevná čelist přípravku

Na obrázcích 23 a 24 je zachycen přípravek na kontrolu rozměrů trubek. Jedna čelist je pevná, druhá pohyblivá s digitálně odměřovanou polohou. Tímto systémem je možné opakovaně měřit různé délky trubek bez přenastavování měřícího přístroje.

5 Přehled dostupných komponent pro digitalizaci odměřování konvenčního obráběcího stroje

5.1 Komponenty systémů digitálního odměřování

Vývojem, výrobou a instalací systémů pro digitální odměřování se po světě zabývá mnoho firem. V České republice se na tuto problematiku přímo specializuje např.: firma ESSA.

V poslední době jsou systémy odměřování vyráběny také v Asii. Tyto produkty jsou k dostání za násobně nižší cenu a jejich přesnost je podle uváděných parametrů dostatečná, mohou tedy být výhodnější pro modernizaci staršího konvenčního stroje.

V následující části je uvedeno několik vybraných firem, které se digitalizací konvenčních obráběcích strojů zabývají. Uvedené komponenty jsou vhodné k sestavení systému digitálního odměřování pro konvenční soustruh, případně frézku.

Systém odměřování se skládá z pravítek a výstupního rozhraní pro obsluhu.

5.2 Komponenty a sety dostupné v ČR

ESSA

Společnost ESSA s.r.o. byla založena v červnu 1992 pracovníky servisu řídicích systémů NC a CNC spolu s pracovníky vývoje optoelektronických inkrementálních snímačů z bývalých státních podniků ZPA KŘÍŽÍK a LARM. [20]

Lineární snímače

Jsou rozděleny podle rozměrů profilu a typu pouzdra snímače. Následující čísla popisují měřicí rastr, odměřovací jednotku, výstupní signál, odměřovanou délku 50 mm až 30000 mm, umístění referenčních značek, výstupní kabel a konektor.

Pro jednotlivé typy jsou doporučeny odměřované délky (např. pro SL1xx 50 mm až 1440 mm)

Podle odměřovaných délek bude pro běžný obráběcí stroj vhodné použít snímače SL1xx a SL3xx. Rozměry profilu snímače mohou být rozhodující vzhledem k malému prostoru, do kterého se musí vejít (kritické u příčného posuvu na soustruhu). Větší rozměr pouzdra obalu je pak lepší pro přenesení mechanického zatížení pravítka.

Snímač má délkovou přesnost 5 $\mu\text{m/m}$ a je opatřen krytím na úrovni IP 54.[21]

Ochrana všech elektrických zařízení je popsána označením IPxx podle normy ČSN EN 60 529. Čísla x za písmeny IP popisují, proti jakým podmínkám jsou chráněny. Druh krytí IP 54 znamená - chráněno proti prachu a dotyku drátem (IP5x) a chráněno proti stříkající kapalině (IPx4). [12]



Obrázek 25 Lineární snímač SL1xx

Ceny snímačů se odvíjí od odměřované délky - např.: snímač SL1xx délky 520 mm s rozlišením 0,5 μ m stojí 14800,- Kč (22.10.2019). [22]

Číslicová indikace ADL-2

Nabízená rozhraní se liší podle počtu zobrazovaných souřadnic a přídatných řádků, na kterých je možné dále operovat se souřadnicemi.

Pro konvenční obráběcí stroj (soustruh, frézka) jsou vhodná rozhraní ADL-2 a ADL-3.

Rozhraní umožňuje funkce:

- nastavení referenčních bodů
- přepínání mezi absolutním a přírůstkovým (relativní souřadný Systém)
- změna směru sčítání
- výpočet bodů na roztečné kružnici
- lineární a nelineární korekce [23]



Obrázek 26 Číslicová indikace ADL-2 [23]

Limat

Firma Limat působí na trhu od roku 1995. Má dlouholeté zkušenosti s vývojem odměřovacích a automatizačních zařízení. Firma se snaží vyvíjet výrobky s robustní konstrukcí, maximálním stupněm ochrany a dosahovat u výrobků co nejlepší poměr mezi cenou a výkonem.[9]

Snímač ENDURRO

Firma Limat nabízí pro digitalizaci odměřování tento indukční snímač. Snímač se skládá z válcové tyče a jezdce. Ve válci z nemagnetické nerezové oceli je umístěna

cívka se stoupáním 2 mm z feromagnetického materiálu. Jezdec je vodotěsný. Otvor, kterým prochází válcová tyč je vybaven pryžovými stěrači, obsahuje systém vinutí a elektronickou jednotku. [8]



Obrázek 27 Snímáček Limat ENDURRO [8]

Snímáček má přesnost 20 $\mu\text{m}/\text{m}$, vyrábí se v délkách do 2000 mm a je opatřen krytím na úrovni IP 68.

Krytí IP 68 znamená ochrana před nebezpečným dotykem jakoukoliv pomůckou, ochrana proti potopení do vody. Zařízení je schopné pracovat za nepřetržitého ponoření do vody za podmínek určených výrobcem. [12]

Cena snímáče ENDURRO R500 (odměřovaná délka 500 mm) je 5180,- Kč (28.2.2020) [14]

Číslíková indikace Delos 2V LED

Výstupní rozhraní Delos 2V LED zobrazuje polohu na dvou osách a je vybaveno LCD displejem.

Rozhraní umožňuje funkce:

- volba rozlišení snímáče
- nastavení směru čítání
- volba mm / inch
- volba poloměr / průměr
- volba absolutní / relativní stupnice
- nastavení nuly, přednastavení hodnoty
- nastavení kompenzace nástroje
- lineární i nelineární korekce chyby snímáče
- obrábění kuželu



Obrázek 28 Limat Delos 2V LED [10]

Cena Rozhraní Delos 2V je 6750,- Kč (28.2.2020). [14]

Jírka a spol.

Společnost JIRKA a spol., s.r.o. se specializuje na výrobu, modifikaci a prodej digitálních odměřování polohy. Poskytuje také instalaci těchto zařízení na nové i starší stroje. [24]

Lineární magnetické pravítko

Firma nabízí magnetický snímač polohy s rozlišením 5 μm a 1 μm . Ochrana přechodu mezi sondou a pravítkem může být provedena pomocí jedné nebo dvou gumových manžet. [25]



Obrázek 29 Lineární magnetické pravítko

Cena lineárního magnetického pravítka délky 520 mm s rozlišením 5 μm je 5686,- Kč (9.3.2020). [25]

Digitální indikace BC-2011

Tato digitální indikace je vhodná pro digitalizaci odměřování soustruhů.

Indikace umožňuje funkce:

- nastavení směru odměřování
- absolutní / inkrementální stupnice měření
- konverze jednotek mm / inch
- vynulování, přednastavení počáteční hodnoty měření
- možnost zablokování kteréhokoliv tlačítka indikace
- nastavení rozlišení pravítka plynule v rozsahu 0,005 ~ 0,999 mm
- nastavení pozice desetinné tečky
- funkce půlení, zrcadlení
- lineární korekce pravítka
- nastavení referenčního bodu
- trvalá paměť po vypnutí



Obrázek 30 Digitální indikace BC-2011

Cena této digitální indikace je 4592,- Kč (9.3.2020). [26]

5.3 Komponenty a sety dostupné na Asijském trhu

Pro pořízení jednoho setu je vhodné použít portály jako je ebay.com nebo Aliexpress.com, protože zaručují prověřené prodejce a v případě, že obchod neproběhne hladce, navrácení peněz. Protože se nejedná o nákup na Evropském trhu, jsou sety zatíženy clem. Vyřizování administrativy a proclení na celním úřadě je časově poměrně náročné. Někteří prodejci proto zboží dováží do skladů v Evropě, uhradí clo a zboží dále distribuují po Evropě s mírně navýšenou cenou. Tato možnost byla využita i při nákupu setu na realizaci digitálního odměřování pro tuto práci.

Většina zde nabízených systémů odměřování je navzájem velice podobná, liší se nejčastěji typy konektorů a cenou.

HYMSEANN SNS-2V

Optické pravítko NTS-M

Nejčastěji nabízený typ pravítka, prodejci uvádí přesnost 5 μm (případně za příplatek je možné objednat pravítko s přesností 1 μm).



Obrázek 31 Snímač NTS-M s okapem

Digitální rozhraní Hymseann

Jednoduché rozhraní s doplňujícími funkcemi. Velmi často jsou k dostání podobná rozhraní se stejnými parametry a konektory, lišit se mohou softwarem a tím pádem i nabízenými funkcemi.

Rozhraní nabízí tyto funkce:

- Nulování a resetování os
- Přepínání jednotek mm/inch
- Absolutní / inkrementální stupnice měření
- Poloha středu mezi dvěma body
- Kalkulačka
- Výpočet polohy děr na společné kružnici
- Výpočet souřadnic pro přibližnou výrobu radiusů
- Filtrace vibrací
- Funkce poloměr/průměr



Obrázek 32 Digitální rozhraní Hymseann typ SNS-2V

Cena setu, ve které je rozhraní a dvě pravítka s přesností 5 μm , a u kterých je možno volit rozměry 0 až 1000 mm, je 143 dolarů. (11.3.2020). [29]

Sino SNS6-2V

Tento konkrétní klon často nabízených odměřování je velmi rozšířený mezi hobby majiteli soustruhů, je proto možné dohledat mnoho návodů, tutoriálů a fór, která se zabývají instalací, provozem a vylepšováním.

Optické pravítko KA-500

Optické pravítko s přesností 5 μm prodejci nabízejí dodání s menšími rozměry průřezu pouzdra pravítka a jezdce.



Obrázek 33 Pravítko SINO KA-500

Digitální rozhraní SINO SNS6-2V

Digitální rozhraní používá stejné plastové pouzdro jako např. rozhraní Hymseann, liší se ovšem použitým softwarem.

Nabízí podobné funkce jako jeho konkurenti, jeho výhodou by měla být lépe řešená korekce na přechodech mezi značkami pravítka a nouzová paměť při odpojení zdroje (tvrdé vypnutí).



Obrázek 34 Digitální rozhraní SINO SDS6-2V

Cena setu rozhraní se dvěma pravítky s volitelnou délkou 70 mm až 520 mm je 389 dolarů (13.3.2020). [30]

YH800-2V

Oproti ostatním odměřovacím setům nabízí prodejce rozhraní s LCD displejem, který umožňuje lepší grafické zpracování výstupu, protože názvy funkcí nejsou uváděny zkratkou a při použití funkce, která vyžaduje zadání více parametrů, je přehlednější než sedmsegmentový systém. LCD displej může být potenciálně zranitelnější a může být hůře čitelný, pokud bude displej pozorován z ostřejšího úhlu.

Optické pravítko 5U

Optické pravítko s přesností 5 μm , prodejce nabízí za příplatek pravítka s přesností 1 μm a 0,5 μm .



Obrázek 35 Pravítko 5U

Rozhraní YH800-2V

Rozhraní nabízí stejné funkce jako Hymseann SNS-2V. Hlavním rozdílem je použití LCD displeje.



Obrázek 36 LCD Digitální rozhraní YH800-2V

Cena tohoto setu se dvěma pravítky s přesností 5 μm délky 50 mm až 1000 mm je 185 dolarů (22.3.2020). [31]

5.4 Shrnutí

Pro porovnání setů je kalkulováno s cenou za rozhraní a dvě pravítka stejné odměřované délky, která byla zvolena 520 mm

Ceny asijských setů jsou přepočítány podle kurzu 25,74 Kč za dolar (3.4.2020)

Tabulka 1 Porovnání cen setů digitálního odměřování pro soustruh

Porovnání cen setů				
	set (výrobce)	cena jednoho pravítka [Kč]	cena rozhraní [Kč]	cena setu [Kč]
Sety českých výrobců	SL1xx + ADL-2 (ESSA)	14800	15500	45100
	ENDURRO R500 + DELOS 2V (Limat)	5180	6750	17110
	lin. Mag. Pravítko + BC-2011 (Jirka a spol.)	5686	4592	15964
asijské sety	SNS-2V (HYMSEANN)	-	-	3681
	SNS6-2V (SINO)	-	-	10013
	YH800-2V	-	-	4762

6 Návrh digitalizace odměřování soustruhu SV18

Požadavky na digitální odměřovací systém

Pro zvolení konkrétního odměřovacího systému konvenčního obráběcího stroje je nutné předem stanovit základní požadované parametry:

-Jde o konstrukční řešení stroje, kolik souřadnic by mělo být digitálně odměřeno. Pro klasickou frézku bude vhodné odměření 3 os (x, y, z), pro soustruh bude vhodné odměřovat dvě osy (x, z). Může se také jednat o odměření pouze jedné osy např.: pro soustruh samotná osa x. V některých případech může být u soustruhu požadováno i odměřování polohy nožového suportu.

-Jaká je reálná přesnost stroje a k němu pak úměrně zvolit rozlišení pravítek.

-Jaké jsou možnosti montáže pravítek a senzorů - některá odměřování jsou speciálně konstruována na konkrétní typ stroje, aby bylo možné je snadno instalovat, s minimálním zásahem do stroje a na vhodné místo tak, aby systém byl co nejvíce chráněn před mechanickým poškozením, vlivy chladicí a řezné kapaliny a třískami. Umístění by také mělo co nejméně omezovat obsluhu, případně zabránit poškození při běžné manipulaci se strojem (upevňování obrobků, výměny a seřizování nástrojů, běžná údržba stroje).

-Odměřovací systémy je nutné napájet. Pokud není možné napájení přímo ze stroje, bude potřeba pořízení zdroje, vyřešit jeho umístění a obsluhování.

-V neposlední řadě je důležitý celkový rozpočet na úpravu stroje a čas nutný pro instalaci.

Je vhodné použít kompletní set od jedné firmy, tím je zaručena kompatibilita snímačů a displeje/ovládacího panelu.

Dnes jsou pro obráběcí stroje nejpoužívanější optické a inkrementální optické snímače, jejich rozlišení je dostatečné vzhledem k přesnosti strojů.

Soustruh SV-18

Hrotový soustruh SV 18 je u nás velmi rozšířený obráběcí stroj. Je možné narazit na velké množství různých variant a modifikací tohoto stroje. Díky rozšíření a oblibě tohoto stroje jsou dostupné náhradní díly. Mnoho firem se specializuje na modernizaci a generální opravy těchto strojů. Aktuálně bývá tento stroj používán na různé soustružnické práce, opravy a úpravy dílů, případně prototypovou a kusovou výrobu.



Obrázek 37 SV 18 R

Vzhledem k výkonnosti, přesnosti, robustní konstrukci a jednoduché obsluze lze předpokládat, že i v budoucnu bude stále využíván. Je proto vhodné se věnovat jeho modernizaci, například právě instalací digitálního odměřování.



Obrázek 38 SV 18 RA

Mnoho SV 18 již má dodatečně instalovaný systém odměřování, je tedy možné se inspirovat jejich řešením a případně navrhnout vylepšený systém upnutí a ochrany pravítek.

Konkrétní stroj, na který bude digitální odměřování instalováno je zkrácený SV 18 RA po generální opravě. Na stroji je instalován systém pro rychlou výměnu nástrojů multifix.



Obrázek 39 Zkrácený SV 18 RA

Parametry odměřování

Na soustruhu budou odměřovány dvě, osy a to podélného a příčného posuvu.

Hlavním omezením odměřování je v rozměrech pravítek a jejich umístění tak, aby byla dobře chráněna a funkčnost stroje byla co nejméně omezena.

Pro podélnou osu nebyly rozměry průřezu těla pravítka kritické, protože na zadní straně stroje je dostatek místa.

Pravítko pro příčnou osu je umístěno místo systému dorazu podélné osy. Musí projít pod nožovým suportem a umožnit jeho natočení pro výrobu kuželů. Pravítko bude zároveň ohroženo při neopatrné manipulaci s koníkem, bude se nacházet v prostoru, do kterého mohou padat třísky a stékat řezná emulze. Jeho rozměry by tedy měly být co nejmenší.



Obrázek 40 T drážka pro montáž příčného dorazu



Obrázek 41 Přední strana koníku poškozená neopatrnou manipulací

Po instalaci odměřování do T-drážky nebude možné používat doraz příčného suportu.

Délky pravítek

U podélné osy byla délka volena podle rozsahu pohybu suportu až k vřeteníku. Tím nebude odměřování omezovat při použití všech dostupných upínacích systémů obrobku.

U příčné osy jsme nejprve zvolili délku pravítka podle rozsahů pohybu. Při návrhu instalace jsme ovšem zvolili délku podle rozměru drážky, ve které bude připevněno, aby byla instalace a seřízení pravítka jednodušší.

Odměřovaná délka pro podélný suport je 650 mm, příčného suportu 420 mm.

Set SDS6-2V

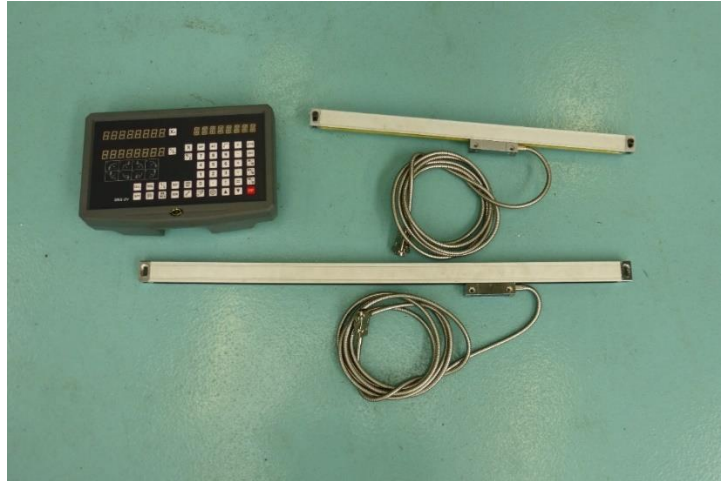
Pro odměřování jsem zvolil optické snímače a digitální rozhraní typ SNS6-2V.

Tento systém čínské výroby a jemu podobné klony jsou velmi často používány pro digitalizaci odměřování u středně velkých a hobby strojů.

System umožňuje odměřování na dvou osách. Výrobce uvádí přesnost pravítek 5 μm , ta je pro tento stroj zcela postačující, systém je snadno dostupný a levný. Je možné jednoduše sehnat jednotlivé komponenty, případně náhradní díly. Vzhledem k nízké ceně je ale výhodnější měnit v případě nutnosti celý komponent a tím se vyhnout časově náročným opravám.

Celková délka pravítka je podle výrobce o 152 mm delší než odměřovaná délka pravítka.

Cena celého setu byla 3640 Kč (27.11.2019)



Obrázek 42 Odměrovací systém SNS6 - 2V

Vedlejším cílem této práce bylo také ověřit vlastnosti levných odměrovacích systémů čínské výroby.

6.1 Návrh instalace

Umístění pravítka příčné osy

Pro upevnění pravítka do T drážky je potřeba vyrobit kameny s vnitřním závitem. Proti nim budou umístěny podložky, na které bude přímo doléhat pravítko. Při tomto způsobu instalace se spoléhá na přesnost celého suportu a drážky. Aby pravítko bylo podepřeno proti mechanickému zatížení, bude v mezeře mezi suportem umístěn pás přimontovaný do drážky pomocí kamenů. Na tento pás z horní strany potom bude možné přimontovat plechový okap, který zamezí stékání rezné kapaliny z přední i zadní strany pravítka.

Sonda bude přímo přimontovaná na suport na místo, kam se běžně montuje pohyblivá luneta. Pro šrouby sondy bude nutné na stroji udělat dvě díry se závitem.



Obrázek 43 Zadní strana suportu

Kabel od sondy bude procházet mezerou mezi pravítkem a suportem směrem na zadní stranu suportu. Měl by tak být dostatečně chráněn proti poškození.



Obrázek 44 Vedení kabelu pravítka příčného suportu

Umístění pravítka podélné osy

Pravítko podélné osy bude umístěno na zadní straně soustruhu na nálitky pro kuželové pravítko, které u tohoto stroje nejsou využity.



Obrázek 45 Zadní strana SV 18 RA

Protože by pravítko bylo při montáži přímo na stroj podepřeno pouze na koncích, mohlo by dojít k poškození při případném mechanickém zatížení. Celé pravítko bude proto připevněno na podpůrnou lištu.

Protože pravítko musí být umístěno sondou směrem dolů, kvůli správné funkci těsnící manžety, bude sonda spojena se suportem pomocí ramene, které projde za zadní stranou podpůrné lišty. Celá podpůrná deska bude sloužit jako montáž pro okap. Rameno se bude skládat z kostky, která bude přimontována přímo na suport a desky, která ze zadní strany podpůrné lišty spojí kostku se sondou.

Na stroji bude potřeba zhotovit dvě díry se závitem na nálitcích a dvě díry na zadní straně suportu pro montáž kostky.

Umístění uživatelského rozhraní

Uživatelské rozhraní bude instalováno na rameni na elektrickou skříň stroje. Kabel napájení tak bude možné připojit přímo na elektrickou skříň a displej by neměl překážet při upínání a manipulaci s nářadím a jinými předměty v okolí vřetene.

7 Realizace digitálního odměřování konvenčního soustruhu

7.1 Výroba dílů pro instalaci digitálního odměřování

Tabulka 2 Vyrobené díly a polotovary

seznam vyrobených dílů				
		počet kusů [1]	polotovar	materiál
Příčná osa	kámen	6	20x20x100	dural
	podložka	2	30x16x100	dural
	pás	1	TYČ PLOCHÁ 30X10 ČSN 42 5522	konstrukční ocel
	nárazník	1	TYČ KRUHOVÁ $\varnothing 20$ ČSN 42 5510	dural
	krycí okap	1	800x65	nerezový plech tl. 0,8 mm
Podélná osa	podpůrná lišta	1	L 60 x 6 ČSN 42 5541	konstrukční ocel
	kostka	1	80x90x60	dural
	deska	1	90x90x10	dural
	podložka	1	90x35x10	dural
	krycí okap	1	1200x65	nerezový plech tl. 0,8 mm

10.1.1 Příčná osa

Pro montáž pravítka do T drážky bylo vyrobeno pět kamenů se závitem z duralu. Dva slouží k připevnění pravítka, zbytek k připevnění pásu do mezery mezi pravítkem a suportem. Dvě podložky pod pravítko, pás, o který se pravítko opře zadní stranou a krycí okap. Pro ochranu pravítka byl vyroben nárazník proti nabourání koníkem.

Výroba kamenů

Při výrobě kamenů byl nejprve vyfrézován hranolek s čtvercovým profilem. Vrtání, výroba závitu a dělení pak bylo provedeno na soustruhu se čtyřčelistovým sklíčidlem. Protože díra v kameni je průchozí, bylo možné práci zrychlit použitím strojního závitníku a závit vyrobít během jedné operace.



Obrázek 46 Výroba kamenů se závitem

Podložky pravítka jsou z duralu ve tvaru písmene T a opírají se o čelo T-drážky. Jednu podložku bylo nutné ze strany zmenšit, aby pod ní prošel kabel sondy, na tento problém se přišlo až při samotné instalaci.

Výroba podložek

Profil podložek byl nejprve vyfrézován, poté byl rozdělen na pásové pile, obrobena čela a vyvrtány díry pro šroub.

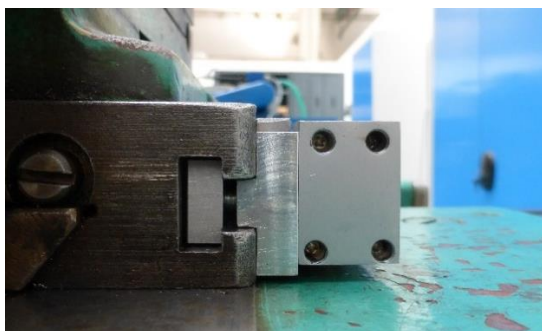


Obrázek 47 Výroba podložek

Fréza z rychlořezné oceli se čtyřmi břity, použitá pro výrobu, měla průměr 20 mm. Pro frézování byly nastaveny otáčky 450 ot./min. Pro hrubování byl posuv 112 mm/min a hloubka řezu 2 mm, při dokončování pak 56 mm/min a hloubka řezu 0,3 mm.



Obrázek 48 Podložky



Obrázek 49 Systém připevnění pravítka příčného posuvu v T drážce

Výroba pásu

Pás je vyroben z ocelové tyče obdélníkového průřezu 30x10x450 mm. Nejprve byly obrobeny strany tak, aby se pás vešel do mezery za pravítkem. Délka pásu byla upravena podle vzdálenosti mezi podložkami, aby vyplnila prostor mezi nimi. Do pásu budou vyvrtány díry se závitem pro připevnění krycího okapu.



Obrázek 50 Pás

Výroba krycího okapu

Okap byl vyroben z pásu nerezového plechu tloušťky 0,8 mm. Ten byl nejprve podélně ohnut o 90°, po instalaci celé sestavy zkrácen, ohnut a zalepen dvousložkovým lepidlem tak, aby překryl boky pravítka. Nakonec byly vyrobeny průchozí díry současně s dírami v pásu, na který se kryt upíná. Stříhání plechu bylo provedeno na tabulových nůžkách. Při ohýbání bylo nutné použít přípravky, aby bylo možné vyrobit rohy celého okapu.



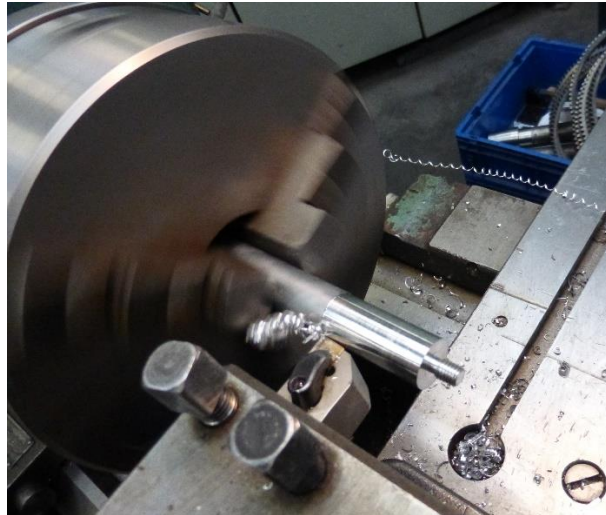
Obrázek 51 Krycí okap



Obrázek 52 Detail rohu okapu a lepeného spoje

Výroba nárazníku koníku

Nárazník byl vyroben na soustruhu z duralové tyče. Závit na konci byl vyroben závitovým očkem a na vnějším průměru je vroubkování pro snadnější dotažení rukou při montáži.



Obrázek 53 Výroba nárazníku koníku



Obrázek 54 Nárazník koníku



Obrázek 55 Vůle vymezená nárazníkem mezi koníkem a suportem

10.1.2 Podélná osa

Pro podélnou osu byla vyrobena podpůrná lišta, kostka pro montáž na suport, deska na spojení kostky se sondou a podložka mezi sondu a desku.

Podpůrná lišta

Podpůrná lišta byla vyrobena z ocelového L profilu 60x6 (L 60 x 6 ČSN 42 5541). Výroba byla náročnější, protože délka lišty je 1050 mm a rozsah posuvu frézky pouze 880 mm. Obrobek tedy bylo nutné upínat přímo na stůl stroje a pro obrobek celé délky měnit upnutí v průběhu výroby.

Byla obrobena obě ramena profilu a plocha, na kterou dosedá pravítko. Na koncích lišty byly vyrobeny průchozí díry pro montáž na stroj. Výroba děr se závitem pro pravítko byla provedena později po definitivním určení polohy pravítka vůči stroji.



Obrázek 56 Výroba podpůrné lišty, systém upnutí obrobku



Obrázek 57 Výroba podpůrné lišty

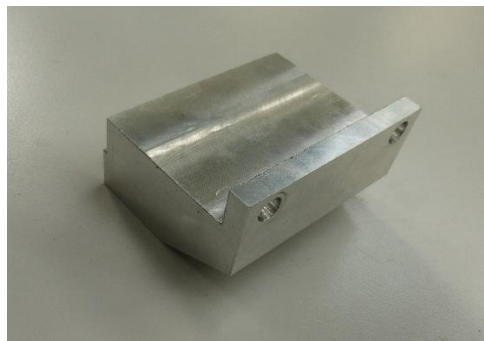
Byla použita fréza o průměru 40 mm s pěti vyměnitelnými břitovými destičkami. Otáčky vřetene 560 ot./min, posuv 224 mm/min, hloubka řezu 1,5 mm. Při obrábění ramen profilu bylo nutné používat okraj frézy a frézovat sousledně, aby se zmenšily vibrace a obrobek byl nástrojem tlačěn proti upnutí.



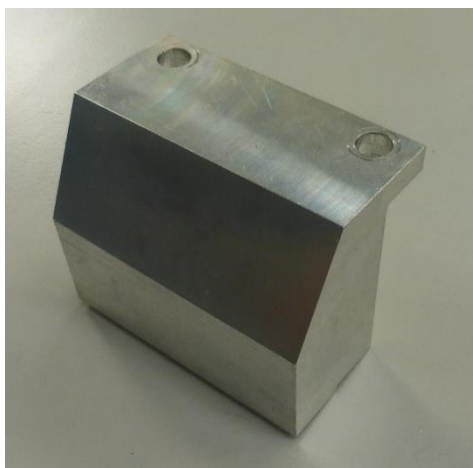
Obrázek 58 podpůrná lišta

Výroba kostky a desky

Kostka a deska byly vyrobeny z duralu. Kostka byla vyrobena z bloku. Nejprve byl vyfrézován prostor, kterým doléhá na suport, poté byla upravena strana, na kterou dosedá deska, vyrobeny dvě průchozí díry pro montáž na suport a dvě díry se závitem pro montáž desky. Nakonec bylo vyfrézováno zkosení z přední strany pro odlehčení celého dílu.

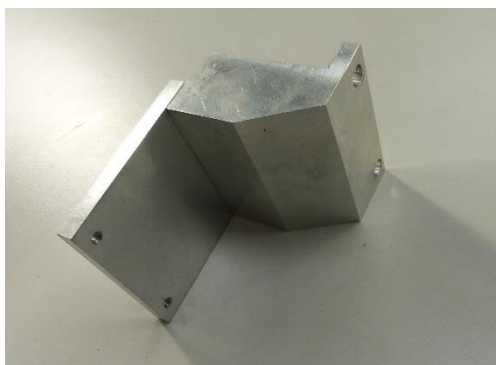


Obrázek 59 Kostka



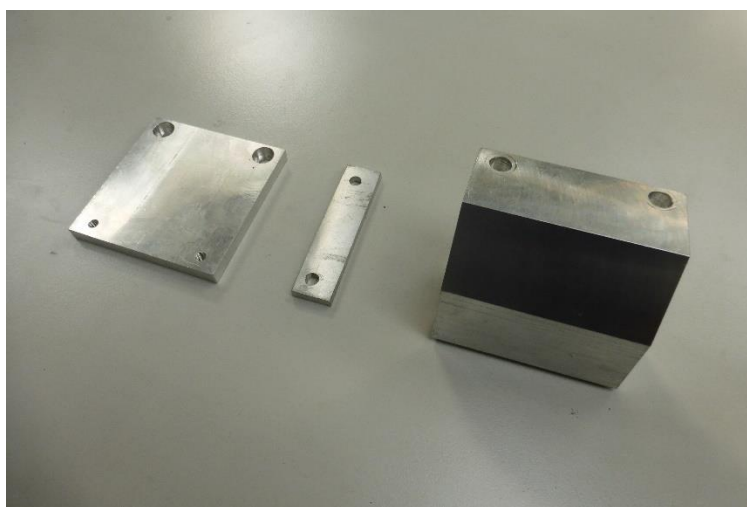
Obrázek 60 Spodní strana kostky

Deska byla vyrobena z plochého profilu a obrobena z obou stran. Následně byly zhotoveny dvě díry se zahloubením pro šroub s válcovou hlavou pro montáž na kostku a dvě díry se závitem pro připevnění sondy.



Obrázek 61 Kostka s přimontovanou deskou

Při výrobě byla použita fréza s 10-ti vyměnitelnými břitovými destičkami o průměru 100 mm, za otáček 220 ot./min a o posuvu 56 mm/min, hloubka řezu 0,5 mm. Drsnost povrchu naměřená dílenským drsnoměrem Mahr byla Ra 0,412.



Obrázek 62 Kostka s deskou a podložkou pod jezdce

Výroba krycího okapu

Okap, který zároveň slouží jako kryt byl vyroben z nerezového plechu tloušťky 0,8 mm. Konce byly ohnuty o 90°, aby překryly konce podpůrné lišty. Díry se závitem v liště a průchozí díry v plechu pro připevnění šrouby M4 byly vyrobeny současně, aby byla zaručena souosost. Díry z čela byly vyvrtány na stolní vrtačce, díry na koncích musely být vrtány ruční vrtačkou, protože nebyla jiná možnost upnutí dlouhé lišty.



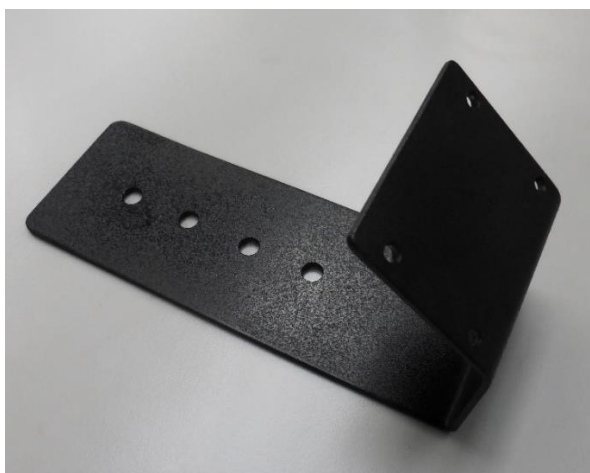
Obrázek 63 Krycí okap

Připevnění výstupního rozhraní

Rozhraní bude umístěno na rameni, které se připevní na horní stranu elektrické skříně.

Výroba ramena

Rameno bylo vyrobeno z ocelového pásu 75x400x3 mm. Na jednom konci byly nejprve vyvrtány čtyři díry o průměru 4,5 mm pro montáž na zadní stranu rozhraní. Poté byl celý pás ohnut na dvou místech - nejprve o 45° hned za dosedací plochou na rozhraní, poté o 90° 50 mm za předchozím ohybem. Vzdálenost mezi ohyby bude určovat výšku, ve které se bude rozhraní nacházet a zároveň musí umožnit přístup imbusovým klíčem ke šroubům M4.



Obrázek 64 Rameno výstupního rozhraní

Poloha díry pro šroub M8 byla určena až podle finálního doladění polohy rozhraní. Pro jistotu byly vyvrtány 4 díry s rozstupem 30 mm, aby se dala poloha podle potřeby obsluhy upravit.

7.2 Montáž odměřovacího systému

Montáž odměřování příčného suportu

Do T-drážky na zadní stranu suportu se pomocí kamenů a šroubů M6 přimontuje pás.

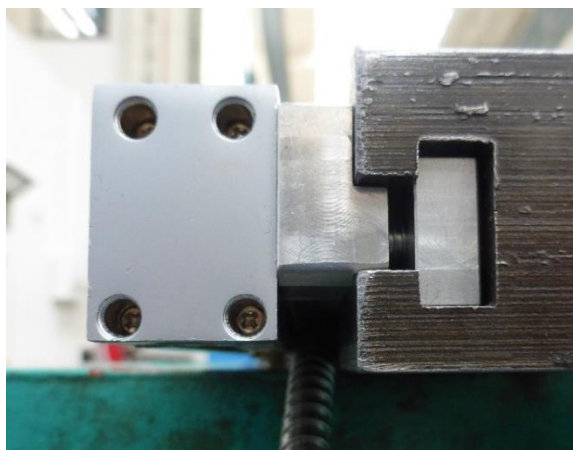


Obrázek 65 Montáž pásu

Následně je připevněno pravítko pomocí šroubů M6, dvou kamenů a podložek. Na zadní straně je umístěna zmenšená podložka, pod kterou prochází kabel sondy. Po připevnění sondy na nepohyblivou část suportu se pomocí úchylkoměru upraví poloha pravítka, aby bylo umístěno rovnoběžně se směrem pohybu suportu.



Obrázek 66 Montáž pravítka



Obrázek 67 Detail zadní, zmenšené podložky a vedení kabelu

Do díry se závitem M8 je namontován nárazník koníka a potom připevněn jezdec pravítka k suportu.



Obrázek 68 Montáž nárazníku koníka

Celá sestava je následně zakryta ochranným okapem, který je připevněn na pás.



Obrázek 69 Montáž ochranného okapu

Montáž odměřování podélného suportu

Na suport se připevní kostka s namontovanou deskou.



Obrázek 70 Montáž kostky s deskou

Poté je instalována podpůrná lišta a na ní pravítko. Jeho výškové nastavení se upraví pomocí úchylkoměru, aby bylo pravítko rovnoběžné se směrem pohybu suportu.



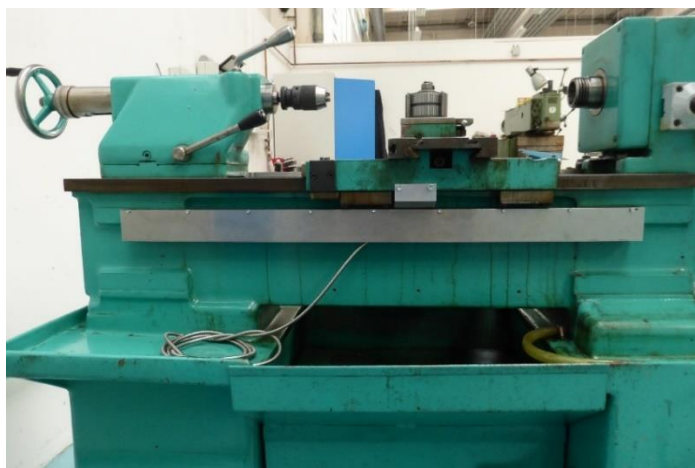
Obrázek 71 Montáž podpůrné desky a pravítka

Následně je připevněna sonda k desce pomocí šroubů M6 a podložky.



Obrázek 72 Montáž jezdce a podložky

Celá sestava je zakrytována krycím okapem přimontovaným šrouby M4 do podpůrné lišty.



Obrázek 73 Montáž zakrytování

Montáž výstupního rozhraní

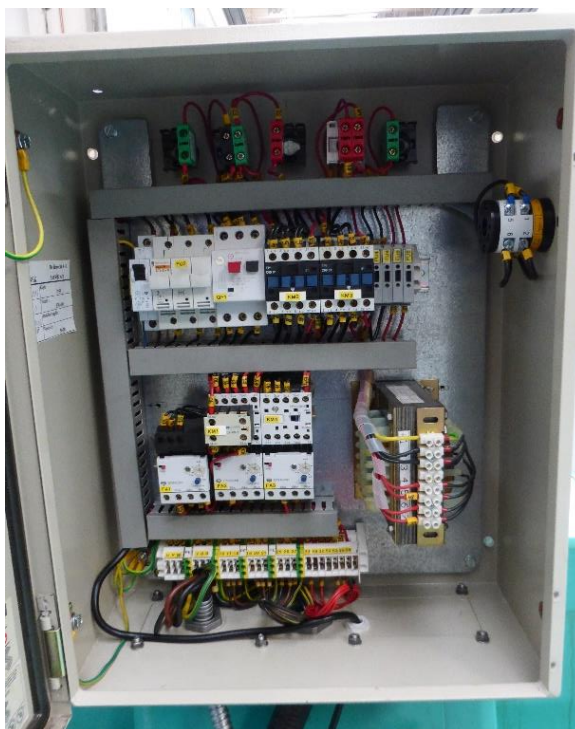
Rozhraní je přimontováno šrouby M4 na rameno, které je připevněno jedním šroubem M8, maticí a podložkami ke elektrické skříni. Natočení ramene a celého rozhraní je nastaveno podle potřeby obsluhy a aretováno dotažením šroubu M8.



Obrázek 74 Montáž výstupního rozhraní

Montáž kabeláže a napájení systému

Celý systém je napájen střídavým proudem o napětí 240 V přímo z elektrické skříně. Do ní byl instalován samostatný jistič pro odměřovací systém. Rozhraní se zapíná hlavním vypínačem stroje, kabel napájení je veden ze zadní strany skříně a vstupuje do ní přes plastovou průchodku na spodní straně.



Obrázek 75 Elektrická skříň stroje



Obrázek 76 Instalovaný jistič digitálního odměřování (vlevo)



Obrázek 77 Instalovaná plastová průchodka napájecího kabelu

Signální kabely od pravítek jsou pomocí plechových objímek připevněny na zadní stranu stroje. Jejich volná délka od poslední objímky je nastavena tak, aby kabel nemohl být poškozen při pohybu přes celý rozsah stroje, zároveň aby se kabely nezamotaly a nebránily obsluze při odstraňování třísek z vany.



Obrázek 78 Připevnění kabelů na zadní straně stroje

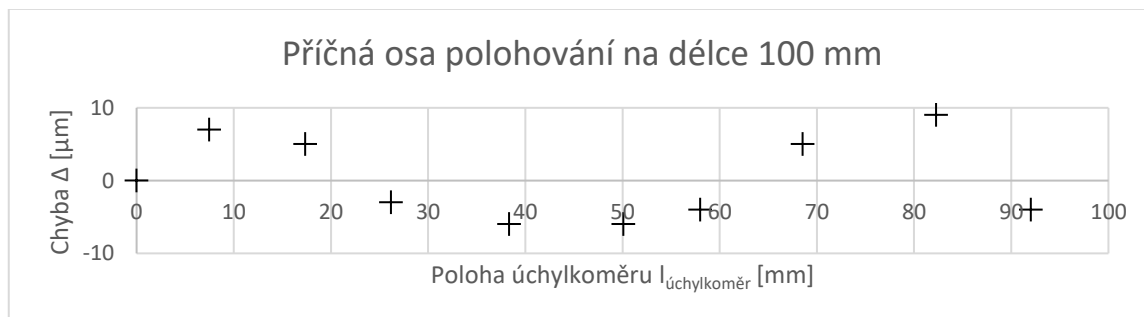
10.2.1 Ověření přesnosti odměřování

Pro zjištění přesnosti odměřovacího systému byla provedena tři měření polohování. Tabulky s naměřenými daty jsou v příloze 1.

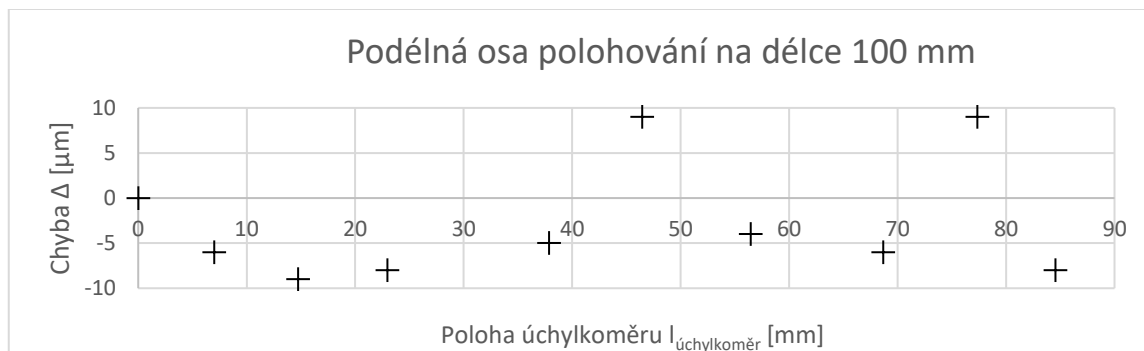
Polohování na délce 100 mm

První měření bylo polohování na délce 100 mm. K měření byl použit digitální úchylkoměr s odměřovanou délkou 100 mm a rozlišením 1 μm , Podle kalibračního listu je maximální chyba měřidla 3 μm . Rozlišení 1 μm je dostatečné k ověření přesnosti odměřování na běžných pracovních vzdálenostech, protože rozlišení pravítek je 5 μm .

Ručně byla náhodně nastavena poloha přibližně po 10 mm, následně byla vypočtena chyba oproti úchylkoměru. Výsledky byly vyneseny do grafu.



Obrázek 79 Chyba při polohování na 100 mm příčná osa



Obrázek 80 Chyba při polohování na 100 mm podélná osa

Průměrná chyba byla 4,9 μm pro příčnou osu a 6,4 μm pro podélnou osu, maximální chyba v obou případech byla 9 μm .

V tomto měření se projevila přesnost upevnění pravítka, jeho případný sklon a zvlnění.



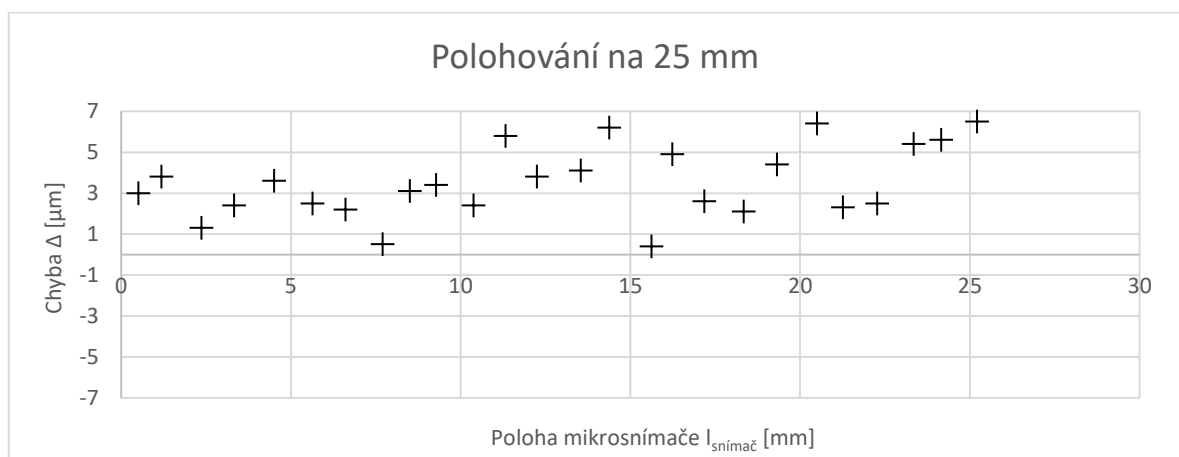
Obrázek 81 Měření polohování digitálním úchylkoměrem

Polohování na délce 25 mm

Druhé měření bylo polohování na délce 25 mm. Nastavované hodnoty byly opět náhodné po přibližně 1 mm

K měření byl použit kapacitní mikrosnímač ESSA SM 30.61-2.5-CA9 s rozhraním MIKRONEX SN 600.X. Zařízení je schopné měřit s přesností na 0,1 μm , což je o řád větší přesnost než u instalovaného odměřovacího systému.

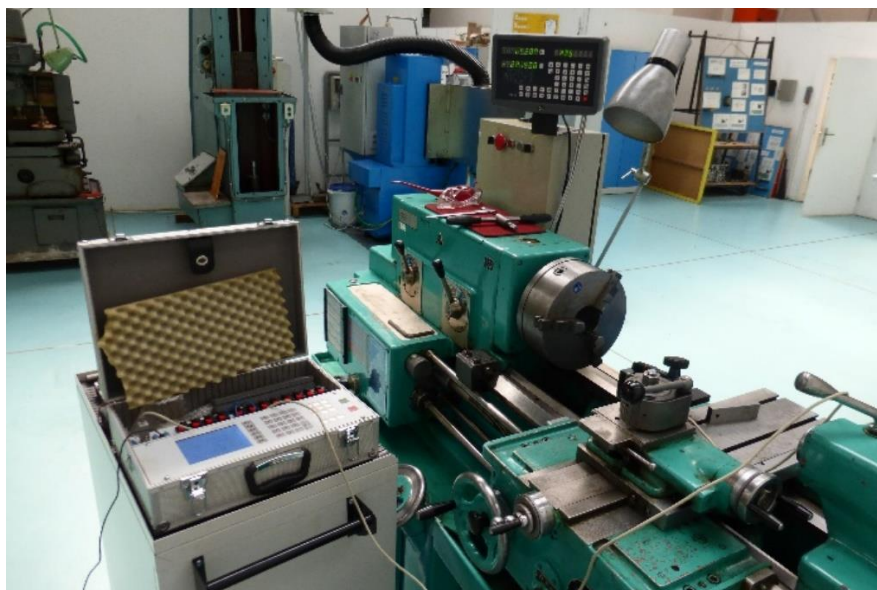
Měření proběhlo pouze na příčné ose, protože na ní je požadována větší přesnost než na podélné ose. Byla vypočtena chyba odměřování oproti mikrosnímači, výsledky byly zaneseny do grafu.



Obrázek 82 Chyba při polohování na 25 mm

Průměrná chyba byla 3,5 μm , maximální chyba 6,5 μm .

Při odměřování na 25 mm se přesnost upevnění pravítka projeví jen minimálně. Toto měření proto vypovídá o přesnosti pravítka při odměřování přesnějších pracovních rozměrů.



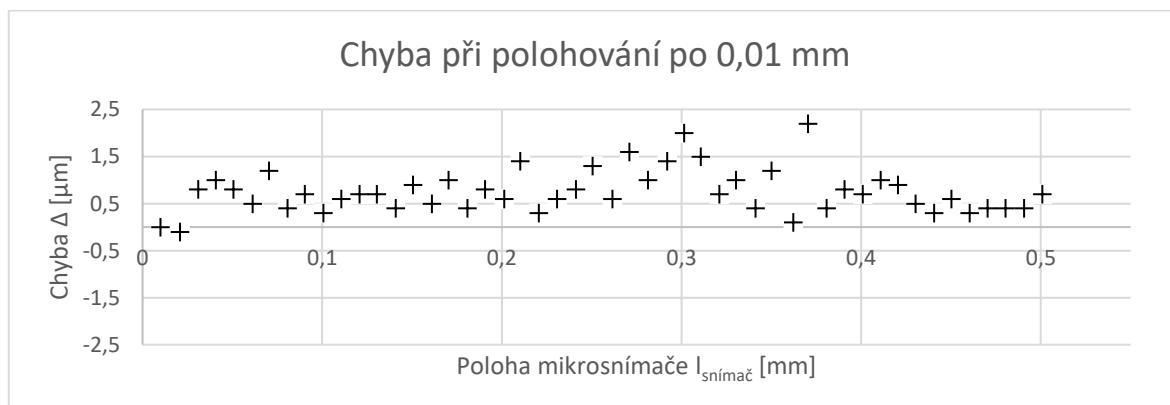
Obrázek 83 Měření polohování pomocí kapacitního mikrosnímače a rozhraní

Polohování na délce 0,5 mm

Při tomto měření byl opět použit kapacitní mikrosnímač a rozhraní. Polohování proběhlo na délce 0,5 mm po 0,01 mm. Z naměřených dat byla vypočtena chyba měření oproti mikrosnímači a výsledky byly zaneseny do grafu.



Obrázek 84 Umístění kapacitního mikrosnímače při měření



Obrázek 85 Chyba při polohování na 0,5 mm

Průměrná chyba byla 0,757 μm , maximální chyba byla 2,2 μm .

Měření po 0,01 mm ověřuje rozlišení pravítka, přesnost rastru a inkrementálního senzoru.

10.2.2 Kalkulace ceny instalace setu

Kromě setu bylo nutné v průběhu realizace pořídit ještě jedno pravítko jiné délky, polotovary na výrobu dílů a spojovací materiál a jiné drobné příslušenství. Některé polotovary byly použity ze zásob Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie. Přibližná kalkulace jejich ceny je proto podle internetové nabídky dodavatelů hutních materiálů.

Ceny ocelových polotovarů z faktury od firmy CONDOR, ceny hliníkových polotovarů podle portálu ehliník.cz (18.4.2020)

Tabulka 3 Kalkulace ceny realizace digitálního odměřování

Kalkulace ceny instalace setu digitálního odměřování na soustruh SV 18 RA					
	položka	rozměr	Cena bez DPH [Kč]	Cena vč. DPH [Kč]	
	Set SNS6-2V	-	-	3640	
	optické pravítko 420 mm	-	-	1650	
polotovary	ocel	TYČ PLOCHÁ 30X10 ČSN 42 5522	1,46 m	36,13	43,72
		L 60 x 6 ČSN 42 5541	0,6 m	203,44	246,16
	Hliník	TYČ PLOCHÁ 20x20	100 mm	13,2	15,97
		TYČ PLOCHÁ 30x20	100 mm	19,58	23,69
		TYČ PLOCHÁ 80x80	100 mm	227,51	275,29
		TYČ PLOCHÁ 90x10	150 mm	43,56	52,71
		Nerezový plech 0,8 mm	1000x2000 mm	-	1675,03
		spojovací materiál	-	-	250
	plastová průchodka	-	-	13	
			celková cena	7885,57	

Do ceny není započtená cena práce. Časová náročnost byla v mém případě zhruba 150 hodin. Bylo to ovšem způsobeno tím, že některé díly bylo nutné upravovat dle potřeby v průběhu práce. Pokud by se měl stejný set nyní instalovat na další stroj, realizace by zabrala méně čas.

8 Závěr

Při odměřování polohy pohyblivých částí obráběcích strojů je možné přímo odměřovat vzdálenost nebo úhel natočení, případně nepřímo určit vzdálenost z úhlu natočení pohybového šroubu. Odměřování probíhá vždy v souřadném systému, který je definován podle konstrukce stroje.

Digitalizace odměřování je realizována pomocí snímačů. Ty se dělí podle konstrukce, fyzikálního principu funkce a typu výstupu. Pro měření vzdáleností se nejčastěji používají optické a optické inkrementální snímače, případně odporové nebo kapacitní snímače. Skládají se ze sondy a lineárního pravítka. Pro měření úhlů se používají resolyvery a optické nebo optické inkrementální snímače, ty se skládají ze sondy a otočného disku.

Digitální odměřování polohy je využíváno u výrobních CNC strojů. V metrologii a kontrole kvality u souřadnicových měřících strojů, případně u speciálních přípravků pro kontrolu rozměrů. Pro modernizaci konvenčních obráběcích strojů se instaluje digitální odměřování s rozhraním, na kterém se přímo zobrazuje číselná hodnota odměřované polohy pro obsluhu stroje.

Pro realizaci digitálního odměřování na konvenčním soustruhu je nutné pořízení dvou pravítek pro odměřování polohy příčného a podélného suportu a výstupní rozhraní pro obsluhu. Je vhodné pořídit celý set od jednoho výrobce, aby byla zaručena kompatibilita komponent.

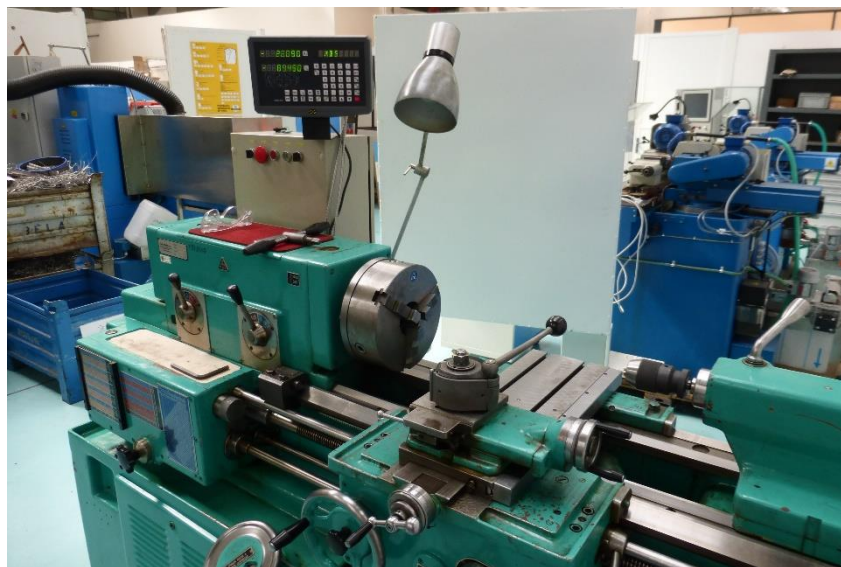
Výrobou těchto setů se zabývá několik tuzemských firem. Na asijském trhu je ale možné sehnat obdobné sety za násobně nižší cenu. Ceny se liší podle typu snímačů, délky, kterou jsou schopny odměřovat, podle jejich odolnosti a podle uživatelského rozhraní, počtu odměřovaných os, jeho přídatných funkcí apod.

Pro digitalizaci odměřování konvenčního soustruhu SV 18 jsem zvolil set SNS6-2V podle údajů prodejce by měl mít rozlišení 5 μm , což plně postačuje vzhledem k přesnosti stroje.

Na instalaci pravítek a uživatelského rozhraní bylo nutné vyrobit několik dílů. Při jejich návrhu byl kladen důraz na odolnost, ochranu celého systému a minimální omezení funkčnosti stroje. Realizace byla časově poměrně náročná (zhruba 150 hodin). Instalace podobného systému tímto způsobem na jiné soustruhy SV 18 by nyní byla mnohem rychlejší. Výsledná cena celé instalace bez započítání práce je 7886 Kč.



Obrázek 86 Soustruh SV 18 RA s instalovaným digitálním odměřováním



Obrázek 87 Soustruh SV 18 RA s instalovaným digitálním odměřováním

Po nainstalování jsme ověřili funkčnost systému. Bylo provedeno několik měření přesnosti polohování. Měření proběhla na různých délkách a s různým krokem.

První měření bylo pro příčnou i podélnou osu na 100 mm s krokem 10 mm pomocí digitálního úchylkoměru s rozlišením 1 μm . Cílem měření bylo ověřit přesnost umístění pravítka. Maximální chyba byla 9 μm , průměrná chyba 4,9 μm pro příčnou osu a 6,4 μm pro podélnou osu. Naměřené hodnoty mohou být způsobeny nakloněním nebo zvlněním pravítka. Současně mohou být výsledky zatíženy chybou úchylkoměru, která je podle kalibračního listu měřidla 3 μm .

Druhé měření příčné osy bylo na 25 mm s krokem 1 mm pomocí kapacitního mikrosnímače a rozhraní MICRONIC s rozlišením 0,1 μm . Cílem měření bylo zjištění přesnosti odměřování pro běžné pracovní rozměry. Maximální chyba byla 6,5 μm , průměrná chyba 3,5 μm .

Třetí měření příčné osy bylo na 0,5 mm s krokem 10 μm opět pomocí kapacitního snímače a rozhraní. Cílem měření bylo ověřit rozlišení pravítka. Maximální chyba byla 2,2 μm , průměrná chyba 0,757 μm .

Podle výsledků měření rozlišení pravítek na malých rozsazích odpovídá parametrům udávaných prodejcem. Přesnost instalovaného setu je dostatečná pro tento stroj.

Dále by v budoucnu bylo možné ještě pravítka rozebrat a posoudit také zpracování skleněného pásu, rastru a umístění snímačů inkrementálního čidla.

Stroj s instalovaným digitálním odměřováním bude nyní využíván v halových laboratořích ČVUT. Systém se bude v případě potřeby optimalizovat podle budoucích poznatků v průběhu provozu. Pokud se set osvědčí, bude možné instalovat podobné sety i na další stroje v halových laboratořích ČVUT.

9 Seznam použité literatury a zdrojů

- [1] Šindelář, Václav; Tůma, Zdeněk. Metrologie – její vývoj a současnost. Praha: Česká metrologická společnost Praha, 2002. 384 s.
- [2] *Mach3 CNC Controller Software Installation and Configuration* [online]. [cit. 2020-02-28]. Dostupné z: Mach3 CNC Controller Software Installation and Configuration
- [3] *Lineární snímače SL xx* [online]. [cit. 2020-02-28]. Dostupné z: <https://www.essapraha.cz/linearni-snimace-technicky-popis> [4] [online]. [cit. 2019-10-05]. Dostupné z: <https://www.essapraha.cz/rotacni-snimace-technicky-popis>
- [5] *Position sensors* [online]. [cit. 2020-02-28]. Dostupné z: <https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/92303/course/section/17114/Ch6%20-%20Position%20sensors.pdf>
- [6] *Optický inkrementální senzor* [online]. [cit. 2020-02-28]. Dostupné z: <http://senzory.aspone.cz/ois.htm>
- [7] *Linear Encoders with Single-Field Scanning* [online]. [cit. 2020-02-28]. Dostupné z: https://www.heidenhain.us/enews/stories_0712/main-el.php
- [8] *Limat ENDURRO R* [online]. [cit. 2019-11-13]. Dostupné z: <http://www.limat.cz/index.php?navi=3&Prod=20>
- [9] *Limat O firmě* [online]. [cit. 2019-11-13]. Dostupné z: <http://www.limat.cz/index.php?navi=1>
- [10] *Limat Delos 2V LED* [online]. [cit. 2019-11-13]. Dostupné z: <http://www.limat.cz/index.php?navi=3&Prod=39>
- [11] *Quick Change Tool Post* [online]. [cit. 2020-02-28]. Dostupné z: <https://www.tormach.com/store/index.php?app=ecom&ns=prodshow&ref=33272>
- [12] *Tabulka krytí IP* [online]. [cit. 2020-02-28]. Dostupné z: <https://elektrika.cz/data/clanky/krip030918>
- [13] *Odměřovací systémy a jejich vliv na přesnost* [online]. [cit. 2020-02-28]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/odmerovaci-systemy-a-jejich-vliv-na-presnost.htm>
- [14] *Ceník Limat* [online]. [cit. 2020-02-28]. Dostupné z: https://www.limat.cz/img/upload/cenik_13281386.pdf
- [15] *RAC LVDT snímač* [online]. [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: <https://www.megatron.cz/rac>

- [16] *Resolver* [online]. [cit. 2020-03-08]. Dostupné z:
<https://www.reissmann.com/en/products/cable-technology/resolver.html>
- [17] *Magnetické snímače polohy* [online]. [cit. 2020-03-08]. Dostupné z:
<https://fokusindustry.cz/i?/Pr%C5%AFmyslov%C3%A9+sn%C3%ADma%C4%8De/magnetick%C3%A9+sn%C3%ADma%C4%8De+polohy>
- [18] *Digitální odměřování* [online]. [cit. 2020-03-08]. Dostupné z:
<http://tomaskrejci.eu/digitalni-odmerovani/>
- [19] *Souřadnicové měřící stroje* [online]. [cit. 2020-03-08]. Dostupné z:
<http://www.ksa.tul.cz/getFile/id:2522>
- [20] *ESSA s.r.o. o firmě* [online]. [cit. 2020-03-08]. Dostupné z:
<https://www.essapraha.cz/o-firme>
- [21] *Lineární snímače SL1xx* [online]. [cit. 2020-03-08]. Dostupné z:
<https://www.essapraha.cz/sl-1xx>
- [22] *Ceník snímačů SL1xx* [online]. [cit. 2020-03-08]. Dostupné z:
https://www.essapraha.cz/public/soubory/editor/files/Cenik_50_SL_1xx.pdf
- [23] *Číslíková indikace ADL 2, ADL 3* [online]. [cit. 2020-03-08]. Dostupné z:
<https://www.essapraha.cz/cislicova-identifikace-adl-2-adl-3>
- [24] *Jirka a spol., s.r.o.* [online]. [cit. 2020-03-08]. Dostupné z:
<https://www.odmerovani.cz/>
- [25] *Lineární magnetické pravítko* [online]. [cit. 2020-03-08]. Dostupné z:
<https://www.odmerovani.cz/product/linearni-magneticke-pravitko-1>
- [26] *Digitální indikace BC-2011* [online]. [cit. 2020-03-08]. Dostupné z:
<https://www.odmerovani.cz/product/digitalni-indikace-rady-bc-2011>
- [27] *Technologie obrábění, Používané CNC stroje* [online]. [cit. 2020-04-01].
Dostupné z: <http://technologie.fs.cvut.cz/provide/obraben>
- [28] *ZEISS ACCURA* [online]. [cit. 2020-04-01]. Dostupné z:
<https://www.zeiss.com/metrology/products/systems/coordinate-measuring-machines/bridge-type-cmms/accura.html#technicaldata>
- [29] *Hymseann SNS-2V* [online]. [cit. 2020-04-01]. Dostupné z:
https://www.aliexpress.com/item/32903464663.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.5c317b2bEcqwE0&algo_pvid=d22e0e1e-f934-4b6b-8e05-f9b0482fc470&algo_expid=d22e0e1e-f934-4b6b-8e05-f9b0482fc470-15&btsid=0ab6fa8115857424433986101e98df&ws_ab_test=searchweb0_0,searchweb201602_,searchweb201603_
- [30] *Sino SDS6-2V* [online]. [cit. 2020-04-01]. Dostupné z:
https://www.aliexpress.com/item/4000479542385.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.5c317b2bEcqwE0&algo_pvid=d22e0e1e-f934-4b6b-8e05-

f9b0482fc470&algo_expid=d22e0e1e-f934-4b6b-8e05-f9b0482fc470-9&btsid=0ab6fa8115857424433986101e98df&ws_ab_test=searchweb0_0,searchweb201602_,searchweb201603_

- [31] *Set YH800-2V* [online]. [cit. 2020-04-01]. Dostupné z: https://www.aliexpress.com/item/4000100270056.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.67f41454P1F6d0&algo_pvid=829bf952-14a3-426f-8267-ae2657bdfad5&algo_expid=829bf952-14a3-426f-8267-ae2657bdfad5-10&btsid=0b0a187915857467086861876ef749&ws_ab_test=searchweb0_0,searchweb201602_,searchweb201603_

Seznam obrázků tabulek a příloh

Seznam obrázků:

Obrázek 1 Rozdělení odměřování.....	8
Obrázek 2 Nepřímé odměřování délky přes natočení osy krokového motoru [13].....	9
Obrázek 3 Rozdělení snímačů polohy.....	11
Obrázek 4 Odporový snímač polohy [5]	12
Obrázek 5 Magnetický snímač polohy [18]	12
Obrázek 6 Indukční LVDT snímač RAC [15].....	12
Obrázek 7 Příklad statické charakteristiky LVDT senzoru [5]	13
Obrázek 8 Schéma funkce LVDT senzoru [5]	13
Obrázek 9 Výstup resolveru pro natočení 0°[5]	13
Obrázek 10 Výstup resolveru pro natočení 90° [5]	13
Obrázek 11 Resolver [16].....	14
Obrázek 12 Schéma kapacitního senzoru se změnou vzdálenosti desek [5]	14
Obrázek 13 Příklad změny kapacity v závislosti na vzdálenosti desek [5].....	14
Obrázek 14 Princip funkce optického snímače [7]	15
Obrázek 15 Princip lineárního inkrementálního snímače [5]	16
Obrázek 16 Inkrementální čidlo natočení [5]	16
Obrázek 17 Přívod stlačeného vzduchu do snímače [13].....	17
Obrázek 18 Soustruh Optimum s digitálním odměřováním.....	18
Obrázek 19 Nožová hlava se systémem rychlé výměny nástroje multifix	18
Obrázek 20 Nožová hlava se systémem rychlé výměny nástroje s rybinovou drážkou [11].....	19
Obrázek 21 CNC Soustruh OKUMA Genos L200E-M [27]	19
Obrázek 22 Souřadnicový měřicí stroj ZEISS Accura [28]	20
Obrázek 23 Přípravek pro kontrolu délky.....	21
Obrázek 24 Pevná čelist přípravku	21
Obrázek 25 Lineární snímač SL1xx.....	23
Obrázek 26 Číslicová indikace ADL-2 [23].....	23
Obrázek 27 Snímač Limat ENDURRO [8].....	24
Obrázek 28 Limat Delos 2V LED [10].....	25
Obrázek 29 Lineární magnetické pravítko	25
Obrázek 30 Digitální indikace BC-2011.....	26
Obrázek 31 Snímač NTS-M s okapem	27
Obrázek 32 Digitální rozhraní Hymseann typ SNS-2V	27
Obrázek 33 Pravítko SINO KA-500	28
Obrázek 34 Digitální rozhraní SINO SDS6-2V.....	28
Obrázek 35 Pravítko 5U	29
Obrázek 36 LCD Digitální rozhraní YH800-2V	29
Obrázek 37 SV 18 R.....	32
Obrázek 38 SV 18 RA.....	32
Obrázek 39 Zkrácený SV 18 RA	33

Obrázek 40 T drážka pro montáž příčného dorazu	33
Obrázek 41 Přední strana koníku poškozená neopatrnou manipulací.....	34
Obrázek 42 Odměřovací systém SNS6 - 2V	35
Obrázek 43 Zadní strana suportu	35
Obrázek 44 Vedení kabelu pravítka příčného suportu	36
Obrázek 45 Zadní strana SV 18 RA.....	36
Obrázek 46 Výroba kamenů se závitem	38
Obrázek 47 Výroba podložek	39
Obrázek 48 Podložky.....	39
Obrázek 49 Systém připevnění pravítka příčného posuvu v T drážce.....	39
Obrázek 50 Pás.....	40
Obrázek 51 Krycí okap	40
Obrázek 52 Detail rohu okapu a lepeného spoje	40
Obrázek 53 Výroba nárazníku koníku	41
Obrázek 54 Nárazník koníku	41
Obrázek 55 Vůle vymezená nárazníkem mezi koníkem a suportem.....	41
Obrázek 56 Výroba podpůrné lišty, systém upnutí obrobku.....	42
Obrázek 57 Výroba podpůrné lišty	42
Obrázek 58 podpůrná lišta.....	43
Obrázek 59 Kostka	43
Obrázek 60 Spodní strana kostky	44
Obrázek 61 Kostka s přimontovanou deskou	44
Obrázek 62 Kostka s deskou a podložkou pod jezdce	44
Obrázek 63 Krycí okap	45
Obrázek 64 Rameno výstupního rozhraní	45
Obrázek 65 Montáž pásu	46
Obrázek 66 Montáž pravítka.....	46
Obrázek 67 Detail zadní, zmenšené podložky a vedení kabelu.....	47
Obrázek 68 Montáž nárazníku koníka	47
Obrázek 69 Montáž ochranného okapu	47
Obrázek 70 Montáž kostky s deskou	48
Obrázek 71 Montáž podpůrné desky a pravítka.....	48
Obrázek 72 Montáž jezdce a podložky	48
Obrázek 73 Montáž zakrytování	49
Obrázek 74 Montáž výstupního rozhraní	49
Obrázek 75 Elektrická skříň stroje	50
Obrázek 76 Instalovaný jistič digitálního odměřování (vlevo).....	50
Obrázek 77 Instalovaná plastová průchodka napájecího kabelu	50
Obrázek 78 Připevnění kabelů na zadní straně stroje	51
Obrázek 79 Chyba při polohování na 100 mm příčná osa	51
Obrázek 80 Chyba při polohování na 100 mm podélná osa.....	51
Obrázek 81 Měření polohování digitálním úchylkoměrem	52
Obrázek 82 Chyba při polohování na 25 mm	52
Obrázek 83 Měření polohování pomocí kapacitního mikrosnímače a rozhraní	53

Obrázek 85 Umístění kapacitního mikrosnímače při měření	53
Obrázek 84 Chyba při polohování na 0,5 mm	53
Obrázek 86 Soustruh SV 18 RA s instalovaným digitálním odměřováním	56
Obrázek 87 Soustruh SV 18 RA s instalovaným digitálním odměřováním	56

Seznam tabulek:

Tabulka 1 Porovnání cen setů digitálního odměřování pro soustruh	30
Tabulka 2 Vyrobené díly a polotovary	38
Tabulka 3 Kalkulace ceny realizace digitálního odměřování	54

Seznam příloh:

Příloha 1 Ověření přesnosti systému – naměřená data	
---	--