

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Vývoj řídicího systému obráběcích strojů
a automatizace obrábění**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin BRANŠOVSKÝ**
Osobní číslo: **E09N0251P**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Vývoj řídicího systému obráběcích strojů a automatizace obrábění**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Uveďte základní principy a vlastnosti řídicích systémů číslicově řízených těžkých obráběcích strojů.
2. Popište vývoj řídicího systému číslicově řízených obráběcích strojů a uveďte trendy v dalším vývoji.
3. Popište principy automatického rozpoznávání a proměřování obrobku. Popište principy automatické kalibrace těžkých CNC obráběcích strojů.
4. Navrhněte systém automatického rozpoznávání obrobku na pracovišti pro těžké CNC obráběcí stroje, jeho proměření a následnou kalibraci CNC obráběcího stroje dle obrobku.
5. Zhodnoťte navržené zařízení a porovnejte se systémy ostatních výrobců.



Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

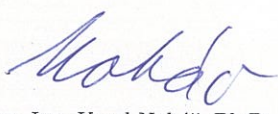
Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Basl, Ph.D.**
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2013**
Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2014**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na možnosti a vývoj řídicího systému těžkých číslicově řízených obráběcích strojů. V práci je uveden rozbor a základní vlastnosti řídicího systému, jeho vazby na CNC stroj a přehled jednotlivých vývojových stupňů CNC strojů a jejich řídicích systémů. Dále se práce zabývá základním rozdělením a popisem principu činnosti kalibračních, diagnostických a měřících systémů použitelných pro obráběcí CNC stroje ŠKODA. V závěrečné části je navržen systém pro automatické rozpoznávání obrobku v pracovním prostoru stroje, jeho proměření a následné kalibraci včetně porovnání a zhodnocení navrženého systému. Ze závěru této práce je patrné, že automatický systém rozpoznávání obrobků v pracovním prostoru stroje a jejich následná kalibrace je pro těžké obráběcí CNC stroje ŠKODA nákladné a v současném vývoji světové ekonomiky obtížně realizovatelné.

Klíčová slova

CNC stroj, řídicí systém, číslicové řízení, CAD/CAM, dotyková sonda, snímač, 3D laserový skener, interferometr, kalibrace, diagnostický systém, mračno bodů;

Abstract

The master thesis is focused to the possibilities and development in field of control system of the numerical controlled heavy machine tools. In the thesis there are described the basic properties of control system, system connection to the machines and overview of generations of the CNC machines and theirs control system. In next part is the definition of function of calibration, diagnostic and measuring system which is applicable for SKODA CNC machines. The thesis contains the part about the designed automatic recognition system which is able to recognize the position of the workpiece inside the working area of the CNC machine and automatically prove the measuring and calibration of the zero points. This part is including the comparison and evaluation with applicable and existing systems from other machine tool makers. The thesis has a conclusion which shows the designed system as an uneasily applicable for heavy machine tool at present economy situation.

Key words

CNC machine, control system, numerical control, CAD/CAM, touch probe, sensor, 3D laser scanner, interferometer, calibration, diagnostic system, point clouds;

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 6. 5. 2014

Martin Branšovský

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Baslovi, Ph.D. za umožnění vypracování této práce ve spolupráci s firmou ŠKODA MACHINE TOOL a.s.

Dále bych rád poděkoval všem, kteří mi svými odbornými radami a konzultacemi pomohli dané téma zpracovat a velmi si cením jejich podpory, profesionálních rad a připomínek.

Obsah

Obsah	7
Seznam symbolů a zkratk.....	9
Úvod	10
1 Základní principy a vlastnosti řídicích systémů CNC strojů	11
1.1 Charakteristika řídicího systému	11
1.2 Podle způsobu ovládání	12
1.2.1 NC	12
1.2.2 CNC	12
1.2.3 DNC	13
1.3 Podle metody programování	14
1.3.1 ISO programování.....	14
1.3.2 Dílensky orientované programování.....	15
1.3.3 CAD / CAM.....	15
1.4 Podle způsobu zadávání souřadnic	15
1.4.1 Řídicí systémy s absolutním programováním.....	15
1.4.2 Řídicí systémy s inkrementálním programováním	16
1.5 Podle způsobu řízení pohybu v osách stroje	17
1.5.1 Systémy s přetržitým řízením	17
1.5.2 Systémy se souvislým řízením.....	18
1.6 Podle typu odměřování	21
1.6.1 Přímé odměřování.....	21
1.6.2 Nepřímé odměřování	24
1.7 Souřadnicový systém	24
1.8 Pracovní prostor CNC stroje.....	26
1.8.1 Nulový bod stroje – M	26
1.8.2 Referenční bod stroje - R	27
1.8.3 Bod výměny nástroje – N	27
1.8.4 Nulový bod obrobku – W	28
1.8.5 Výchozí bod programu – C.....	28
1.9 Základní vlastnosti řídicího systému	29
2 Vývoj řídicího systému CNC obráběcích strojů a současné trendy	30
2.1 Vývojové stupně obráběcích strojů.....	30
2.1.1 0. generace	30
2.1.2 1. generace	31
2.1.3 2. generace	32
2.1.4 3. generace	33
2.1.5 4. generace	33
2.1.6 5. generace	33
2.1.7 6. generace - současná	34
2.2 Přenos a uchování dat	35

2.3	CAD/CAM vývoj.....	38
3	Principy automatického rozpoznávání a proměrování obrobku.	41
3.1	Rozdělení obrobkových sond vhodných pro obráběcí stroje:.....	42
3.2	Princip funkce obrobkových dotykových sond	42
3.2.1	Senzory vychýlení a stlačení snímacího hrotu.....	43
3.2.2	Přenos signálu do řídicího systému	46
3.2.3	Parametry vybraných dotykových sond.....	52
3.2.4	Způsob řízení sond.....	52
3.2.5	Snímací rychlost, přesnost a reprodukovatelnost snímání.....	53
3.3	Způsoby využití obrobkových dotykových sond.....	56
3.3.1	Vyrovnání obrobku	56
3.3.2	Nastavení vztažných bodů obrobku	57
3.3.3	Proměření obrobku	57
3.4	Možnosti rozpoznávání a měření obrobků v pracovním prostoru stroje	59
3.4.1	Laserová trackovací stanice se snímací sondou.....	59
3.4.2	3D laserové skenery	61
4	Principy automatické kalibrace těžkých CNC obráběcích strojů.....	63
4.1	Nástrojové dotykové sondy	63
4.1.1	Princip funkce dotykové nástrojové sondy	64
4.1.2	Laserové nástrojové sondy k proměření a kontrole nástroje	65
4.1.3	Laserové sondy k detekci poškození nástroje.....	67
4.1.4	Parametry vybraných nástrojových sond	69
4.2	Měřicí systémy pro inspekci, kontrolu a kalibraci obráběcích strojů.....	69
4.2.1	Ballbar test	70
4.2.2	Moderní inspekční a kalibrační systémy	73
5	Automatické rozpoznání obrobku včetně kalibrace stroje.....	83
5.1	Parametry a funkce 3D laserového skeneru FARO.....	84
5.2	Vývojový diagram	87
5.3	Model pracoviště.....	88
5.4	Naskenovaná data	89
5.5	Umístění laserového skeneru	90
6	Zhodnocení a porovnání navrženého systému	91
6.1	Porovnání navrženého systému s jinými výrobci těžkých obráběcích CNC strojů.....	91
6.2	Zhodnocení navrženého systému automatického rozpoznání obrobku	92
	Závěr	93
	Seznam použitých zdrojů	95

Seznam symbolů a zkratk

3D.....	Trojdimenzionální neboli trojrozměrný
CAD.....	Computer Aided Design
CAM.....	Computer Aided Manufacturing
CCD.....	Charge-Coupled device
CD-ROM.....	Compact Disc Read-Only Memory
CF.....	Compact Flash
CMM.....	Coordinate Measuring Machines
CMOS.....	Complementary Metal–Oxide–Semiconductor
CNC.....	Computer Numerical Control
DNC.....	Direct / Distributive Numerical Control
DVD-ROM.....	Digital Versatile Disc Read-Only Memory
FMS.....	Flexible Manufacturing System
GB.....	Giga Byte
ISO.....	International Organization for Standardization
kB.....	kilo Byte
LAN.....	Local Area Network
LSI.....	Large Scale Integration
MB.....	Mega Byte
NC.....	Numerical Control
PC.....	Personal Computer
PLC.....	Programmable Logic Controller
RICS.....	Reduced Instruction Set Computing
SD.....	Secure Digital
USB.....	Universal Serial Bus
VLSI.....	Very Large Scale Integration
WiFi.....	Wireless Fidelity
λ	Vlnová délka [m]
2σ	Reprodukovatelnost snímání

Úvod

Tato práce se věnuje měřicím, diagnostickým a kalibračním systémům využitelných na těžkých číslicově řízených obráběcích strojích. Toto téma jsem si vybral proto, že v rámci své pracovní činnosti se s uvedenou problematikou setkávám v každodenní praxi a mohu tedy ve spolupráci s kolegy z konstrukce hodnotit potřebu integrace těchto systémů do řízení těžkých obráběcích CNC strojů.

S pokračujícím vývojem v oblasti výpočetní techniky, řídicích systémů a technologických celků stoupají nároky uživatelů těžkých číslicově řízených obráběcích strojů na přesnost, rychlost a kvalitu výroby. Aby bylo možné takovým požadavkům vyhovět, je žádoucí aplikovat metody podporující dodržování jakosti výroby, zefektivnění výrobního procesu a zamezení možného vzniku chyb lidským pochybením. Toho je možné docílit s využitím dostupných měřicích, kalibračních a diagnostických systémů.

Nejvýznamnější producenti těžkých číslicově řízených obráběcích strojů, mezi které patří i český výrobce společnost ŠKODA MACHINE TOOL a.s., využívají nejrůznější prostředky a příslušenství k dosažení nejlepších možných výsledků v oblasti přesnosti obrábění. Většina v běžné praxi používaných kalibračních, měřicích anebo diagnostických systémů pracuje odděleně a není možné je propojit v jeden funkční celek.

Jelikož obráběcí CNC stroje ŠKODA patří mezi největší vyráběné CNC stroje po celém světě a velikost nebo váha obrobků obráběných na těchto strojích mnohdy převyšuje rozměry a váhu strojů samotných, je použití běžných systémů pro automatizaci a přípravu výroby zpravidla nemožné.

Téma této práce bylo zvoleno z důvodu prozkoumání současných dostupných systémů použitelných na strojích ŠKODA. Práce by měla přispět k nalezení řešení, jak automatizovat proces rozpoznání obrobku v pracovním prostoru stroje, jeho proměření a následnou kalibraci. Zabývání se touto problematikou také pomůže objasnit principy fungování CNC strojů, vazby na jejich řídicí systém a princip fungování moderních měřicích, kalibračních a diagnostických systémů.

1 Základní principy a vlastnosti řídicích systémů CNC strojů

1.1 Charakteristika řídicího systému

Číslicové řízení můžeme definovat jako druh automatického řízení pracovního cyklu stroje, při němž jsou řídicím systémem ovládány veškeré jeho funkce. U obráběcích strojů jsou to zejména smysl a směr otáček pracovního vřetene, posuvy v jednotlivých osách a další pomocné funkce. Informace potřebné k řízení stroje řídicím systémem jsou zadány programem. Ten je zapsán specifickým kódem skládajícím se z jednotlivých symbolů a na základě čtení takového programu řídicí systém vydává příkazy jednotlivým součástem stroje.

Následující rozdělení definuje skupiny informací, které jsou obsaženy v programu číslicově řízeného obráběcího stroje a které jsou po přečtení řídicím systémem vykonány:

Geometrické informace – Informace o geometrii obrábění popisující dráhu nástroje vůči obrobku. Udávají rozměry a tvar obrobku, posunutí nástroje vůči obrobku, tvar křivky pohybu nástroje, vzdálenost otvorů a podobně. V kódu programu se jedná o X, Y, Z, R a další funkce.

Technologické informace – Informace o technologii obrábění. Jsou určeny funkcemi, které se vykonávají při vlastním obrábění. Například rychlost otáčení vřetene, rychlost posuvů jednotlivých os, druh obráběcího nástroje a podobně. V kódu programu zapisujeme například jako F, S a dalšími funkcemi.

Pomocné funkce - Jedná se o informace o pomocných funkcích, kterými mohou být například spuštění průtoku chladicí kapaliny, otevření ventilu v hydraulickém obvodu obsluhující technologické příslušenství a podobně. Jsou zapisovány v programu jako M nebo T funkce.

Informace k organizaci programu jsou potřebné pro vyvolání určité části programu v dané posloupnosti. Označujeme jimi například začátek a konec programu, číslo bloku nebo odkaz do jiné části programu. Nazývají se například jako M nebo N funkce.

Číslicově řízené obráběcí stroje můžeme rozdělit do následujících skupin:

1.2 Podle způsobu ovládání

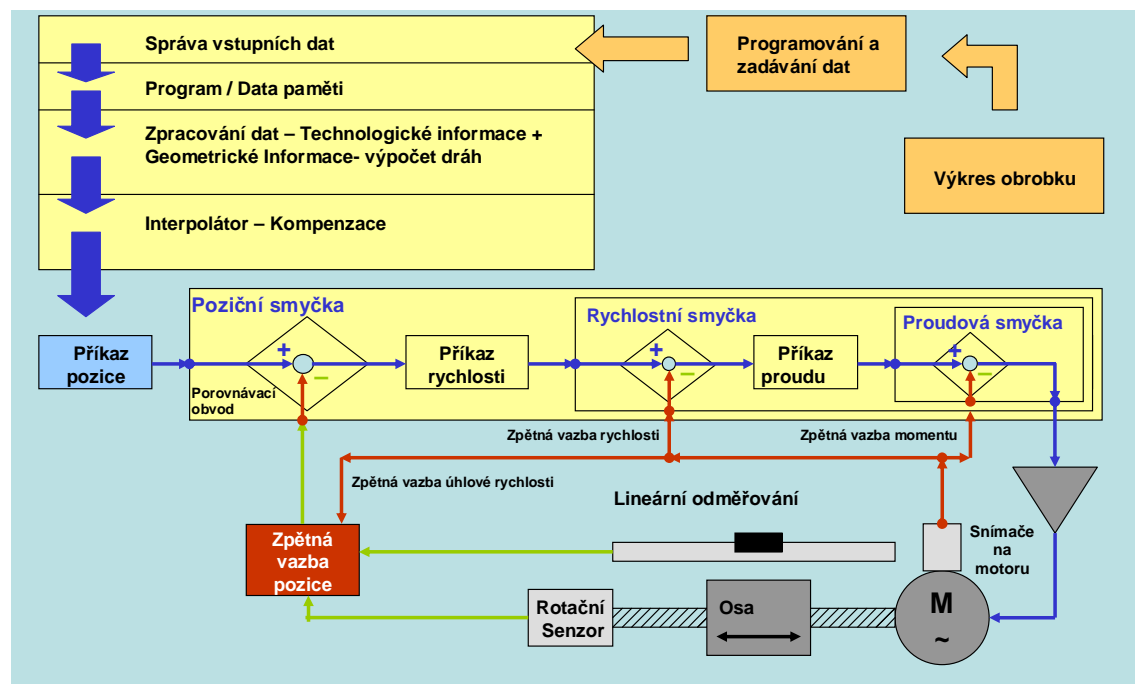
1.2.1 NC

Označení NC (Numerical Control) je všeobecné označení pro numerické řízení obsahující různé způsoby ovládání obráběcích strojů pomocí kódové informace zapsané na nosiči takové informace – děrný štítek, děrná papírová páska nebo magnetická páska. Numerické řízení probíhá na základě série pokynů skládajících se z čísel, písmen a dalších speciálních symbolů a jednotlivé pokyny jsou následně převedeny na elektrické signály, pomocí kterých stroj vykoná daný příkaz. Pokyny pro NC řízení se dělí na funkce a pomocné funkce. Funkcemi řídíme pohyb pracovního vřetene stroje v jednotlivých osách a pomocnými funkcemi řídíme otáčky a smysl rotace vřetene, rychlost pohybu nebo například druh nástroje.

Pokyny jsou zapisovány a tříděny a takovému logickému uspořádání říkáme NC program.

1.2.2 CNC

Dalším vývojovým stupněm NC řízení je CNC řízení (Computer Numerical Control). Pojem CNC stroj a CNC řízení používáme i v českém jazyce a synonymem k označení CNC stroj je počítačem řízený obráběcí stroj. CNC stroj je stejně jako NC stroj schopen na základě příkazů skupinou kódových informací vykonat daný příkaz. Rozdílem je ale počítač s rozhraním pro zadávání informací, který je ke stroji připojen a pomocí kterého můžeme příkazy nejen zadávat, ale přímo na stroji je můžeme i upravovat a do CNC programu ukládat.



Obr. 1.1 - Blokové schéma CNC řízení

1.2.3 DNC

Nadstavbou nad CNC řízením je DNC řízení (Direct Numerical Control). Jedná se o přímé řízení centrálním procesorem jednoho nebo více NC strojů. Každý NC stroj dostává příkazy z hlavního počítače. Tento systém byl používán ve dvou různých režimech řízení:

a) Standardní NC stroje jsou připojeny k řídicímu počítači a řízení je prováděno přemostěním čtecího zařízení pro datový nosič. Při DNC řízení je čtení z datového nosiče přerušeno. Při přerušení DNC řízení stroj může pokračovat ve vykonávání programu z datového nosiče (děrné pásky).

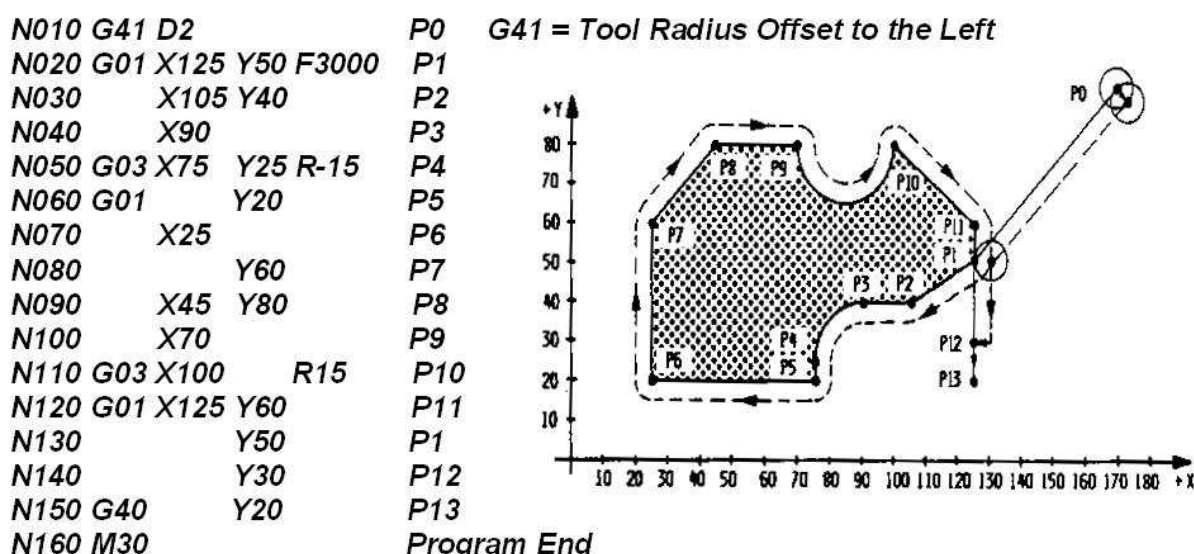
b) NC stroje nemají svůj řídicí systém a řízení strojů je prováděno pouze pomocí centrálního řídicího počítače.

S vývojem a dostupností mikroprocesorové a počítačové techniky se od Direct Numerical Control strojů upustilo a přešlo se na Distributive Numerical Control stroje, neboli stroje s operačním počítačovým řízením. U tohoto systému řízení je možné ovládat jeden nebo více CNC strojů s vlastním CNC systémem kterýmkoliv počítačem s příslušným programovým vybavením, umístěným v místní síti LAN.

1.3 Podle metody programování

1.3.1 ISO programování

ISO programování je ruční programování, kde tvorba programu je tvořena pomocí textového editoru ve formě G-kódu. Tento způsob programování se v dnešní době z důvodu zdlouhavého odečítání rozměrů z výkresové dokumentace a následného ručního výpočtu jednotlivých souřadnic při tvorbě programu již tak často nevyužívá. Ukázka části G-kódu se znázorněním pohybu nástroje v jednotlivých částech programu je možné vidět na Obr. 1.2. Výhodou je maximální kontrola nad vykonávaným programem a možná optimalizace programu při obrábění stroje, dle zkušeností a znalostí programátora. K tvorbě programu můžeme využít podpůrné programové cykly, které jsou obsaženy v řídicím systému stroje. Mohou jimi být například programové cykly pro tvorbu závitů apod.



Obr. 1.2 - Část G-kódu se znázorněným pohybem nástroje [22]

1.3.2 Dílensky orientované programování

Tato metoda programování spočívá v zadávání programu pomocí dialogových oken. Při tomto způsobu programování není potřeba znát G-kód. Programátor pouze zadává informace o obrobku a prováděné operaci pomocí průvodce a dialogových oken. Takovýto podpůrný program může být součástí řídicího systému a může být zobrazen a programován přímo na ovládacím panelu CNC stroje.

1.3.3 CAD / CAM

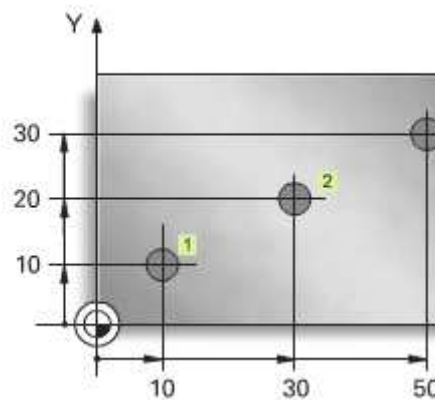
CAD/CAM metoda programování se používá hlavně u obrobků, které jsou tvarově velmi složité a jednotlivé plochy a hrany obráběného kusu jsou tvořeny složitými křivkami. Tvorba programu použitím CAD/CAM softwaru je na základě modelu obrobku vytvořeném v CAD systému. V CAD/CAM softwaru zadáme vlastnosti a parametry pro dané technologické procesy a zvolíme způsob tvorby drah nástroje. Výstupem jsou data, která se pomocí postprocesoru, navrženého pro daný CNC stroj, převedou do G-kódu. Mezi CAD/CAM systémy patří například software Catia nebo PowerMill.

1.4 Podle způsobu zadávání souřadnic

K dispozici jsou dva hlavní způsoby programování. Absolutní a inkrementální neboli přírůstkové. Nejvíce rozšířené je absolutní programování, na které jsou řídicí systémy již přednastaveny.

1.4.1 Řídicí systémy s absolutním programováním

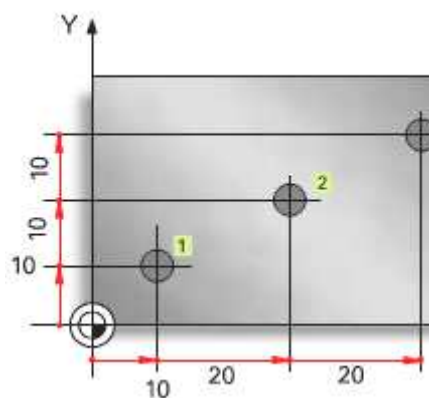
Veškeré souřadnice jednotlivých bodů dráhy nástroje jsou vztaženy k výchozímu bodu souřadnicového systému k tzv. nulovému bodu obrobku. Nulový bod obrobku značíme písmenem W. Jedná se tedy o určení vzdálenosti souřadnic programovaného bodu vzhledem k počátku souřadnicového systému obrobku - bodu W viz. Obr. 1.3. Každá poloha na obrobku je svými souřadnicemi jednoznačně určena.



Obr. 1.3 - Absolutní programování [1]

1.4.2 Řídicí systémy s inkrementálním programováním

Souřadnice všech programovaných bodů jsou vztaženy vždy k předcházející pozici programovaného bodu v souřadnicovém systému a každý předchozí bod je považován za výchozí bod pro bod následující. Do programu zadáváme inkrement, neboli přírůstek pozice nástroje v dané ose souřadnicového systému, vzhledem k předchozí poloze nástroje, jak je znázorněno na Obr. 1.4. Inkrementální způsob zadávání souřadnice se někdy nazývá jako řetězové kóty. Přírůstkové souřadnice se v programu označují symbolem I, který se píše před označením osy. Příklad zadání inkrementální souřadnice bodu v ose X vyjadřující vzdálenost 20 mm od posledního definovaného bodu je $IX = 20$ mm. U tohoto typu programování hrozí veliké riziko řetězení chyb do programování následujících bodů, a proto je doporučováno zadávat program v absolutních souřadnicích.



Obr. 1.4 - Inkrementální programování [1]

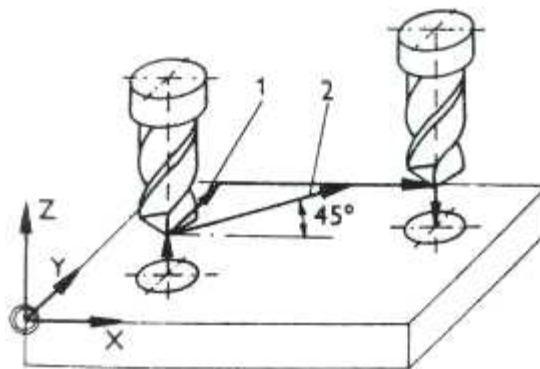
1.5 Podle způsobu řízení pohybu v osách stroje

1.5.1 Systémy s přetržitým řízením

Jedná se o druh řízení pohybu nástroje obráběcího stroje v jednotlivých, vzájemně nezávislých osách.

1.5.1.1 Systémy stavění souřadnic

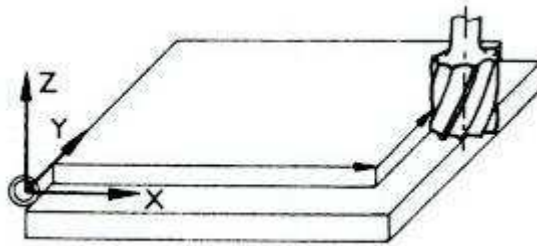
Jde o nejstarší a nejjednodušší způsob řízení strojů. Nástroj se pohybuje rychloposuvem bez interpolace do místa určení a při pohybu není prováděno obrábění. To znamená, že dráha nástroje neprovádí ani kruhovou, ani lineární interpolaci. Cílové souřadnice je dosaženo pravoúhlým pohybem v jedné a následně ve druhé ose. Vlastní obrábění nastává až po najetí na požadované souřadnice pohybem jiné osy nezávislé na číslicovém systému. Stav, kdy je v jednom okamžiku řízena pouze jedna osa stroje, můžeme nazvat jako 1D řízení viz. Obr. 1.5. Tento systém řízení je vhodný například pro vrtací nebo svařovací stroje.



Obr. 1.5 - 1D řízení [22]

1.5.1.2 Systém pravoúhlého řízení

Systém vychází z předchozího způsobu řízení stavění souřadnic. Oproti systému stavění souřadnic je ale při pravoúhlém řízení během pravoúhlého pohybu nástroje prováděno obrábění tak jak je znázorněno na Obr. 1.6. Pomocí tohoto způsobu řízení můžeme obrábět pouze pravoúhlé tvary a uplatnění nalezneme například u automatizovaných vrtacích strojů.



Obr. 1.6 - Systém pravoúhlého řízení [22]

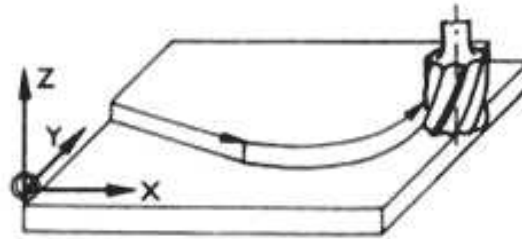
1.5.2 Systémy se souvislým řízením

Jedná se o nejčastější způsob řízení CNC strojů používaných v současné době. Pomocí souvislého řízení můžeme vytvářet plochy ohraničené libovolnými křivkami. Pohyb nástroje vzhledem k obrobku probíhá minimálně ve dvou souřadnicových osách současně. Mezi pohyby v jednotlivých osách generované interpolátorem existuje funkční závislost.

Interpolace je způsob řízení pohybu, při kterém ideální dráhu po křivce nahradíme nejmenší možnou odchylkou od dané křivky v pravoúhlém systému souřadnic. Je to z toho důvodu, že stroj se souvislým systémem řízení se není schopný pohybovat přesně ve směru dané osy. Nástroj takového stroje se tedy pohybuje po přímkách blízcích se ideálnímu směru osy. Interpolace může být například kruhová, lineární nebo polynomická. Vzhled mnohoúhelníku napodobujícího pohyb po požadované křivce se odvíjí od přesnosti stroje, jeho odměřování a minimálního kroku jeho pohonů.

1.5.2.1 Souvislé řízení ve dvou osách - 2D

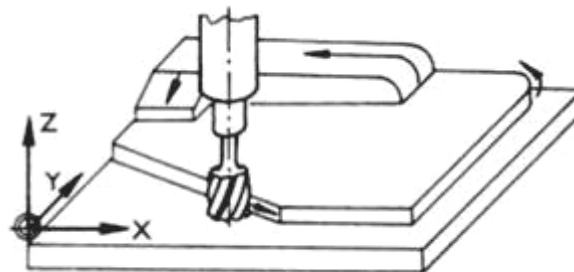
Nástroj se pohybuje pomocí lineární nebo kruhové interpolace v rovině dané dvěma osami X a Y. Tím lze vytvořit libovolně zaoblené hrany viz. Obr. 1.7.



Obr. 1.7 - 2D řízení [22]

1.5.2.2 Souvislé řízení ve dvou volitelných osách – 2,5D

Nástroj může vykonávat svůj pohyb ve volitelné rovině dané dvěma osami. U frézky se jedná o rovinu danou osami X-Y, X-Z nebo Y-Z. Tvar možné dráhy nástroje je znázorněn na Obr. 1.8.

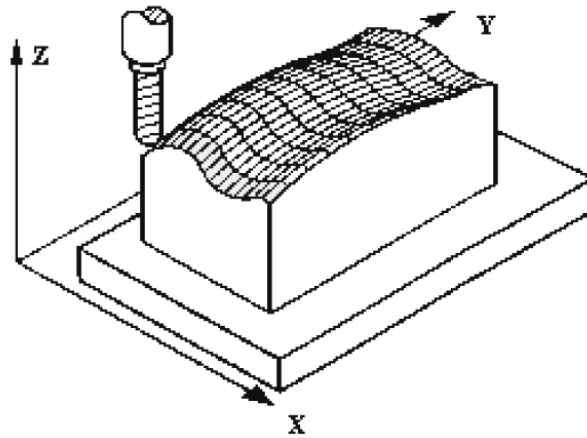


Obr. 1.8 - 2,5D řízení [22]

1.5.2.3 Souvislé řízení ve třech osách – 3D

Pomocí tohoto způsobu řízení lze vytvářet libovolné obrysy a prostorové plochy. Nástroj se může pohybovat současně ve třech osách, které plně definují prostor obrobku. Tento způsob řízení je již náročnější na výpočetní výkon řídicího systému, jelikož interpolátor

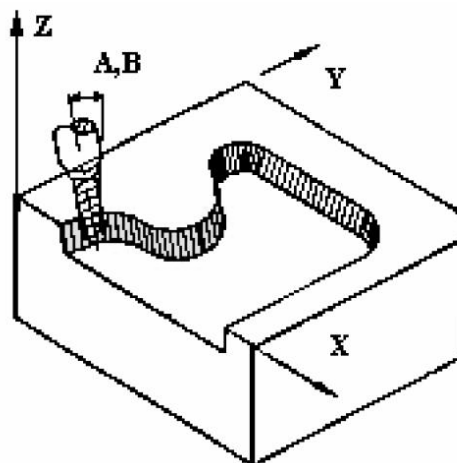
musí být schopen vypočítat pohyb ve dvou osách v závislosti i na ose třetí. Na Obr. 1.9 je znázorněno 3D řízení.



Obr. 1.9 - 3D řízení [22]

1.5.2.4 Souvislé řízení až v šesti osách - 4D, 5D, 6D

Jedná se o způsob řízení, kde kromě pohybu nástroje v jednotlivých osách je umožněna rotace nebo natáčení kolem základních os X, Y a Z viz. Obr. 1.10. Hovoříme poté o osách A, B a C a o čtyř, pěti nebo šesti-osém obrábění současně. V dnešní době všechny moderní řídicí systémy těžkých obráběcích strojů dokáží řídit pohyb nástroje v 5 osách současně. Mluvíme pak o pětiosém obrábění 5D. 6D obrábění se v poli těžkých obráběcích strojů nepoužívá a můžeme se s ním setkat spíše u malých obráběcích center, nebo u specializovaných strojů.



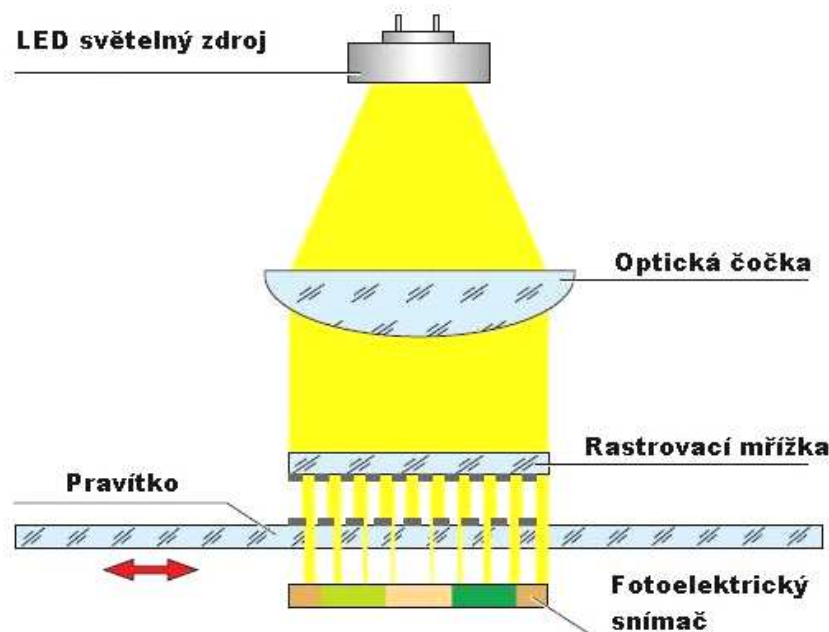
Obr. 1.10 - 5D řízení [22]

1.6 Podle typu odměřování

Odměřovací zařízení může přímo ovlivňovat výslednou přesnost stroje. U moderních CNC obráběcích strojů používáme elektronické číslicové odměřovací systémy. Z pohledu umístění a konstrukce samotného odměřovacího zařízení rozeznáváme dva způsoby odměřování polohy stroje.

1.6.1 Přímé odměřování

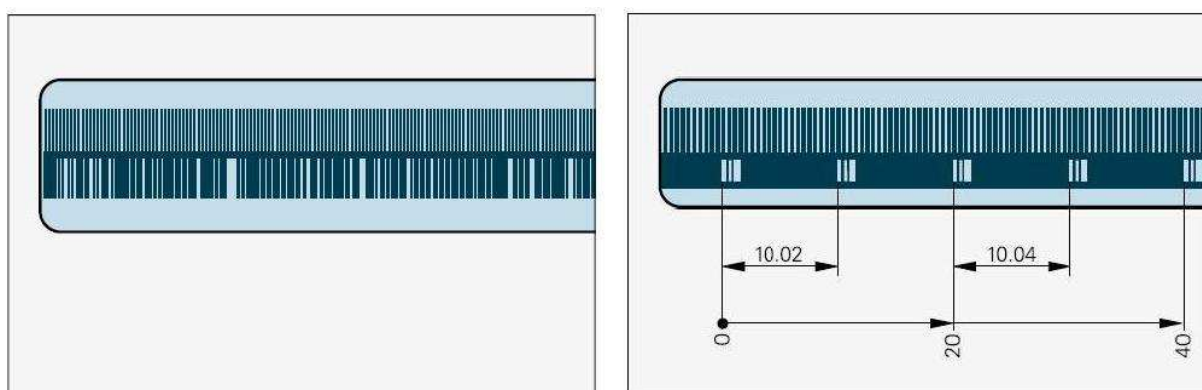
U přímého odměřování je odměřovací systém umístěn přímo na styku vzájemně se pohybujících částí stroje - uzlů a do řídicího systému je odesílána informace o jejich vzájemné poloze a tím i o poloze nástroje. Čtení polohy je založeno nejčastěji na fotoelektrickém jevu, kdy čtecí hlava pomocí optického zdroje a soustavy optický čoček promítá světelný paprsek skrze šablonu s podobným rastrem otvorů jako rastr otvorů na stupnici polohy a vzájemným překrýváním jednotlivých částí stupnice polohy šablonou dopadá na fotoelektrický snímač série světelných paprsků. Rozestup otvorů v šabloně je odlišný od rozestupů otvorů ve stupnici polohy a tak dochází k promítnutí paprsků na snímač od světelného zdroje s různou modulací. Otvorem rozumíme průhlednou část skleněného nebo kovového pravítka. Fotoelektrický snímač následně převádí různě modulovaný světelný signál na signál elektrický. Díky odlišnému rozestupu průchozích políček šablony čtecí hlavy nebo většímu počtu fotoelektrických snímačů dokáže přímé odměřovací zařízení rozpoznat i směr, jakým se jezdec se čtecí hlavou pohybuje. Různí výrobci používají odlišné způsoby promítání informace na fotoelektrický snímač a tak se můžeme setkat kromě průchodu skrze rastr otvorů i s principem vyslání světelné informace a následného odrazu ke snímači. Zjednodušený princip čtecí hlavy odměřovacího zařízení je znázorněn na Obr. 1.11. Tento systém se vyznačuje vysokou přesností a je používán u většiny moderních CNC strojů. Nejvýznamnější výrobce přímých odměřovacích zařízení je firma Heidenhain. [2]



Obr. 1.11 - Čtecí hlava odměřovacího zařízení [2]

1.6.1.1 Absolutní odměřování

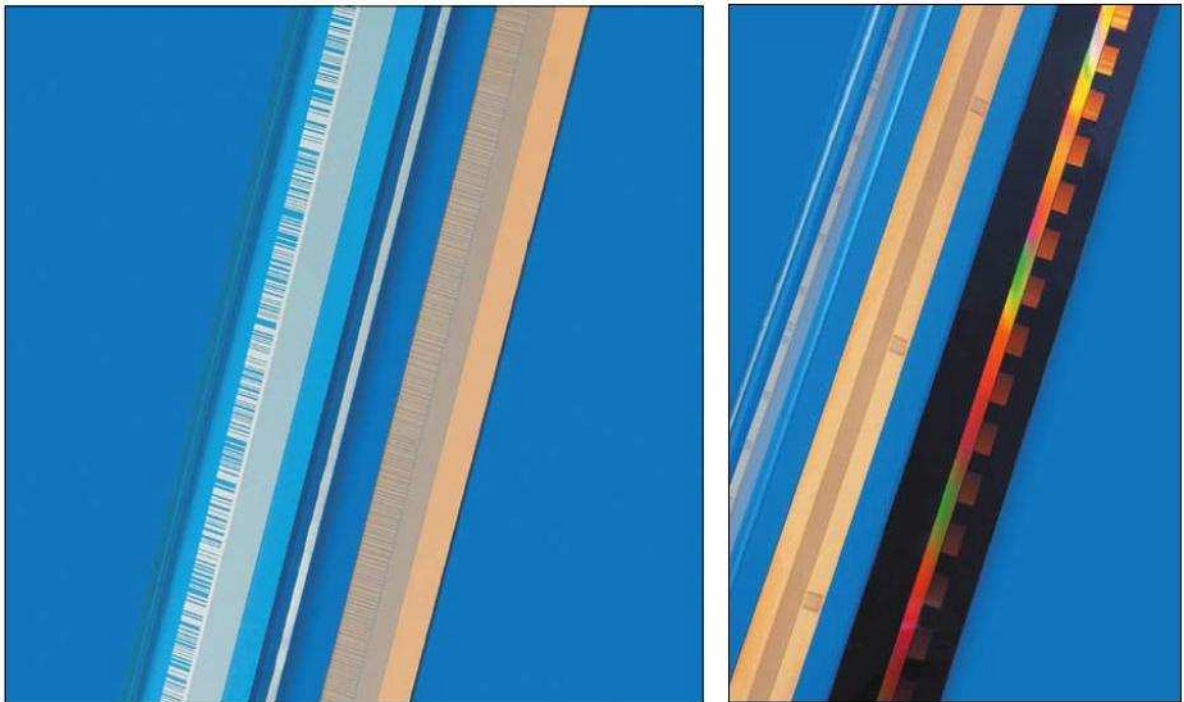
Absolutní odměřovací systém udává informaci o poloze nástroje vztažené k předem určenému počátku – nulovému bodu. Tento systém získává absolutní informaci o poloze nástroje okamžitě po zapnutí systému. Na Obr. 1.13 a) je ukázka stupnice absolutního odměřovacího systému. Absolutní odměřovací systém je možné používat pouze pro relativně krátké pojezdy obráběcích strojů a to z výrobně technologických důvodů. V praxi se absolutní odměřovací systém používá pro pojezdy do 4 m.



Obr. 1.12 Ukázka stupnice a) absolutního a b) inkrementálního odměřování [2]

1.6.1.2 Inkrementální odměřování

Inkrementální neboli přírůstkový systém odměřování je založen na principu získávání impulsů z odměřovacího zařízení při pohybu a řídicí systém následně převádí tyto impulsy na délkové údaje. Při zapnutí systému je potřeba nejprve určit přesnou polohu stroje (jezdce se čtecí hlavou) krátkým pojezdem na jednu ze dvou stran. Tím řídicí systém obdrží sérii impulsů a je následně schopen rozeznat přesnou polohu stroje. Na Obr. 1.13 b) je možné vidět praktickou ukázkou stupnice inkrementálního odměřování výrobce Heidenhain a na Obr. 1.12 b) principiální rozdíl mezi stupnicí absolutního a inkrementálního odměřování. Inkrementální odměřování je zpravidla používáno pro dlouhé pojezdy v řádech desítek metrů. Na rozdíl od absolutního odměřování dochází při výpadku napájení ke ztrátě číselné informace o poloze a po opětovném zapnutí je nutný malý pohyb stroje v dané ose což může být v některých případech nežádoucí.



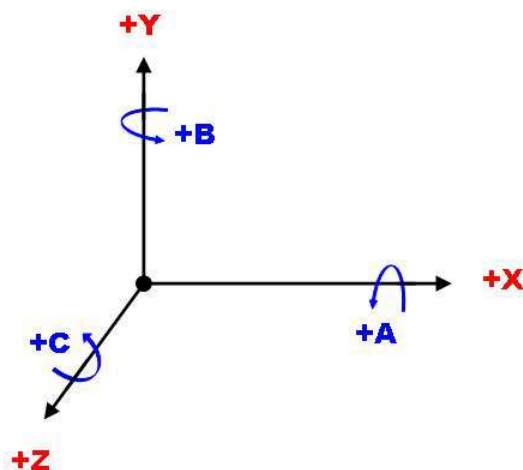
Obr. 1.13 - Ukázka a) absolutní a b) inkrementální stupnice odměřovacího systému [2]

1.6.2 Nepřímé odměřování

U nepřímého odměřování je odměřovací systém umístěn na posuvovém mechanismu. Dráha nástroje je odečítána nepřímo, například pomocí převodu a rotačního snímače, nebo z odměřovacího systému integrovaného v posuvovém motoru. Výhodou tohoto systému je mnohonásobně nižší cena oproti přímému odměřování. Nevýhodou je přenášení nepřesností mezi jednotlivými stupni odměřovací soustavy a vliv silových účinků posuvového mechanismu do odměřovacího zařízení. Porovná-li se dosahovaná přesnost polohování u strojů ŠKODA s využitím přímého anebo nepřímého odměřovacího systému, vychází naměřené hodnoty dosahované přesnosti polohování přibližně o 50% horší v neprospěch nepřímého odměřování.

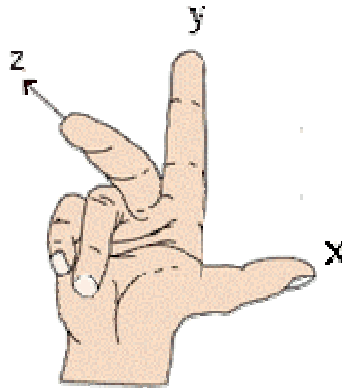
1.7 Souřadnicový systém

Aby bylo možné do programu řídicího systému zadávat pohyb nástroje vůči obrobku přesně ve formě čísel, je nutné stanovit souřadnicový systém, který se bude používat. U CNC obráběcích strojů je téměř výhradně používán pravoúhlý pravotočivý neboli pravoúhlý kartézský souřadnicový systém (Obr. 1.14). Systém souřadnic je určen mezinárodní normou ISO 841.



Obr. 1.14 - Pravoúhlý pravotočivý souřadnicový systém

Pravouhlý kartézský souřadnicový systém bývá někdy také nazýván pravouhlým souřadnicovým systémem pravé ruky. Jako pomůcku při určování posuvových os stroje můžeme použít prsty pravé ruky dle Obr. 1.15 a pro stanovení orientace rotačních os použijeme pravidlo pravé ruky. Palec ukazuje v kladném směru osy souřadnicového systému a zahnuté prsty znázorňují kladný směr osy rotační.



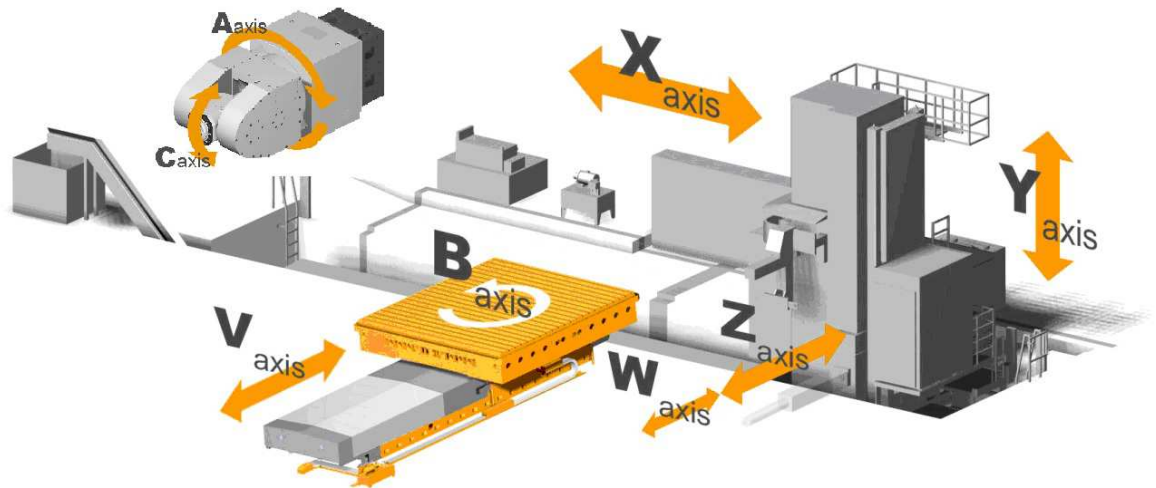
Obr. 1.15 - Pomůcka pro stanovení os souřadnicového systému [3]

Jednotlivé osy stroje, které je možné řídit, jsou charakterizovány osami souřadnicového systému. Rozlišujeme osy posuvové a osy rotační. Rotační osy se používají jako doplňkové osy pro technologické příslušenství stroje.

Souřadnicový systém stroje se přiřazuje dle následujících základních pravidel:

- a) vždy vycházíme od nehybného obrobku
- b) vždy musí být definována osa X
- c) osa X musí ležet v upínací rovině obrobku anebo s ní být rovnoběžná
- d) osa Z je přiřazena pracovnímu vřetenu stroje nebo je rovnoběžná s hlavním řezným pohybem nástroje
- e) kladný pohyb nástroje je vždy ve směru od obrobku k nástroji
- f) osy A, B a C určují rotační pohyb kolem os X, Y a Z
- g) pokud je stroj schopný vykonávat další doplňující pohyby v osách X, Y a Z, označujeme je U, V a W.

Na Obr. 1.16 je uveden popis jednotlivých os těžkých číslicově řízených obráběcích strojů z produkce ŠKODA MACHINE TOOL a.s.



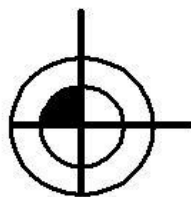
Obr. 1.16 - Popis pracovních os pro horizontální frézovací stroje ŠKODA HCW

1.8 Pracovní prostor CNC stroje

Pro určování souřadných míst na obrobku používáme vztažné soustavy. Ty tvoří geometrický základ stroje. Každý pohyb, který je vykonán nástrojem obráběcího stroje, je zapsán pomocí souřadnic. Při programování složitějších tvarů obrobku a při kalibraci pozice obrobku je dobré znát vztažné soustavy, které výrazně usnadňují práci a při jejich použití můžeme jednoduše určovat a kontrolovat polohu nástroje. Po zapnutí CNC stroje se aktivuje jeho souřadnicový systém definovaný dle daného souřadnicového systému a jeho počátek se nastaví do přesně stanoveného nulového bodu stroje - M. Dle použití definujeme i další vztažné body, které jsou ve výkresech definovány specifickou značkou. [1]

1.8.1 Nulový bod stroje – M

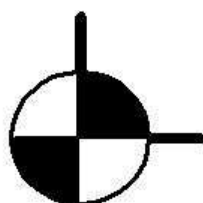
Nulový bod stroje je počátkem souřadnicového systému stroje. V tomto bodě jsou hodnoty souřadnic rovné $X = 0$, $Y = 0$ a $Z = 0$ a jedná se o absolutní počátek souřadnic. Tento nulový bod je pevně určen výrobcem a jeho poloha je neměnná. Obvykle je umístěn v průsečíku osy pracovního vřetena a upínací roviny obrobku. Při programování obrábění obrobku však můžeme posunout jeho polohu do námi zvoleného místa pro potřeby kalibrace a zvýšení efektivity práce.



Obr. 1.17 - Nulový bod stroje M

1.8.2 Referenční bod stroje - R

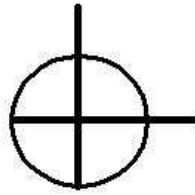
Referenční bod stroje označuje definovanou pozici osy stroje v jeho pracovním prostoru. Tato pozice má vždy stejnou vzdálenost od nulového bodu stroje M a obvykle se jedná o maximální možnou vzdálenost od bodu M. Hodnoty vzdálenosti referenčních bodů R od bodů M jsou uloženy v tabulce konstant stroje v řídicím systému. Referenční bod stroje je u těžkých CNC obráběcích strojů dán softwarovým koncovým spínačem v jednotlivých osách. Za tímto naprogramovaným referenčním bodem R zpravidla bývá mechanický koncový spínač, který se aktivuje při havarijním stavu nebo v případě, kdy by došlo k překročení softwarového omezení posuvu v dané ose. Bod R slouží jako reference a dle použitého odměřovacího systému dochází teprve po jeho najetí ke zreferování odměřovacího a řídicího systému.



Obr. 1.18 - Referenční bod stroje R

1.8.3 Bod výměny nástroje – N

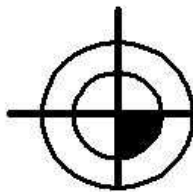
Bod výměny nástroje je pozice, na kterou stroj najíždí při provádění výměny nástroje. Jedná se o takovou pozici stroje, při které je možné provést mechanismem automatické výměny nástrojů samotnou výměnu nástroje do pracovního vřetena CNC stroje. Celá operace musí proběhnout bez možného rizika kolize stroje s obrobkem.



Obr. 1.19 - Bod výměny nástroje N

1.8.4 Nulový bod obrobku – W

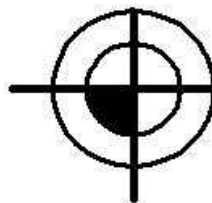
Nulový bod obrobku je vztažným bodem, ke kterému se vztahují souřadnicové údaje programu. Jedná se o počátek souřadnicového systému obrobku, od kterého se programují vzdálenosti vykonávaných pohybů nástroje. Tento bod určuje programátor a je možné ho v průběhu programu měnit. Volí se obvykle pro nejvýhodnější pozici na obrobku, od které se následně definuje obrys obrobku.



Obr. 1.20 - Nulový bod obrobku W

1.8.5 Výchozí bod programu – C

Výchozí bod programu definuje počáteční pozici nástroje. Obvykle se stanovuje v pozici, kde může být provedena výměna nebo kontrola obrobku, popřípadě i výměna nástroje.



Obr. 1.21 - Výchozí bod programu C

1.9 Základní vlastnosti řídicího systému

Mezi nejpoužívanější řídicí systémy těžkých číslicově řízených obráběcích strojů patří systémy od výrobců Siemens, Fanuc a Heidenhain. V současné době výrobce obráběcích strojů společnost ŠKODA MACHINE TOOL a.s. používá systémy SIEMENS 840D Solution Line, FANUC 30i / 31i / 32i a HEIDENHAIN iTNC 530 HSCI. Níže jsou vypsány, bez závislosti jejich pořadí na důležitosti, základní charakteristické vlastnosti těchto, v současnosti nejpoužívanějších řídicích systémů, které mohou být důležité pro výrobce i uživatele obráběcího stroje:

- cena
- spolehlivost
- garance náhradních dílů a dostupnost servisní sítě
- výpočetní výkon (procesor, taktovací frekvence procesoru, paměť)
- možnosti připojení periferií (obrazovka, klávesnice, ruční panel)
- možnosti připojení do místní sítě LAN (optický kabel, ethernet)
- možnosti připojení pohonů (jejich integrace do CNC systému)
- možnosti připojení externích odměřovacích systémů (standardem je odměřování od výrobce Heidenhain)
- možnosti dialogu s obsluhou (Human Machine Interface) hlavně v oblasti podpory programování včetně simulace
- možnosti tvorby vlastních dialogových obrazovek
- možnosti diagnostiky stavů a poruch včetně dálkové diagnostiky po internetu
- možnosti připojení PLC systému a periferií podle typu sběrnice a jejich vzdálenosti
- počet NC kanálů
- počet os a počet vřeten
- možnosti interpolace
- Podpora 5-osého obrábění
- rotace souřadného systému
- kompenzace nepřesností stroje a odměřování
- korekce nástrojů
- nástrojové hospodářství (Tool Management)
- integrovaný bezpečnostní koncept (Safety Integrated)
- pevné pracovní cykly a cykly měřící

2 Vývoj řídicího systému CNC obráběcích strojů a současné trendy

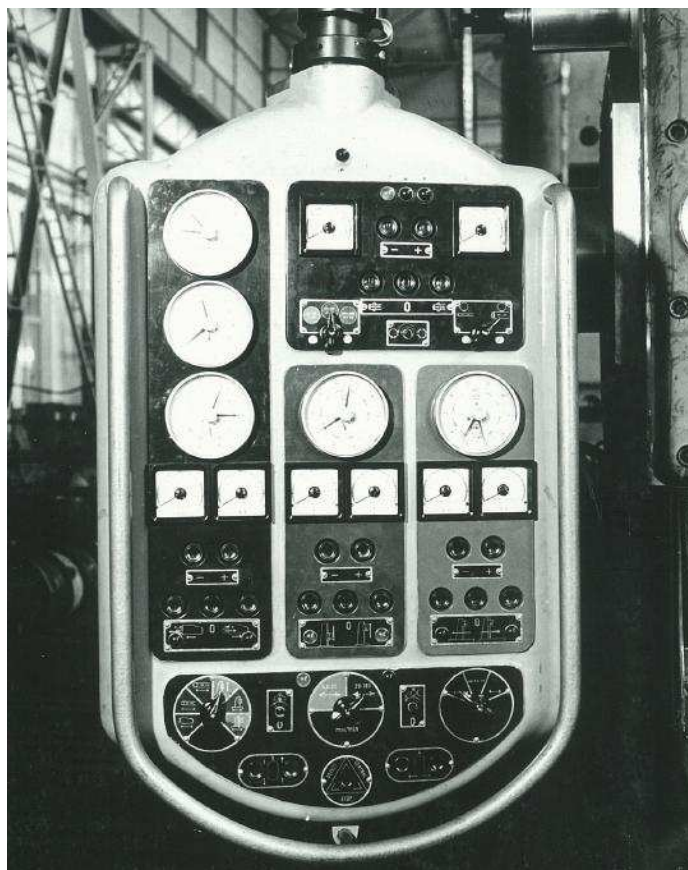
Vývoj řídicího systému číslicově řízených obráběcích strojů vždy úzce souvisel a stále souvisí se zvyšováním produktivity a přesnosti při procesu obrábění. Se stále se zvyšujícími požadavky na přesnost stroje při obrábění a produktivitu výroby musely řídicí systémy projít určitými etapami vývoje tak, aby vyhověly technickému vývoji samotného obráběcího stroje. Od samotných počátků číslicově řízených strojů, kdy řídicí systém plnil funkci pouze omezeného řízení otáček a základního polohování v jednotlivých osách stroje v dvourozměrném pravoúhlém souřadnicovém systému až po moderní počítačem řízené stroje, které jsou schopny automatizovaných procesů bez potřeby zásahu člověka do řízení.

V následujícím rozdělení jsou popsány jednotlivé vývojové stupně, neboli generace číslicově řízených obráběcích strojů a jejich řídicího systému.

2.1 Vývojové stupně obráběcích strojů

2.1.1 0. generace

Jedná se o standardní konvenční stroje, kde veškeré funkce včetně zobrazování a odměřování polohy jsou čistě mechanické. První stroje této generace byly ve společnosti ŠKODA MACHINE TOOL a.s. vyráběny od roku 1911. Na těchto strojích mohou být použity analogové měřiče příkonu hlavního pohonu stroje. I u těchto strojů bylo možné provádět jednoduché automatizované operace pomocí matric, šablon, narážek či vaček. V takovém případě mluvíme o takzvané tvrdé automatizaci. Vytvoření takové šablony a její seřízení se provádělo přímo na daném stroji.



Obr. 2.1 - Ukázka ovládacího panelu obráběcího stroje ŠKODA z 0. generace [4]

2.1.2 1. generace

Jde o stroje vycházející z koncepce konvenčních strojů (viz. 0. generace), kde bylo možné po jednoduchých úpravách samotné konstrukce stroje propojení s jednoduchým řídicím systémem a připojením pohonů v omezené míře programově řídit pracovní otáčky a posuvy v jednotlivých osách stroje. Systém umožňoval programové řízení jen v pravoúhlých cyklech. Jako pohony v této generaci strojů v 50. letech 20. století byly používány elektricky řízené hydromotory a později i elektricky řízené elektromotory (Zejména motory stejnosměrné z důvodu umožnění regulace otáček a výkonu). Stejnosměrné elektromotory byly elektronicky řízené s plynulou změnou otáček a regulací s rychlostní vazbou.

Řídicí systémy byly tvořeny převážně vakuovými lampami – elektronkový systém s použitím relé. Takové řešení číslicového řízení - NC bylo ale energeticky a rozměrově velmi náročné.

Jako datové medium pro záznam programu se u těchto strojů používal děrný štítek, děrná páska, nebo magnetická páska. Spolehlivost a přesnost těchto strojů bohužel nebyla přijatelná a tak brzy nastoupila následující generace.

Odměrování při polohování pracovalo na optickém principu. Používali se lineární a rotační odměřovací systémy.

2.1.3 2. generace

Obráběcí stroje druhé generace byly již od počátků konstruovány pro číslicové řízení. Servomotory umožnily řízení strojů v obecných cyklech. Začali se také objevovat systémy pro automatickou mezioperační výměnu nástrojů a frekvenční měniče pro přesné řízení otáček motorů. Přidávání dalšího příslušenství stroje vyžadovalo rozšíření databáze programových funkcí.

Na konci 60. let dvacátého století byly v řídicích číslicových systémech - NC již použity tranzistorové prvky vystavěné z integrovaných obvodů s vysokým stupněm integrace – LSI (Large Scale Integration). Tyto integrované obvody umožnily řízení posunových mechanismů pomocí parabolické a splineové interpolace. [5]



Obr. 2.2 - Ukázka ovládacího panelu a elektrického rozvaděče stroje 2. generace. Na obrázku stroj ŠKODA WI 130 [5]

2.1.4 3. generace

U strojů v třetí generaci byl aplikován systém automatické výměny obrobků a vývoj pokračoval i u systému automatické výměny obráběcích nástrojů, a to zejména v rozšíření kapacity pro řezné nástroje.

Stroje začaly být vybavovány bezvůlovými posuvovými mechanismy s nízkým koeficientem tření jakými byly například kuličkové šrouby a hydrostatické vedení.

Systém číslicového řízení - NC byl vystavěn z polovodičových prvků s velmi vysokým stupněm integrace – VLSI (Very Large Scale Integration). Řídicí systémy byly doplňovány pamětí a umožňovaly editaci programu. Oproti 1. generaci se výrazně zlepšila energetická náročnost, spolehlivost a přesnost systému. Bylo možné pracovat s vyššími taktovacími frekvencemi signálu a tím zlepšit přesnost odměřování díky možnosti čtení většího množství impulsů. Tím došlo ke zpřesnění při posuvu stroje v jednotlivých osách.

Na trhu se v 70. letech 20. století objevil první FMS (Flexible Manufacturing System).

2.1.5 4. generace

Čtvrtá generace obráběcích strojů začala být vybavována senzory pro snímání informací o stavu jednotlivých součástí stroje, jako jsou pohony, citlivé mechanické části stroje a jejich teploty.

Řídicí systém byl založen na principu CNC/PLC s využitím mikroprocesorů například od firmy Intel – Pentium IV anebo procesoru s RICS architekturou od výrobce IBM.

2.1.6 5. generace

Stroje páté generace implementovali mechatronické prvky, které umožňují elektronické kompenzace chyb při polohování stroje a měření obrobků v průběhu obrábění. Takové měření obrobků je prováděno pomocí měřících obrobkových sond. Tím je možné v průběhu probíhající operace implementovat naměřené odchylky od požadovaných hodnot uvedených v technickém výkresu nebo CAD modelu do programu obrábění a následně provést potřebné korekce v řízení stroje.

Díky vysokému výpočetnímu výkonu byly implementovány systémy adaptivního řízení obrábění se sledováním řezných sil odvozených od příkonu pohonů a získaných dat z odměřovacích systémů. K řízení, měření a kontrole začal být také využíván laserový paprsek.

2.1.7 6. generace - současná

Obráběcí stroje v současnosti využívají veškeré dostupné nejmodernější technologie. Dochází k optimalizaci mezioperačních časů, jakými jsou výměna nástrojů, výměna technologického příslušenství a také výměna obrobku včetně jeho seřízení. Rozvíjena je také dálková diagnostika kompletního systému. Výhodou dálkové diagnostiky je řešení vzniklé situace s možností řízení stroje na dálku bez nutnosti přítomnosti obsluhy. Zkrácení doby trvání těchto mezioperačních časů a prevence odstávek strojů vede ke zvýšení produktivity výroby. Dále je rozvíjeno vysokorychlostní a více-osé obrábění. V neposlední řadě s přispěním moderních odměřovacích, řídicích a kompenzačních systémů také precizní obrábění s programovací jednotkou 0,001 mm.

Řídicí systém umožňuje grafickou simulaci procesu obrábění přímo na ovládacím panelu. Stále častěji jsou aplikovány CAD/CAM systémy a DNC (Distributive Numerical Control) k vytvoření systému obráběcích strojů řízených a kontrolovaných centrálním počítačem ve výrobním závodě vzájemně propojené v místní počítačové síti LAN.

Dnešní řídicí systémy obsahují spoustu dalších funkcí jako například systémy pro zabezpečení pracoviště, dálkovou diagnostiku včetně vzdáleného řízení stroje, ale bez možnosti pohybu stroje v jeho osách z důvodu bezpečnosti a zabránění vzniku nebezpečí pro osoby na pracovišti a v neposlední řadě z důvodu ochránění stroje samotného.



Obr. 2.3 - Ovládací panel řídicího systému Heidenhain iTNC 530 HCSI pro CNC obráběcí stroj ŠKODA HCW [6]

2.2 Přenos a uchování dat

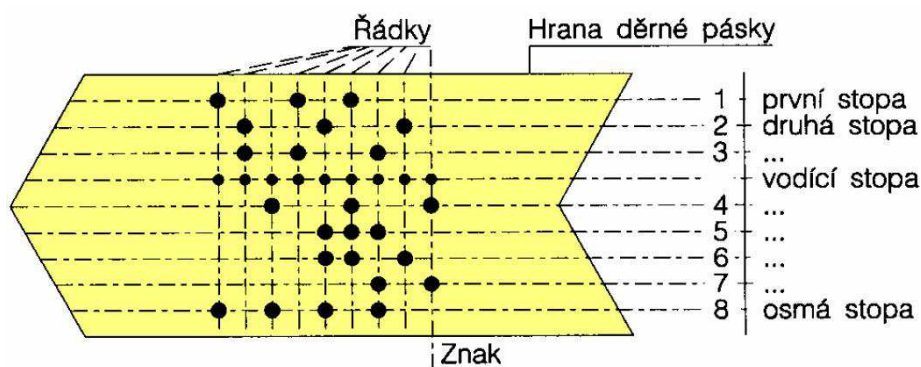
Jelikož vývoj řídicích systémů obráběcích strojů souvisí a je ve velké míře přímo závislý na vývoji v oblasti číslicové techniky, tak i uchování dat a způsob zadávání programových informací do systému prošel určitým vývojem. Daný typ datového nosiče se odvíjel od dostupných zdrojů z číslicové techniky. Vstupní informace je možné do řídicího systému zanést pomocí klávesnice, spínačů a přepínačů na ovládacím panelu, přes síťové rozhraní lokální počítačové sítě anebo pomocí paměťového média.

Z počátku byly pro uchovávání a přenos programu používány děrné karty, papírové děrné pásy s šířkou pásu 25,4 mm nebo magnetické pásy s programem zaneseným v podobě ISO kódu. Magnetické pásy byly ale rušeny elektromagnetickými poli v okolí elektrických motorů. Proto se jejich využití u těžkých obráběcích strojů oproti děrným štítkům v běžné praxi moc nerozšířilo.

Na Obr. 2.4 je zobrazen příklad části programu zanesený na děrném papírovém pásu s klíčem jednotlivých znaků ISO kódu v Tab. 2.1.

1.	Význam užitých adres	ISO DR 1314								Znak
		8	7	6	5	4	3	2	1	
2.	vyjádření velikosti funkce nebo dráhy			•	•		•			0
3.	vyjádření velikosti funkce nebo dráhy	•		•	•		•		•	1
4.	vyjádření velikosti funkce nebo dráhy	•		•	•		•	•		2
5.	vyjádření velikosti funkce nebo dráhy			•	•		•	•	•	3
6.	vyjádření velikosti funkce nebo dráhy	•		•	•		•	•		4
7.	vyjádření velikosti funkce nebo dráhy			•	•		•	•	•	5
8.	vyjádření velikosti funkce nebo dráhy			•	•		•	•	•	6
9.	vyjádření velikosti funkce nebo dráhy	•		•	•		•	•	•	7
10.	vyjádření velikosti funkce nebo dráhy	•		•	•	•	•			8
11.	vyjádření velikosti funkce nebo dráhy			•	•	•	•		•	9
12.	úhlový rozměr kolem osy X		•				•		•	A
13.	úhlový rozměr kolem osy Y		•				•	•		B
14.	úhlový rozměr kolem osy Z	•	•				•	•	•	C
15.	třetí posuvová funkce		•				•	•		D
16.	druhá posuvová funkce	•	•				•	•	•	E
17.	posuvová funkce	•	•				•	•	•	F
18.	přípravná funkce		•				•	•	•	G
19.	řazení korekcí		•			•	•			H
20.	interpolační konstanty	•	•			•	•		•	I
21.	pomocné funkce		•			•	•	•	•	M
22.	číslo bloku		•			•	•	•		N
23.	otáčky vřetene		•		•		•	•	•	S
24.	pohyb rovnoběžně s osou X		•		•		•	•	•	U
25.	primární pohyb v ose Y		•		•	•	•		•	Y
26.	konec bloku	•				•	•	•	•	LF
27.	mezera	•		•			•			SP
28.	konec programu						•			-

Tab. 2.1 - Tabulka zápisu vybraných symbolů ISO kódu [22]



Obr. 2.4 - Část programu na děrném pásku [22]

Na počátku 70. let dvacátého století se v číslicové technice začala používat první magnetická datová média – diskety. To umožnilo přenášení dat mezi jednotlivými počítači a stroji a zároveň čtení a editaci programu přímo v obráběcím stroji. Nejprve to byly diskety o velikosti 8'' s kapacitou 160 kB, ke konci 80. let nahrazeny disketami 5,25'' s kapacitou až 1,2 MB a v polovině 90. let 20. století přišly na řadu diskety o rozměru 3,5'' s kapacitou 1,44 MB. Při větších nárocích na kapacitu přenosového média byly používány i Zip diskety dosahující kapacity až 250 MB. Ještě dnes se můžeme v některých starších provozech setkat s řídicími systémy obsahující vstupní rozhraní pro 3,5'' diskety.

Na přelomu 20. a 21. století se začaly pro uchovávání a přenos dat používat mnohem spolehlivější záznamová média CD-ROM s kapacitou od 650 MB. O pár let později došlo k masovému rozšíření paměťových karet a DVD-ROM s vysokou kapacitou. V CNC technice byl nejčastěji používaný formát CF – Compact Flash karet (nejčastěji od 16 MB do několika desítek GB) a následně Flash-disků s konektorem USB (nejčastěji od 64 MB do několika desítek GB). V současné době se již program do řídicího systému nahrává převážně přes lokální síť LAN a v prostředí CNC obráběcích strojů takovému propojení a řízení říkáme DNS (Distributive Numerical Control).

U moderních paměťových médií a současných možnostech přenosu dat, odpadá dříve nezbytná ochrana před prachem, vlhkem, magnetickým polem a mechanickým poškozením.

2.3 CAD/CAM vývoj

Jak bylo uvedeno na začátku kapitoly, u NC a CNC obráběcích strojů byl a je kladen důraz na vysokou produktivitu. To v tržní ekonomice znamená, že stroj musí v minimálním čase a s minimálními náklady maximalizovat zisk. Takové požadavky jsou v době, kdy nároky na tvarovou složitost, jakost výroby a výrobní přesnost stále stoupají, velmi obtížně splnitelné s konvenčními stroji a nekomplexním systémem. Řešením je automatizace výrobního procesu a integrace počítačové podpory do všech fází výroby – CIM.

Vysvětlení v dnešní době používaných zkratk je uvedeno v Tab. 2.2.

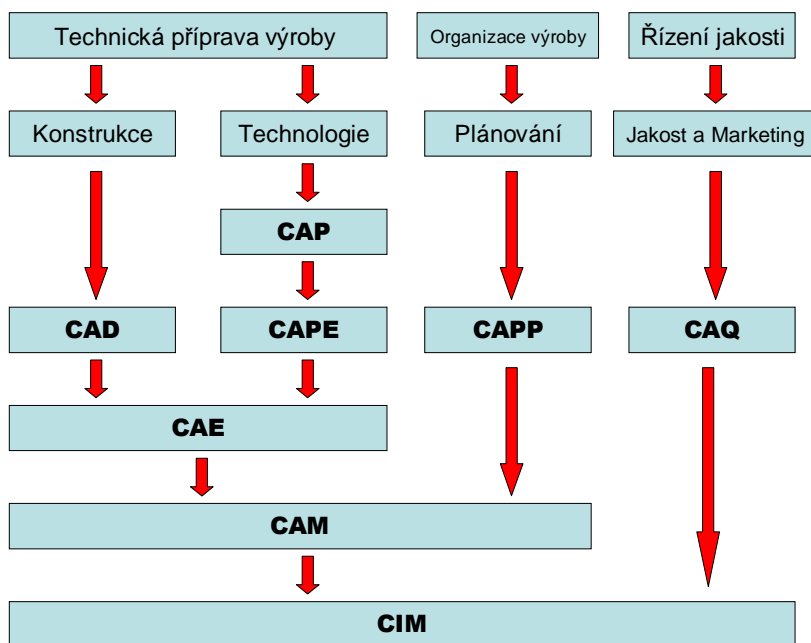
Zkratka	Vyjádření v původním jazyce	Význam
CIM	Computer Integrated Manufacturing	Počítačem integrovaný výrobní systém (výroba)
CAM	Computer Aided Manufacturing	Systém počítačové podpory výroby, který zahrnoval přímé řízení NC techniky, robotů, mezioperační dopravu materiálu, polotovarů i výrobků a nástrojů
CAE	Computer Aided Engineering	Systém počítačové podpory inženýrských činností
CAD	Computer Aided Design	Počítačová podpora procesu konstruování
CAPE	Computer Aided Production Engineering	Systém pro tvorbu a údržbu informací v TPV (technologická příprava výroby), který zahrnuje plánování výroby, technologičnost konstrukcí, tvorbu technologických postupů, NC programů a volbu nástrojového i měřicího vybavení
CAP	Computer Aided Programming	Systém pro zpracování NC programu stroje

CAPP	Computer Aided Poces Planning	Systém, který zahrnuje plánování výroby, včetně návrhu a tvorby korekcí plánů s ohledem na dodržování smluvených termínů zakázek a požadavků na materiální i nástrojové vybavení (zajištění)
CAQ	Computer Aided Quality	Systém počítačové podpory kontroly a řízení jakosti
CA	Computer Aided	Počítačová podpora
NC	Numerical Control	Číslicové řízení operací obrábění (přímé vkládání číslicových údajů)
CNC	Computer Numerical Control	Počítačem řízený NC stroj
DNC	Direct Numerical Control	Centrálním počítačem řízená a kontrolovaná síť NC strojů

Tab. 2.2 - Seznam používaných zkratk

Celková koncepce počítačem integrovaného výrobního systému byla stanovena již v 70. letech dvacátého století. Schéma návaznosti vzájemných systémů je znázorněno na Obr. 2.5.

Integrace výpočetní techniky do výroby přineslo významné změny v technologiích. Zdokonalování počítačové techniky mělo za následek jejich častější aplikaci do různých fází přípravy dokumentace a samotné přípravy výroby. Z rýsovacích prken se konstruování přeneslo do CAD aplikací. Navazující technologické činnosti mohly začít využívat elektronicky zanesená data v CAD systému. Pomocí systému CAPE začaly být tvořeny výrobní postupy a vzájemným propojením CAPE s CAD vznikl systém CAE, který zajišťuje podporu konstruování výrobku z hlediska jeho funkce a technologických požadavků. O zpracování technického postupu výroby a tvorbu NC programu se stará systém CAP. Řízení a sledování termínů dodávek, materiálových požadavků a potřebného nástrojového vybavení zajišťuje systém CAPP, který je zastřešen počítačovým systémem CAM. Ten se stará o celkový harmonogram, plánování a přípravy výroby.



Obr. 2.5 - Schématické znázornění vzájemné návaznosti jednotlivých systémů

3 Principy automatického rozpoznávání a proměrování obrobku.

Jelikož je tato práce zaměřena na popis možností automatizovaného měření na těžkých, číslicově řízených obráběcích strojích a zpracována ve spolupráci se společností ŠKODA MACHINE TOOL a.s. – výrobce těžkých obráběcích strojů, bude se následující kapitola věnovat systémům a zařízením využitelných pro obráběcí stroje ŠKODA.

Protože čas strávený ručním ustavováním polohy obrobku vůči stroji a kontrolou hotových výrobků není zanedbatelný a náklady s tím spojené je lepší investovat do navýšení času, při kterém samotný CNC stroj obrábí, je vhodné používat moderní automatické obrobkové sondy. Jejich použitím lze výrazně zkrátit nevýrobní časy a zjednodušit obsluhu CNC strojů. Nezanedbatelným přínosem obrobkových sond je také eliminace špatného ustavení obrobku a následného nesprávného opracování vlivem lidské chyby.

Obzvláště u těžkých číslicově řízených obráběcích strojů je proměrování obrobku velmi komplikované a vzhledem k jejich velkým rozměrům a hmotnostem je použití standardních měřících center CMM (Coordinate Measuring Machines) nemožné. Pracovní pojezdy u největších strojů mohou dosahovat délky až 30m a hmotnost obrobků se může pohybovat v řádu stovek tun. Proto není téměř jiná možnost, jak provádět automatické měření obrobků, než s použitím obrobkových sond pro obráběcí stroje, vkládané přímo do jejich pracovního vřetene, případně alternativními mobilními měřícími systémy.

V současné době je nejpoužívanějším typem obrobkových sond pro obráběcí stroje provedení sond s 3D dotykem. Dotykové sondy s jednosměrným nebo dvousměrným dotykem se již standardně nevyrábí a jejich použití by bylo časově náročnější vzhledem k nutnosti pootáčení pracovního vřetena stroje vůči měřenému obrobku.

3.1 Rozdělení obrobkových sond vhodných pro obráběcí stroje:

Dotykové sondy využívané pro těžké číslicově řízené obráběcí stroje vkládané do vřetene nástroje rozdělujeme dle základních vlastností a konstrukčního provedení:

- dle počtu snímacích os: - jednosměrné
- dvousměrné
- 3D dotykové sondy
- dle přesnosti: - sondy se standardní přesností
- sondy s vysokou přesností
- dle typu propojení s řídicím systémem: - sondy kabelové
- sondy s bezdrátovým přenosem dat
- dle typu bezdrátového přenosu: - sondy s infračerveným přenosem
- sondy s radiovým přenosem
- sondy s indukčním přenosem informace

3.2 Princip funkce obrobkových dotykových sond

Funkce dotykových sond vkládaných do vřetene obráběcího stroje je téměř u všech výrobců stejná. Tělo sondy je vybaveno snímacím hrotem na konci opatřeným kuličkou. Snímací hrot se při kontaktu s obrobkem vychýlí nebo stlačí ze své klidové polohy a následně je sondou vygenerován signál o zaznamenání kontaktu s obrobkem. Sonda je principiálně velmi přesný spínač.

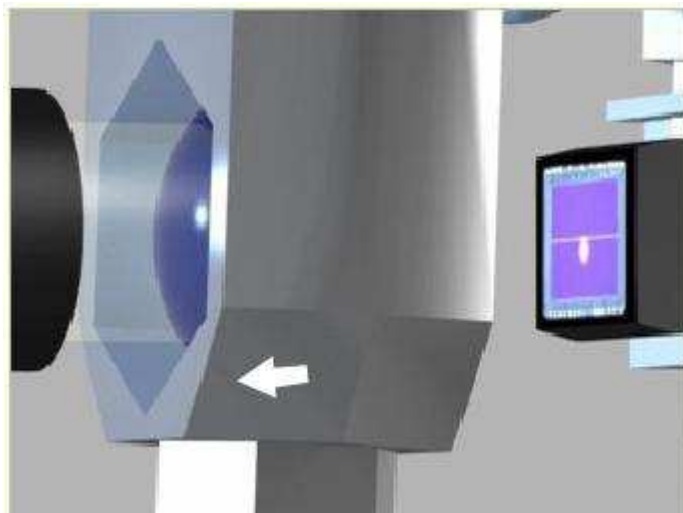
V současné době nejpoužívanější 3D dotykové obrobkové sondy snímají ve směrech os stroje $\pm X$, $\pm Y$ a $-Z$. Snímáním obrobku ze strany dojde k horizontálnímu vychýlení snímacího hrotu nebo snímáním obrobku proti sondě dojde ke stlačení hrotu ve vertikálním směru. Při vychýlení hrotu sonda rozezná kontakt s obrobkem, vygeneruje patřičný signál a odešle jej do přijímací jednotky která tuto informaci předá do řídicího systému stroje. Řídicí systém obdržený signál zpracuje jako okamžik, kdy došlo ke kontaktu snímacího hrotu s obrobkem a uloží souřadnice polohy odečtené z odměřovacího systému stroje v tomto okamžiku. Tím došlo ke zjištění souřadnice polohy měřeného místa. [7,20]

3.2.1 Sensory vychýlení a stlačení snímacího hrotu

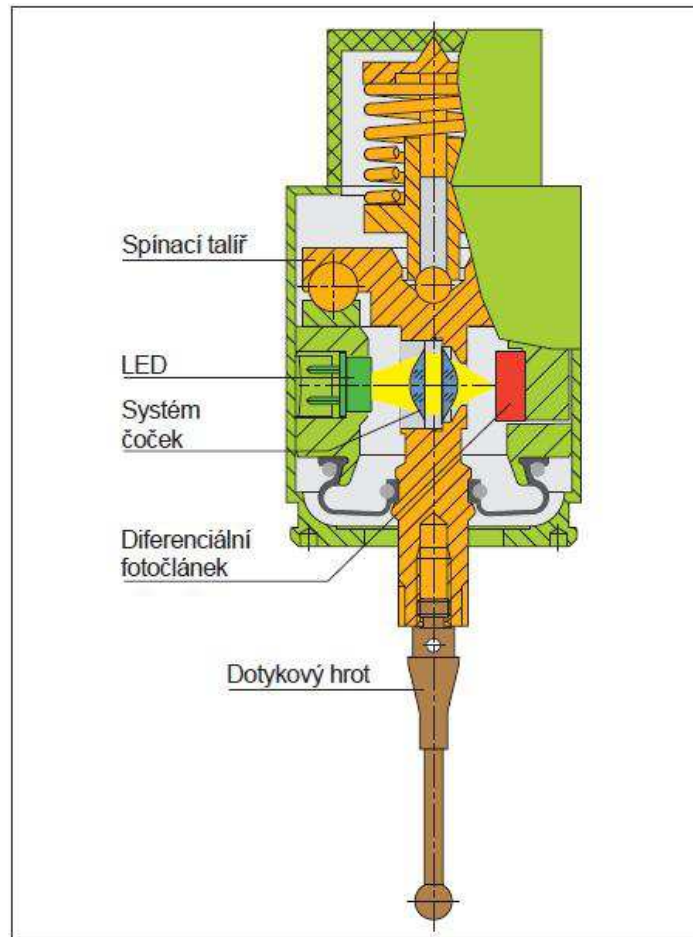
Různí výrobci používají různé druhy senzorů vychýlení a stlačení snímacího hrotu sondy stejně jako odlišné způsoby uložení snímacího hrotu v těle sondy. V následujících odstavcích jsou uvedeny a popsány jednotlivé skupiny.

3.2.1.1 Optické senzory

Dotykové sondy s optickým senzorem pracují na principu optického spínače. Světelné paprsky generované LED diodou procházející skrze soustavu optických čoček a jsou zaostřeny na tenký paprsek dopadající jako jeden bod na optický diferenciální fotočlánek. Při vychýlení snímacího hrotu sondy dojde k pohybu optické soustavy a k vychýlení její osy. Tím se vychýlí bod dopadajícího světelného paprsku a diferenciálním fotočlánekem je vygenerován spínací signál viz. Obr. 3.1 Ten je dále zpracován řídicím systémem stroje. Zjednodušený řez tělem dotykové sondy s optickým senzorem je znázorněn na Obr. 3.2.



Obr. 3.1 - Znáornění funkce optického spínače [1]



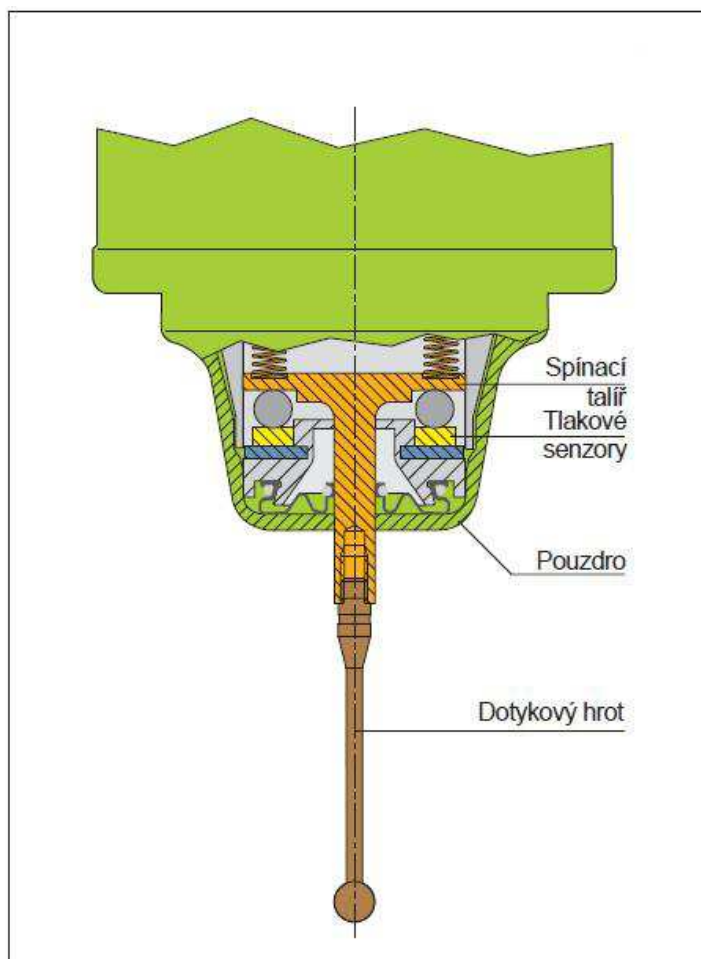
Obr. 3.2 - Zjednodušený řez tělem obrobkové sondy s optickým senzorem [7]

Snímací hrot bývá nejčastěji pevně spojen a uložen v trojbodovém uložení, které je z fyzikálního hlediska nejstabilnější. Velikou výhodou je u tohoto druhu snímání provoz optického spínače bez mechanického opotřebení. Díky tomu je možné dosáhnout dlouhodobé stability a opakovatelnosti i při častém měření, které je využíváno například v aplikacích měření během procesu obrábění.

3.2.1.2 Tlakové senzory

Sondy vybavené velmi přesným tlakovým senzorem generují signál na základě analýzy síly působící při vychýlení nebo stlačení snímacího hrotu na tlakové senzory. Jednotlivé síly na tlakové senzory působící přes trojbodového uložení, jsou elektronicky vyhodnocovány, čímž je umožněno stejnoměrné přesnosti snímání v celém rozsahu 360°. Při snímání obrobku dojde k vychýlení pozice hrotu a jednotlivé tlakové senzory vyhodnotí působící síly. Při překročení mezní hodnoty na tlakových snímačích dojde ke generování signálu, který je odeslán do řídicího systému stroje. Díky malé potřebné snímací síle

je dosaženo vysoké přesnosti a reprodukovatelnosti snímání. Na Obr. 3.3 je znázorněn zjednodušený řez sondou s tlakovým senzorem.



Obr. 3.3 - Zjednodušený řez sondou s tlakovým senzorem [7]

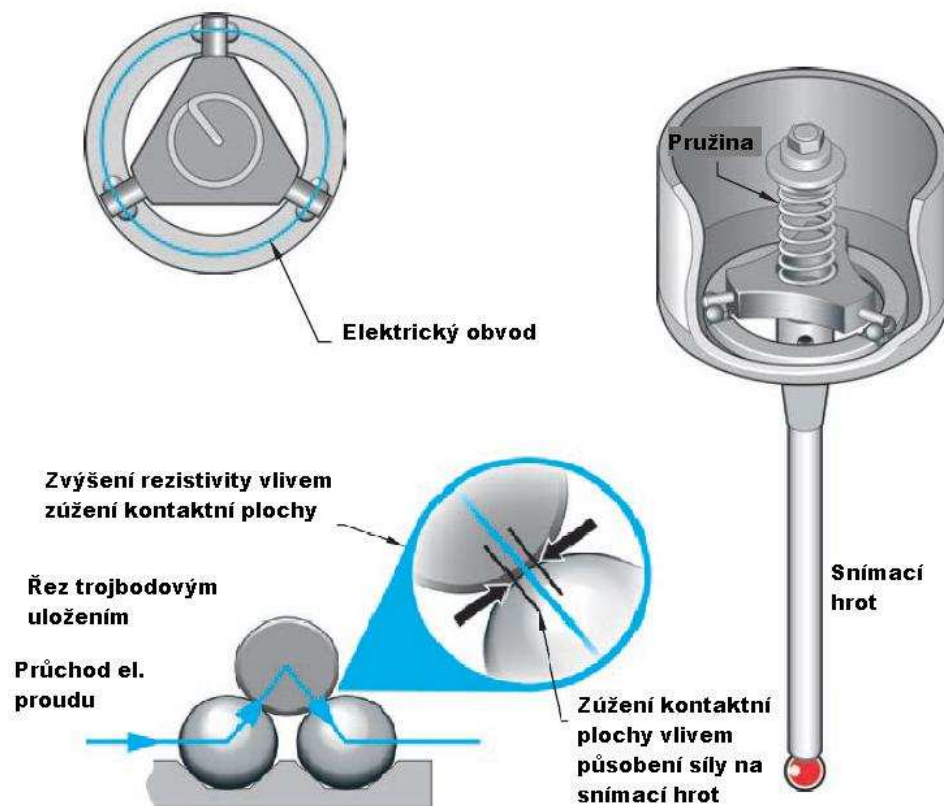
Reprodukovatelnost snímání je definována odchylkami, které jsou naměřeny během snímání kontrolního vzorku na stejném místě ze stejného směru.

Přesnost snímání můžeme popsat jako odchylku, ke které dojde snímáním kontrolního vzorku z různých směrů při stejné okolní teplotě.

3.2.1.3 Odporové senzory

Odporové senzory používané v dotykových sondách pracují na principu snímání odporu průchodu elektrického proudu. Snímací hrot je uložen v trojbodovém uložení pomocí válečku dosedající mezi dvě kuličky. Při klidové poloze snímacího hrotu prochází elektrický proud skrze elektrický obvod s určitým elektrickým odporem. Dojde-li k vychýlení nebo stlačení snímacího hrotu vlivem dotyku, naroste hodnota elektrického odporu v elektrickém

obvodu způsobené zúžením kontaktní plochy válečků a kuliček v uložení hrotu viz. Obr. 3.4. Zvýšení hodnoty elektrického odporu přesahující mezní hodnotu vygeneruje spínací signál.



Obr. 3.4 - Funkce dotykové sondy s odporovým senzorem [8]

3.2.1.4 Tenzometrické senzory

Někteří výrobci využívají velice přesné tenzometrické snímače. Ty snímají působící síly a momenty ve všech třech osách. Jejich princip je založen na snímání mechanických změn povrchového napětí snímače vlivem jeho deformace. Tento typ snímačů se ale obvykle nepoužívá v dotykových sondách pro těžké CNC obráběcí stroje. [8,20]

3.2.2 Přenos signálu do řídicího systému

Pro přenos signálů z těla sondy se používají různé principy mající své výhody i nevýhody. Dále jsou uvedeny jednotlivé způsoby propojení snímací sondy s řídicím systémem stroje.

3.2.2.1 Přenos signálu pomocí kabelu

Jedná se o dotykové sondy, které je nutné vkládat do pracovního vřetene stroje ručně. Před vložením sondy je nezbytné zajistit vřeteno proti otáčení z důvodu možného poničení přívodního kabelu k sondě příkazem v CNC programu. Kabel slouží u tohoto druhu sond k napájení a přenosu signálu do CNC systému stroje jak je zobrazeno na Obr. 3.5.

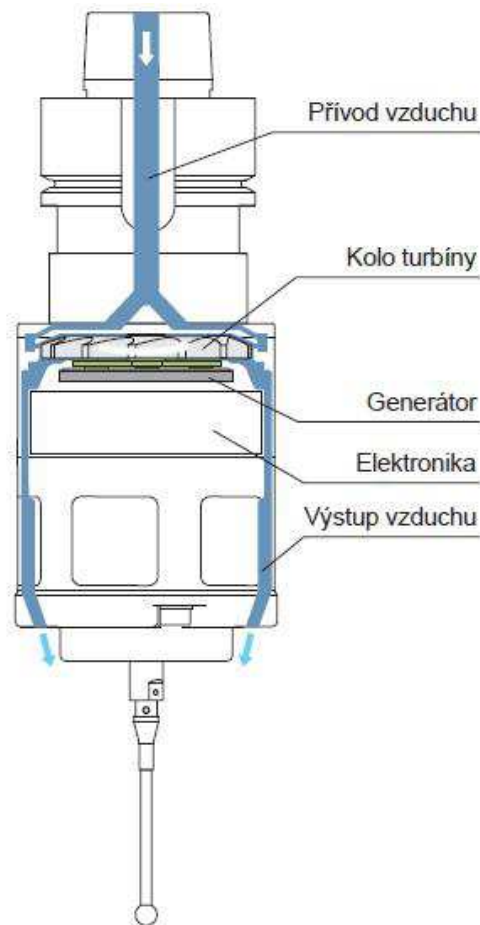


Obr. 3.5 - Dotyková sonda Heidenhain řady TS 200 [7]

3.2.2.2 Přenos signálu bezdrátový

K bezdrátovému přenosu signálů mezi komunikačním modulem umístěným v těle sondy a přijímačem, který je připojen k řídicímu systému stroje, se používá zejména optický nebo radiový přenos. Na trhu existují i systémy s indukčním přenosem signálu. Ten se ale v praxi téměř nepoužívá. Vzhledem k absenci napájecího kabelu jsou sondy napájeny nejčastěji pomocí baterií nebo akumulátorů se standardizovaným rozměrem AA. Existují speciální sondy se zvláštním nárokem na dlouhodobý provoz bez zásahu obsluhy potřebné k výměně baterií. Takové sondy obsahují v těle malou vzduchovou turbínu, která slouží k napájení sondy. Pomocí vzduchové turbíny se roztáčí vlastní malý generátor, který nabíjí velkokapacitní kondenzátory. Ty dokáží napájet elektrické obvody sondy po dobu až 120s (Obr. 3.6). Pro takový druh napájení je ale potřeba obráběcí stroj s přívodem stlačeného vzduchu skrz pracovní vřeteno. Sondy s bezdrátovým přenosem jsou určené

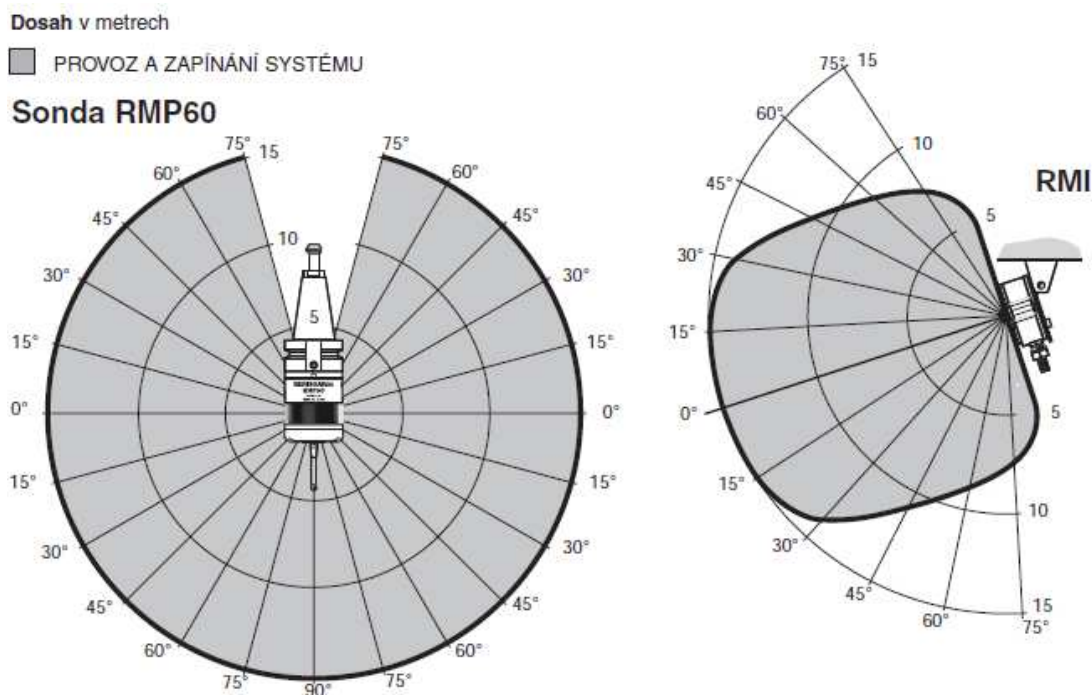
pro těžké číslicově řízené obráběcí stroje, které jsou svými rozměry předurčeny k bezkabelovému propojení a přenosu dat. Je možné je umístit do zásobníku automatické výměny nástrojů a zakládání do pracovního vřetena může být prováděno automatickým cyklem. K zahájení činnosti bezdrátové dotykové sondy je potřeba sondu zapnout nebo uvést do pohotovostního režimu. To u bezdrátových sond může být zajištěno vysláním infračerveného nebo radiového signálu do těla sondy, roztočením pracovního vřetena při kterém dojde vlivem odstředivé síly k sepnutí spínače (například při dosažení 500 ot./min anebo upnutím kuželu do vřetena.



Obr. 3.6 - Princip napájení dotykové sondy Heidenhain TS 444 s generátorem poháněným vzduchovou turbínou [7]

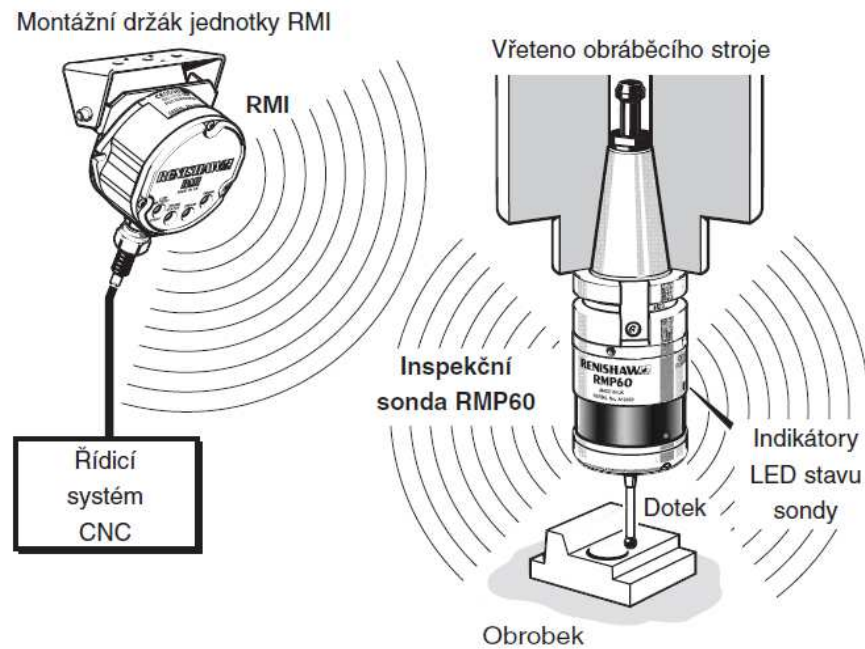
3.2.2.2.1 Radiový přenos

Radiový přenos spínacího signálu je vhodný pro těžké obráběcí stroje. Sondy s radiovým přenosem vysílají spínací signál do všech směrů s dosahem typicky do 15 m (Obr. 3.7) a v ideálních podmínkách i více. Hodí se v aplikacích, u kterých nelze využít optického přenosu signálu s přímou viditelností nebo využití odrazu infračerveného paprsku.



Obr. 3.7 - Pracovní rozsah radiového signálu sondy Renishaw RMP 60 a přijímače RMI [8]

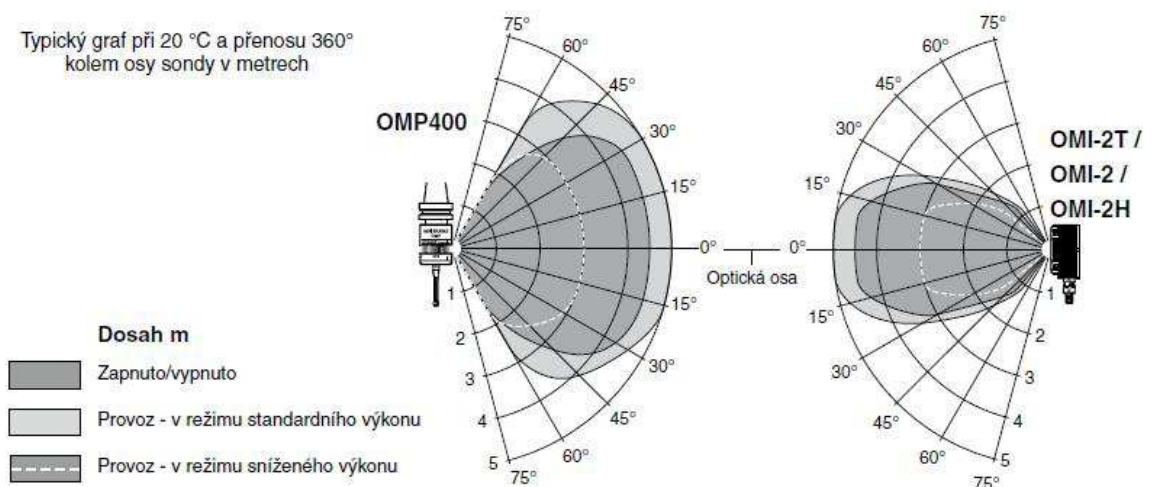
Radiový přenos má výhodu průchodu signálu skrz určité materiály. Proto je možné přijímací jednotku umístit i mimo pracovní prostor stroje. Radiový přenos pracuje nejčastěji ve frekvenčním pásmu 2,4 GHz, které je využíváno například u technologie WiFi nebo Bluetooth. To z důvodu volného bezlicenčního pásma na většině světových trhů kontrolovaných radiokomunikačním regulačním úřadem. Pásmo 2,4 GHz je veřejně přístupné a vzhledem k tomu, že radiové sondy jsou klasifikovány jako zařízení s krátkým dosahem, není potřeba povolení pro vysílání v tomto frekvenčním pásmu. Pro zabezpečení radiového přenosu spínacích signálů v provozních podmínkách s výskytem rušení jsou zavedeny různé systémy zabezpečení a adresování přenosu, jako například přenos s přepínáním kanálů, či automatickým rozpoznáváním zarušených, nebo obsazených kanálů.



Obr. 3.8 - Schéma radiového přenosu [8]

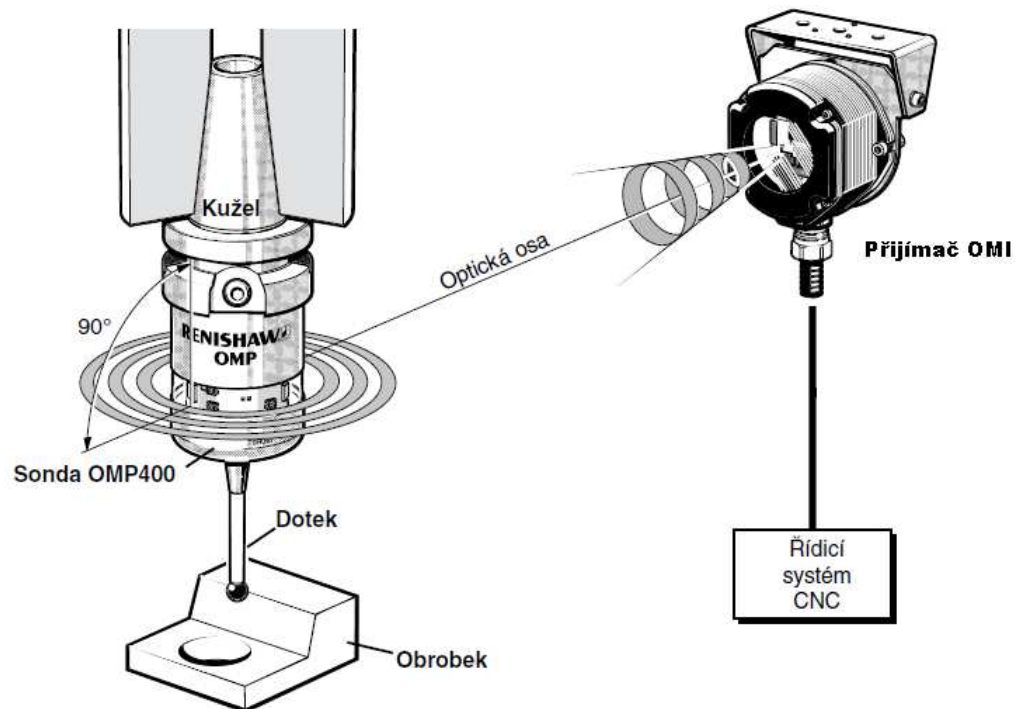
3.2.2.2 Optický přenos

Optický přenos spínacího signálu využívá infračervené technologie ke komunikaci mezi sondou a přijímací jednotkou. Infračervený přenos signálu je odolný vůči okolnímu rušení a je možné využívat i jeho odrazu. Hlavní výhodou sond s optickým přenosem signálu je vysoká přesnost a rychlost přenosu signálu a tím dosažení vysoké snímací rychlosti. Použitá metoda nosné frekvence bývá nejčastěji 5 MHz. Po obvodu těla sondy jsou umístěny infračervené vysílací LED diody a přijímací moduly. Nevýhodou infračerveného přenosu signálu je užší oblast pracovního rozsahu a kratší dosah signálu do 10m (Obr. 3.9).



Obr. 3.9 - Pracovní rozsah infračerveného signálu sondy Renishaw OMP 400 [9]

Vzhledem ke kratšímu dosahu a větším nárokům na směřování vysílací a přijímací části sondy je možné umístit do pracovního prostoru dvě přijímací jednotky s použitím směšovače signálu. Vzhledem ke svým vlastnostem jsou sondy s optickým přenosem signálu používány na menších strojích s menšími nároky na dosah signálu.



Obr. 3.10 - Schéma infračerveného přenosu [9]

3.2.2.2.3 Kombinovaný radiový a infračervený přenos

Pro využití ve speciálních aplikacích byly vyvinuty sondy kombinující výhody radiového a optického přenosu spínacího signálu. Díky kombinaci těchto dvou technologií přenosu je možné použít tyto sondy pro nejnáročnější aplikace a pro různé typy obráběcích strojů.

3.2.2.2.4 Indukční přenos

Existuje také technologie přenosu signálu mezi dotykovou sondou a CNC systémem obráběcího stroje pracující na základě indukčního přenosu informace. Sonda je vybavena čepem, který se zasouvá do dutiny protilehlé části dotykové sondy. Komunikace a napájení

sondy následně probíhá pomocí elektromagnetické indukce mezi cívkami oddělené vzduchovou mezerou.

3.2.3 Parametry vybraných dotykových sond

	Renishaw RMP 60	Renishaw OMP 60	Heidenhain TS 440	Hexagon m&h RWP20.41
způsob přenosu signálu	radiový	infračervený	infračervený	radiový
radiové frekvenční pásmo	2.402 – 2.481 GHz	-	-	433,075 MHz – 434,650 MHz
pracovní dosah	0,1 – 15 m	6 m	7 m	14 m
reprodukovatelnost snímání (2σ)	1.0 μm	1.0 μm	1.0 μm	1.0 μm
stupeň krytí IP XX	IP X8	IP X8	IP 67	IP 68
směr snímání	$\pm X, \pm Y, -Z$	$\pm X, \pm Y, -Z$	$\pm X, \pm Y, -Z$	$\pm X, \pm Y, -Z$
zdvih doteku sondy	X, Y = $\pm 18^\circ$, Z = -11 mm	X, Y = $\pm 18^\circ$, Z = -11 mm	X, Y = $\pm 5\text{mm}$, Z = -5 mm	X, Y = $\pm 12,5^\circ$, Z = -6 mm
typ a životnost baterií	2 x AA 1,5 V, 140 hodin	2 x AA 3.6 V, 300 hodin	2 x AA 1 - 4 V, 200 hodin	1 x 9 V – výrobce neudává

Tab. 3.1 - Vybrané parametry 3D dotykových sond vhodných pro stroje ŠKODA [7,8,9,10]

3.2.4 Způsob řízení sond

Sondy bývají nejčastěji připojeny přímo do řídicího systému stroje. Řídicí systémy většinou takové připojení sond podporují bez nutnosti využití dalších obslužných softwarů a již obsahují předdefinované měřicí cykly. Ty jsou v databázi uloženy v obecné podobě a přizpůsobují se konkrétní úloze měření zadáním vstupních parametrů. Výhoda tohoto způsobu připojení je v rychlejší odezvě při samotném snímání, jelikož signály

se zpracovávají přímo v řídicím systému. Sondy mohou pracovat v automatickém nebo ručním režimu.

Při ručním měření volí obsluha obráběcího stroje pomocí tlačítek na ovládacím panelu požadovaný způsob měření. Například kompenzaci šikmého ustavení obrobku natočením souřadnicového systému obráběcího stroje. Obsluha najede do blízkosti obrobku a stiskne tlačítko pro pohyb pracovního vřetena s vloženou sondou v požadovaném směru měření. Řídicí systém následně zaznamená souřadnice snímaného bodu, uloží je do paměti a automaticky provede kompenzaci natočením souřadného systému.

U automatického způsobu měření je měřicí cyklus ovládán pomocí CNC programu zadáním příslušných NC kódů. Pokud budeme uvažovat stejný požadavek na kompenzaci šikmého ustavení obrobku natočením souřadného systému stroje, je tento proces vykonán na základě čtení CNC programu před začátkem samotného obrábění. Při programování zadáme místo, na které má stroj při měření najíždět. Při programování je potřebné zadat bezpečné rychlosti najíždění stroje, aby při aktivaci spínacího signálu sondou nedošlo v důsledku setrvačnosti ke kolizi a k poškození sondy. Po provedeném měření a natočení souřadného systému se automaticky spustí obráběcí program. Jediným požadavkem pro upnutí obrobku je zhruba rovnoběžné umístění obrobku vzhledem k osám stroje.

K dotykovým sondám je také dodáván podpůrný software, pomocí kterého je možné aplikovat nebo vytvářet vlastní měřicí cykly mimo obráběcí stroj pomocí PC. Do softwaru se importuje model obrobku, na kterém je možné nadefinovat měřené body. Je možné provést i kontrolu kolizních stavů sondy nebo stroje s obrobkem. Hotový model měření se pomocí postprocesoru převede do NC kódu, který je možné nahrát do řídicího systému stroje.

S využitím sondy vložené do vřetena stroje je možné skenovat povrch obrobku a tím generovat CAD model. Toho lze s požadovanou přesností dosáhnout snímáním většího počtu bodů s malým rozstupem na povrchu obrobku.

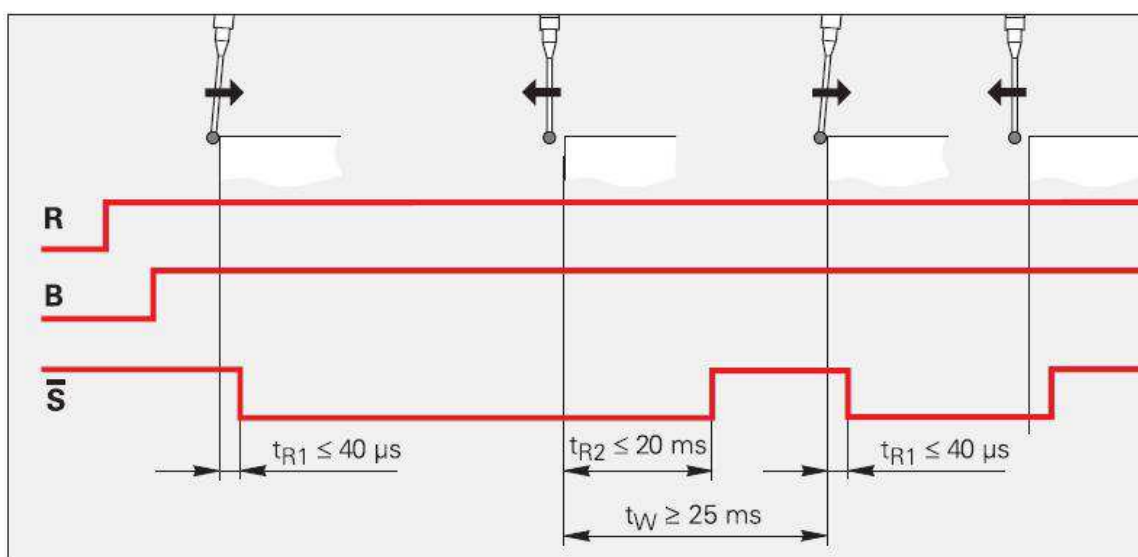
3.2.5 Snímací rychlost, přesnost a reprodukovatelnost snímání

3.2.5.1 Snímací rychlost

Snímací rychlost sond je limitována technickými parametry sondy a závisí na rychlosti najíždění při snímání, na způsobu a době přenosu signálu do CNC řídicího systému, na typu

snímače a na době zpracování signálu v řídicím systému. Snímací rychlost ovlivňuje zejména přesnost snímání a reprodukovatelnost dotykové sondy. Protože rychlost najíždění při snímání obrobku je libovolně definovaný parametr, je vhodné takovou rychlost volit s uvažováním fyzikálních a mechanických parametrů stroje a sondy. Maximální přípustná rychlost při nájezdu bývá do 5m/min.

Při požadavku na vysokou rychlost snímání je nutné uvažovat vzdálenost, za jakou je obráběcí stroj schopný zastavit při zvolené rychlosti po obdržení snímacího signálu ze sondy do řídicího systému. Maximální možná brzdná vzdálenost je určena maximálním vychýlením snímacího hrotu v horizontálním a vertikálním směru a délkou zvoleného snímacího hrotu. Ten bývá dlouhý obvykle 50, 100 nebo 150 mm. Při uvažování celkové brzdné dráhy je nutné počítat i s reakční dobou daného typu snímače a se zpožděním způsobeným vyhodnocením signálu řídicím systémem stroje. Na Obr. 3.11 je znázorněn průběh signálů s popsanou reakční dobou dotykové sondy Heidenhain TS 440. Průběh označený písmenem R je startovací signál, který uvádí svou náběžnou hranou sondu do pohotovostního režimu. Sestupnou hranou se sonda vypíná. Průběh označený písmenem B je signál připravenosti. Ten do řídicího systému stroje posílá informace o tom, že sonda je zapnutá a nachází se v oblasti příjmu přijímacího modulu sondy. Při vychýlení snímacího hrotu se generuje obdélníkový spínací signál \bar{S} . Reakční doba prvního snímání po zapnutí odpovídá hodnotě $t_{R1} \leq 40 \mu s$, následující snímání má reakční dobu kratší $t_{R2} \leq 20 \mu s$. Mezi jednotlivými opakovanými snímání musí být minimální prodleva $t_W > 25 \text{ ms}$.



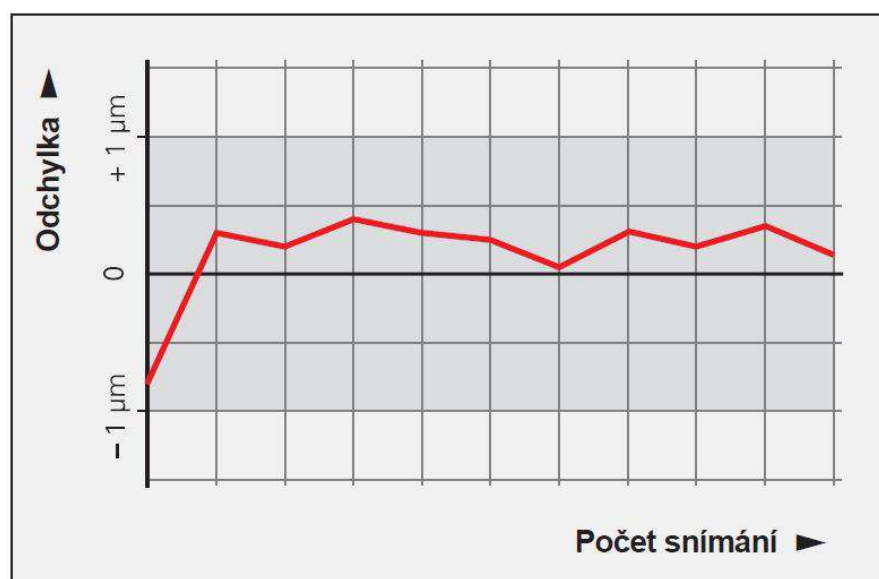
Obr. 3.11 - Průběh signálů s popsanou reakční dobou dotykové sondy Heidenhain TS 440 [7]

3.2.5.2 Přesnost

Přesnost snímání sondy je zjištěná hodnota odchylky od rozměrů referenčního vzorku měřeného z různých směrů při okolní teplotě 22°C. Přesnost sondy je ovlivněna zejména použitým typem snímacího senzoru sondy, materiálem a délkou snímacího hrotu a také poloměrem kuličky na konci snímacího hrotu. Čím větší poloměr, tím nižší je výsledný vliv kvality povrchu obrobku v místě snímání. Celková dosažitelná přesnost při snímání tedy závisí na přesnosti obráběcího stroje a rozlišovací schopnosti jeho odměřovacího systému a přesnosti sondy.

3.2.5.3 Reprodukovatelnost snímání

Reprodukovatelnost snímání 2σ vychází z anglického výrazu (repeatability) a udává odchylky rozměrů ve snímání, ke kterým dojde při opakovaném snímání referenčního vzorku z jednoho směru při stejné orientaci sondy vložené do vřetene stroje při okolní teplotě 22°C. Největší hodnota těchto odchylek z jednoho směru při definované orientaci sondy udává hodnotu reprodukovatelnosti. Na Obr. 3.12 můžeme vidět ukázkou průběhu reprodukovatelnosti. Většina výrobců udává hodnotu reprodukovatelnosti namísto dosahované přesnosti stroje. Firma Renishaw pro sondu RMP 60 udává například hodnotu reprodukovatelnosti 1 μm při rychlosti nájezdu 480 mm/min s délkou snímacího hrotu 50 mm při továrním nastavení spínací síly.



Obr. 3.12 - Ukázkou průběhu reprodukovatelnosti snímání 3D dotykové sondy [7]

3.3 Způsoby využití obrobkových dotykových sond

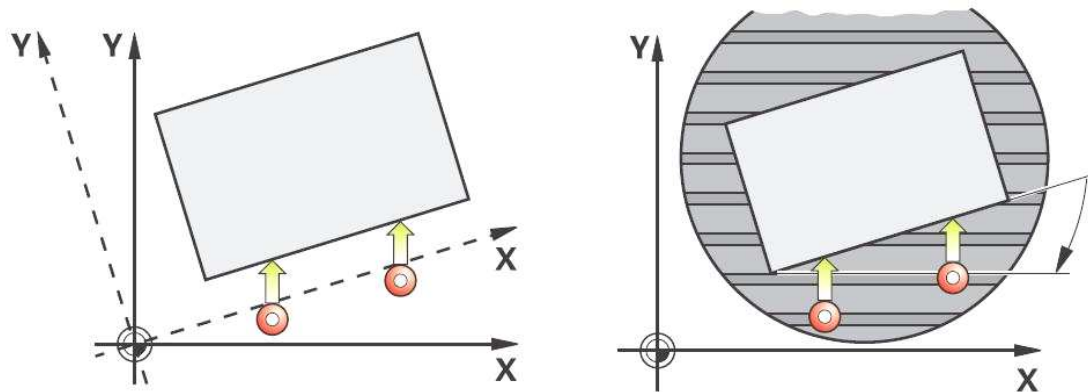
3.3.1 Vyrovnání obrobku

Aby bylo možné opracovat obrobek s požadovanou přesností, jakou umožňuje samotný obráběcí stroj, nebo s požadavky na přesnost dle výkresové dokumentace, musí být obrobek správně ustaven vůči pohybu obráběcího stroje v jeho jednotlivých osách. Důležitost této operace vzniká u již opracovaných obrobků, protože vztažné body se musí nacházet v přesně definovaných polohách. To lze provést třemi různými způsoby.

S využitím speciálních upínacích přípravků, dle kterých se obrobek jednoduše ustaví v pracovním prostoru stroje. Veliké nevýhody těchto přípravků mohou být vysoké náklady na jejich pořízení, jejich jednoúčelové využití nevhodné pro provozy s různorodými požadavky na výrobu, omezený rozsah rozměrů obrobků a čas potřebný k vytvoření takového přípravku.

Druhým nejčastěji používaným způsobem je ruční ustavení obrobku a nastavení vztažných bodů stroje a obrobku pomocí číselníkových úchylkoměrů. Výhodou tohoto řešení jsou velmi nízké náklady na ustavení. Tato metoda je ale spojená s vysokým rizikem výskytu chyby vzniklé lidským pochybením a časovou náročností celého procesu.

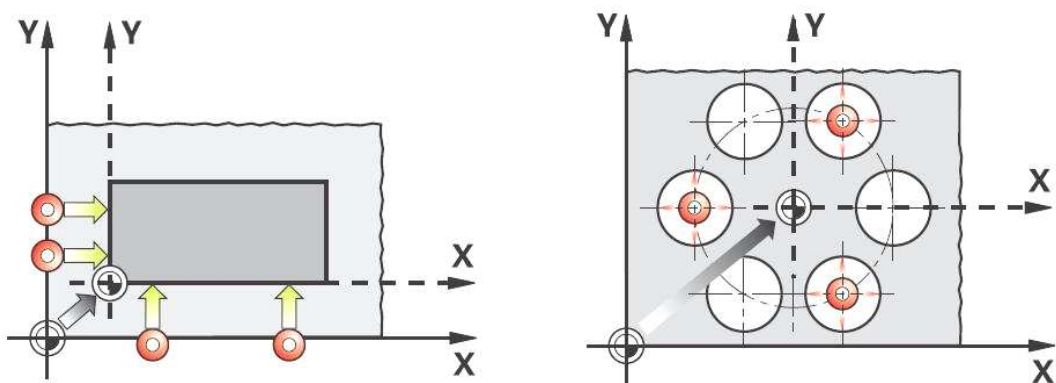
Třetí metoda ustavování obrobku je za pomoci obrobkových 3D dotykových sond, které se upínají do pracovního vřetene stroje. Použití těchto sond má velikou výhodu v eliminaci vzniku chybného upnutí, zkrácení celého procesu průměrně o 75% oproti ruční metodě a možnost měření v plném rozsahu pracovního prostoru stroje. Celý proces určení polohy obrobku v programu řídicího systému probíhá automaticky bez zásahu obsluhy stroje. Obrobek se upne v libovolné poloze v pracovním prostoru stroje. Při upínání a určování pozice obrobku je nutné brát v potaz pouze technické možnosti obráběcího stroje. Dotykovou sondou následně zjistíme nasnímáním jedné plochy, dvou vrtaných otvorů nebo čepů odklon obrobku od pracovní osy stroje [7]. CNC řídicí systém na základě získaných souřadnic míst dotyku vykompenzuje šikmé ustavení obrobku natočením souřadného systému obráběcího stroje nebo využitím technologického příslušenství – natočením upínací desky otočného stolu (Obr. 3.13). Nevýhodou, pro tuto metodu ustavování obrobku, může být pořizovací cena dotykové sondy společně s většími nároky na zkušenosti a znalosti obsluhy CNC stroje.



Obr. 3.13 - Kompenzace šikmého ustavení obrobku a) natočením souřadnicového systému obráběcího stroje nebo b) natočením upínací desky otočného stolu [7]

3.3.2 Nastavení vztažných bodů obrobku

Při zadávání CNC programu pro konkrétní obrobek používáme jeho vztažné body. Bezchybné a rychlé určení vztažných bodů obrobku a jejich souřadnic v pracovním prostoru samotného obráběcího stroje tak výrazně zkracuje nevýrobní čas a zvyšuje přesnost výroby. V závislosti na funkcích dotykových sond a řídicího systému stroje lze pomocí 3D dotykových sond stanovit různé vztažné body (Obr. 3.14).



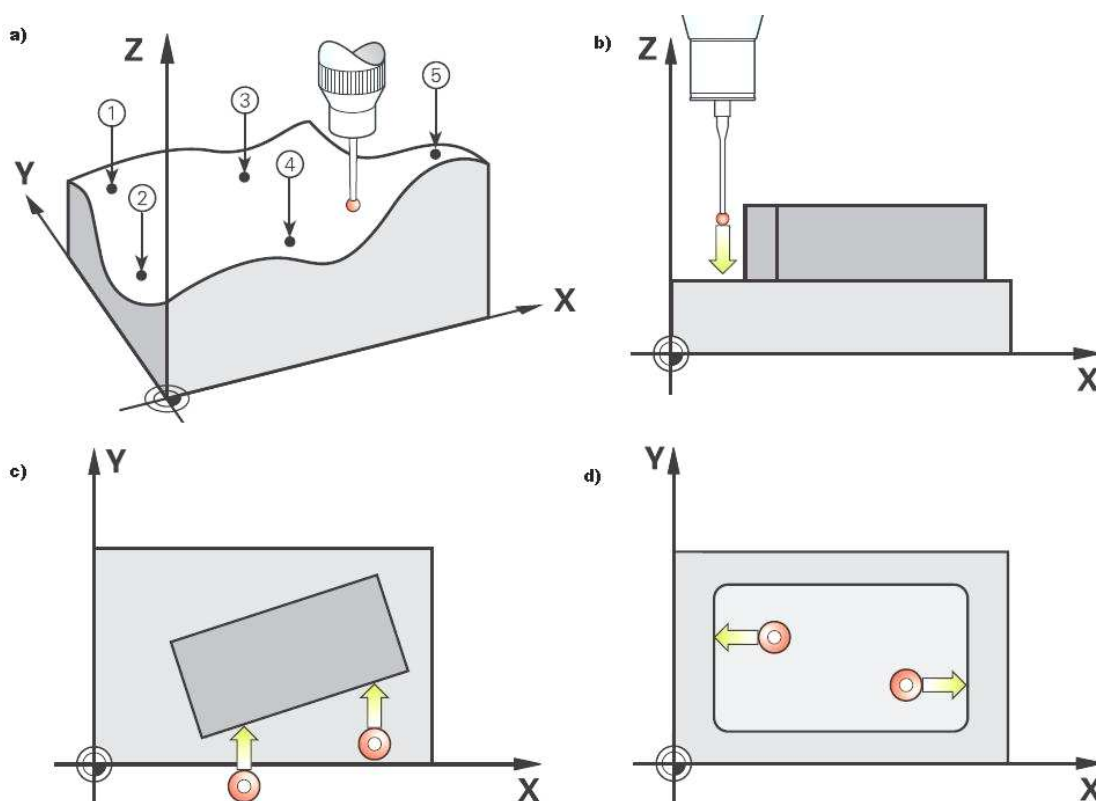
Obr. 3.14 - Určení vztažného bodu obrobku a) vnější roh b) střed roztečné kružnice [7]

3.3.3 Proměření obrobku

Pomocí sond můžeme vyhodnocovat i kvalitu a přesnost mezi jednotlivými obráběcími operacemi pomocí programově řízeného proměření obrobku. Získané souřadnice

polohy měřených míst mohou být použity například ke kompenzaci opotřebení nástroje, k adaptivnímu řízení obráběcího procesu nebo ke kompenzaci rozměrových odchylek způsobené například změnou teploty okolí stroje a tím i vztahu mezi součinitelem teplotní roztažnosti materiálu samotného obrobku se změnou jeho teploty během procesu obrábění. Hodnoty získané během automatizovaného procesu proměrování mohou být použity také k tvorbě protokolu přesnosti výroby k danému obrobku nebo ke sledování provozních vlastností stroje. Tyto informace lze přes místní datovou síť stahovat přímo do počítače s potřebným softwarovým vybavením.

3D dotykové obrobkové sondy jsou schopné snímat libovolné plochy a tvary a s využitím patřičného digitalizačního softwaru je převádět do CAD modelu i přímo na obráběcím stroji (Obr. 3.15). Díky tomu jsme schopní vyhodnotit odchylky od požadovaných hodnot a díky zpětnému nahrání do CNC programu zajistit jejich odstranění.



Obr. 3.15 - Proměrování obrobku a) měření obecných ploch, b) Proměření jednotlivé polohy v jedné ose, c) proměření úhlu přímky nebo roviny d) proměření délky [7]

Mezi hlavní výhody proměrování obrobků přímo na stroji pomocí dotykových sond vkládaných do pracovního vřetene stroje patří tedy možnost automatické korekce během

obráběcího cyklu, zvýšená jistota v bezobslužných provozech, odstranění chybovosti způsobené lidským pochybením a automatická korekce nastavení po proměření prvního kusu obrobku.

3.4 Možnosti rozpoznávání a měření obrobků v pracovním prostoru stroje

V současné době žádný z významných výrobců na světovém trhu nevedl na trh systém automatického rozpoznávání obrobků na pracovišti. Automatizované rozpoznávání a následné proměřování obrobků pro těžké číslicově řízené obráběcí stroje, které mohou mít pracovní rozsah v řádech desítek metrů, je velice komplikovaný proces. Pokud bychom rozpoznávání obrobku, detekci jeho umístění v pracovním prostoru a jeho proměření dělali kompletně s využitím dotykových sond umístěných ve vřetenu stroje, byl by proces velice časově náročný a rizikový z hlediska možné kolize stroje s obrobkem. Vzhledem k pořizovací ceně těžkých CNC obráběcích strojů v řádech desítek milionů korun je takový zdlouhavý systém nepoužitelný zejména z důvodu požadavku na minimalizaci nevýrobních časů stroje.

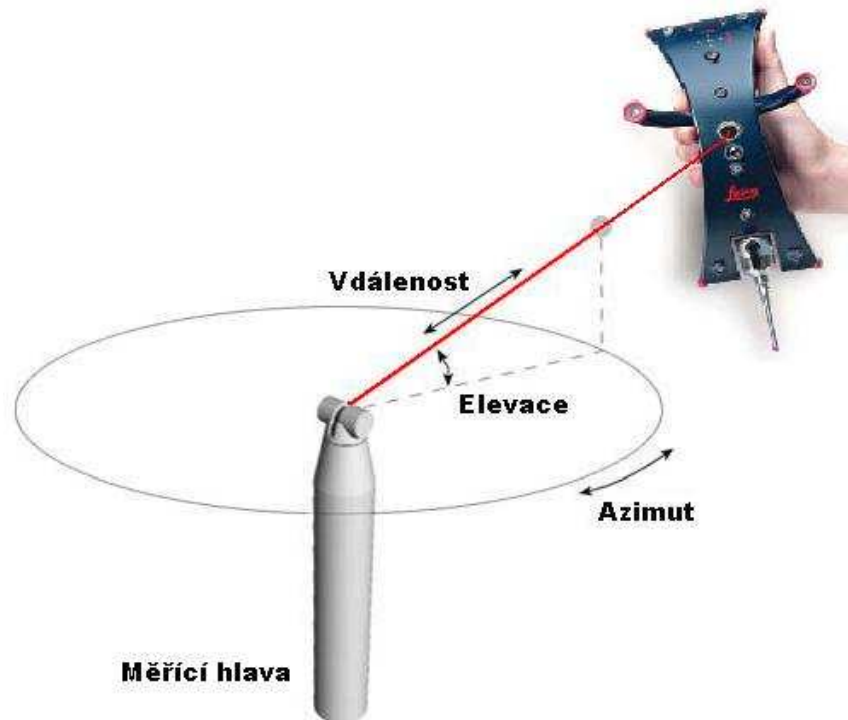
Pro rozpoznání obrobku se nabízí využít systémy, které nejsou přímo závislé na funkci CNC obráběcího stroje, ale s jejichž pomocí lze přenést jednotlivé souřadnice obrobku do CAD systému libovolného PC v místní počítačové síti a následně převést do CNC programu stroje. K takovým účelům mohou sloužit dotykové nebo optické snímací sondy využívající systém určování souřadnic v prostoru pomocí laserové trackovací stanice nebo lze k určení polohy obrobku v prostoru použít 3D laserové skenery.

3.4.1 Laserová trackovací stanice se snímací sondou

Laserové trackovací stanice patří mezi mobilní měřicí systémy, které určují polohu měřeného bodu na základě vztahu mezi polohou měřicí hlavy a reflektorem laserového paprsku umístěném na měřícím dotyku, popřípadě laserovém skeneru. Funkce určování souřadnic je založena na principu měření časového zpoždění mezi vysláním a příjmem odraženého laserového paprsku od reflektoru a na údajích z dvou senzorů natočených v horizontální a vertikální rovině (Obr. 3.16).

Laserová trackovací stanice Leica Absolute Tracker AT 901 dosahuje přesnosti při určování vzdálenosti měřeného bodu od měřicí hlavy interferometrem

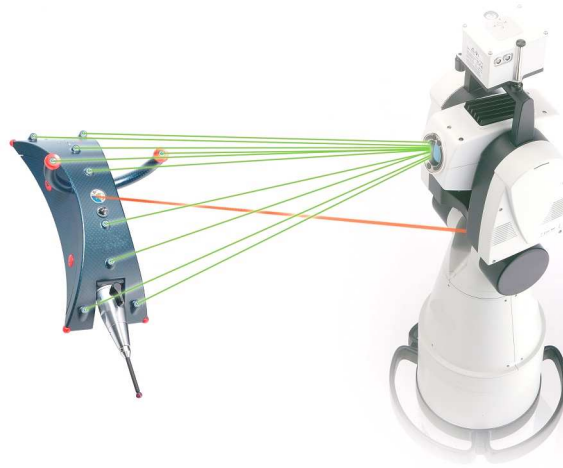
do $0.32 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}/\text{m}$ a při určování úhlu vektoru měřeného bodu dosahuje opakovatelnost měření do $\pm 7.5 \mu\text{m} + 3 \mu\text{m}/\text{m}$ při měření v prostoru ohraničeném rozměry maximálně $2.5 \times 5 \times 10 \text{ m}$. Maximální dosažitelná vzdálenost měření může být až 160 m.



Obr. 3.16 - Princip laserové trackovací stanice [12]

3.4.1.1 Princip funkce

Laserové trackovací stanice využívají pro měření vzdálenosti mezi měřicí hlavou a měřeným bodem princip laserového interferometru blíže popsany v kapitole 4.2.2.4.1. K určení úhlu natočení jsou využity senzory propojené se dvěma servomotory. Těmi je laserová hlava a laserový paprsek směřován automaticky směrem k reflektoru. Reflektor bývá zpravidla umístěn na snímacím zařízení s dotykem doplněný skupinou doplňkových reflektorů a čidel, které usnadňují navádění měřicího laserového paprsku k hlavnímu laserovému reflektoru. S jejich pomocí je měřicí hlava schopna rozeznat pohyb a natočení snímacího zařízení v prostoru a tím zajistit nasměrování laserového paprsku do středu reflektoru a následné správné odečtení souřadnic měřeného bodu (Obr. 3.17). Měřicí hlava je také vybavena dvourozměrným diferenciálním snímačem, který je určen k rozeznání odchylky v nasměrování laserového měřicího paprsku mimo střed reflektoru.



Obr. 3.17 - Doplňkové senzory pro směřování měřícího laserového paprsku [11]

3.4.2 3D laserové skenery

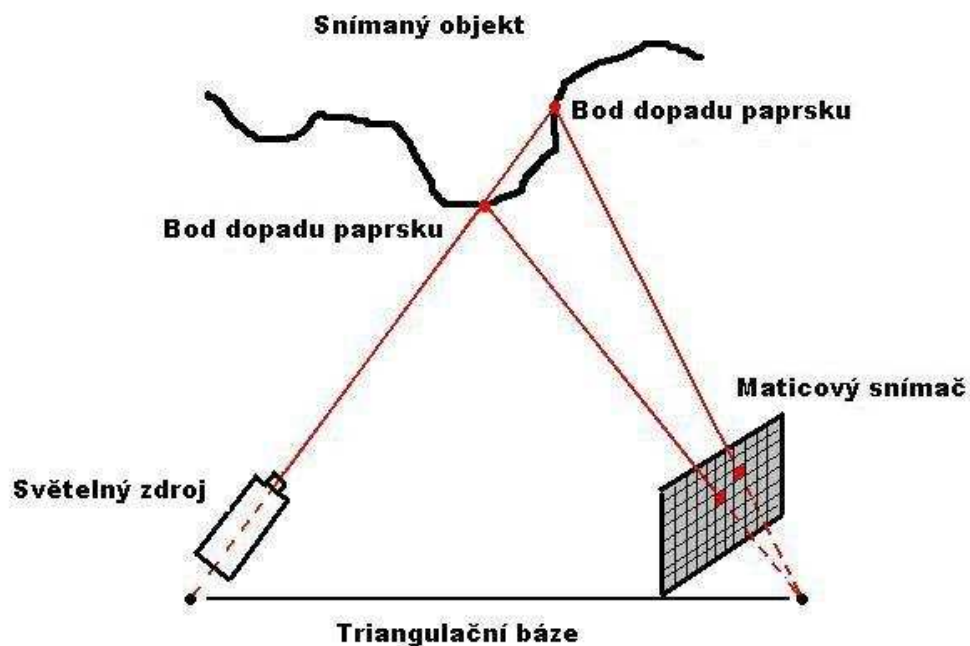
Laserové 3D skenery pracují na principu měření vzdálenosti pomocí interferometru a tedy měření fázového posunu mezi vysílaným a přijímaným laserovým paprskem při odrazu od měřeného předmětu anebo na principu aktivní triangulace. Popis metody měření vzdálenosti pomocí interferometru je blíže popsán v kapitole 4.2.2.4.1.

Jedná se o zařízení principiálně velmi podobné laserové trackovací stanici s tím rozdílem, že laserové 3D skenery nepoužívají k určení pozice měřeného bodu odraženého paprsku zpět do přijímače optickým reflektorem, ale snímají odražený laserový paprsek přímo z povrchu měřeného předmětu.

Protože snímáme laserový paprsek odražený přímo od povrchu měřeného předmětu, je dosah a přesnost měření v porovnání s využitím optických reflektorů horší. Přesnost měření nebo snímání může být ovlivněna druhem a kvalitou povrchu materiálu měřeného předmětu.

3.4.2.1 Princip aktivní triangulace

Metoda aktivní triangulace je založena na fotogrametrické rekonstrukci snímaného objektu nasvícením jeho povrchu laserovým paprskem nebo jiným světelným zdrojem a současným snímáním dopadu světelného svazku na povrch měřeného objektu maticovým snímačem (CCD nebo CMOS snímač).



Obr. 3.18 - Metoda aktivní triangulace

Světelný zdroj, bod dopadu paprsku a snímač tvoří takzvaný triangulační trojúhelník viz. Obr. 3.18. Spojnici mezi světelným zdrojem a snímačem nazýváme triangulační bází a její délka je konstantní. Stejně tak úhel mezi triangulační bází a vysílaným světelným paprskem zůstává neměnný. Úhel, který svírají ramena triangulační báze a odraženého světelného paprsku, je proměnný a je závislý na vzdálenosti bodu dopadu světelného paprsku od laserového skeneru. Jeho hodnota je určena pozicí osvětleného pole maticového snímače. Na základě těchto hodnot systém laserového 3D skeneru určí vzdálenost předmětu od laserového skeneru a společně s úhlem snímací hlavy 3D laserového skeneru ve vertikální a horizontální rovině přesné souřadnice měřeného bodu v prostoru.

K osvětlování povrchu měřeného objektu a k vytváření světelné stopy na povrchu měřeného objektu se používají různé druhy světelných vzorů. Jedná-li se o světelný paprsek promítnutý v ploše jako bod, nazýváme tak jednorozměrnou triangulaci. V případě vysílání laserového paprsku promítnutém v ploše jako pruh jedná se o dvojrozměrnou triangulaci a v případě vysílání strukturovaného světelného svazku se jedná o trojrozměrnou triangulaci. Princip určování polohy zůstává neměnný. K pohybu světelné stopy v prostoru je používáno rozmítání rotujícím zrcátkem v jedné rovině a natáčením snímací hlavy v rovině druhé. [13]

4 Principy automatické kalibrace těžkých CNC obráběcích strojů

Mezi způsoby automatické kalibrace těžkých CNC obráběcích strojů lze uvažovat proměření a kalibraci nástroje pomocí nástrojových sond. Trvalá přesnost při obrábění vyžaduje automatickou a cyklickou kontrolu stavu a opotřebení nástroje. Při proměření pomocí nástrojové sondy jsou načtená data automaticky ukládána do tabulky k příslušnému nástroji a v CNC programu jsou doplněny potřebné rozměrové korekce.

Nástrojové sondy mají význam především v provozech, ve kterých je vyžadován minimální zásah obsluhy stroje do procesu obrábění. Navíc využitím nástrojové sondy přímo na obráběcím stroji odstraní možné riziko zanesení nepřesností při využívání samostatného měřicího stanoviště nástrojů a následného ručního zadávání korekčních parametrů obsluhou do tabulky nástrojů v řídicím systému na panelu obráběcího stroje. V tabulce nástrojů řídicího systému stroje lze zadat limitní parametry opotřebení nástrojů, pomocí kterých lze sledovat jejich stav a životnost. S tabulkou nástrojů lze také pracovat při tvorbě CNC programů. Pokud naměřená odchylka překročí stanovenou mez nebo byl-li překročen maximální řezný čas nástroje, lze nástroj systémem zablokovat a upozornit obsluhu stroje, případně vyměnit za další kus. Dojde-li k prudké změně naměřené odchylky nástroje, je možné tento stav detekovat jako poškození nebo zlomení nástroje.

Nástrojové sondy lze rozdělit do tří kategorií:

- a) Nástrojové dotykové sondy pro kontaktní měření nástroje
- b) Laserové nástrojové sondy k proměření a kontrole poškození nástroje
- c) Laserové sondy k detekci poškození nástroje

4.1 Nástrojové dotykové sondy

Pomocí nástrojových dotykových sond můžeme kontrolovat různé druhy nástrojů přímo na obráběcím stroji. Tyto sondy jsou vyvinuty pouze pro jejich kontrolu a rozměrovou kalibraci. Nicméně v určitých případech je možné detekovat například i zlomení nástroje.

U frézarských nástrojů se měří jejich délka, průměr a lze měřit i rozměry jednotlivých řezných destiček. Naměřená data jsou ukládána automaticky do tabulky nástrojů pro další zpracování v CNC programu. U dotekové nástrojové sondy lze měřit s rotujícím i stojícím

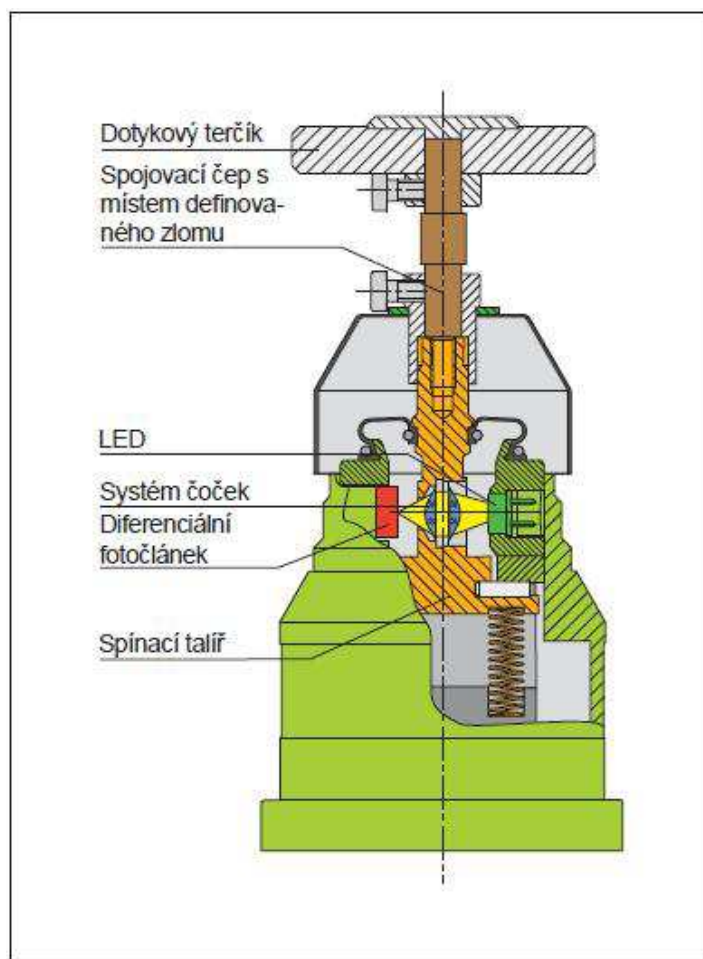
vřetenem stroje. Výrobci nástrojových sond obvykle limitují maximální otáčky, při kterých je možné měřit, minimální nebo maximální průměr rotujícího nástroje, či maximální obvodovou rychlost nástroje. Z toho vyplývá, že některé zejména větší nástroje nelze měřit při jejich pracovních otáčkách, a je nutné je měřit při stojícím stavu.

Při používání nástrojových sond musíme řešit stejná opatření jako u dotykových obrobkových sond. Dotykový terčík u dotykových sond má stanovenou maximální výchylku ve vertikálním i horizontálním směru a je nutné při najíždění zadávat takové parametry rychlosti nájezdu, aby při sepnutí a odeslání spínacího signálu do řídicího systému nedošlo k přejetí této maximální brzdné vzdálenosti. V opačném případě by došlo k poškození sondy nebo nástroje. Výrobce většinou opatřuje držák dotykového terčíku úmyslně slabým místem, ve kterém by při kolizním stavu došlo ke zlomení, a tím k zabránění poškození citlivého snímacího senzoru.

Způsob komunikace a připojení u nástrojových sond je většinou proveden kabelem z důvodu možného umístění sondy na okraj pracovního prostoru. V případě použití bezdrátové obrobkové dotykové sondy od stejného výrobce jako je sonda nástrojová, je možné připojení na společný bezdrátový radiový nebo infračervený přijímač

4.1.1 Princip funkce dotykové nástrojové sondy

Dotykové nástrojové sondy pracují na podobném principu, jako dotykové obrobkové sondy. V těle nástrojové sondy je umístěn jeden z několika druhů snímačů. Na Obr. 4.1 je znázorněn zjednodušený řez tělem nástrojové sondy Heidenhain s optickým senzorem. Hlavní část sondy tvoří dotykový terčík, který je pevně spojen se spínacím talířem. Ten je uvnitř sondy uložen v trojbodovém, fyzikálně nejstabilnějším, uložení. Při vychýlení dotykového terčíku z klidové polohy vygeneruje spínací senzor signál, který je poslán do řídicího systému. Nejdůležitějším parametrem dotykových nástrojových sond je stejně jako u obrobkových sond parametr reprodukovatelnosti snímání.



Obr. 4.1 - Zjednodušený řez tělem nástrojové sondy Heidenhain řady TT s optickým spínacím senzorem [7]

Nástrojové dotykové sondy se stejně jako sondy obrobkové vyrábějí v provedení s kabelovým připojením k řídicímu systému nebo ve verzi bezdrátového přenosu signálu. V případě bezdrátového provedení je nutné sondu napájet bateriemi. Pokud vybereme dotykové sondy od jednoho výrobce pracující na stejné technologii přenosu signálu, lze zpravidla využít jeden přijímací modul pro oba druhy dotykových sond. Takové řešení šetří náklady na pořízení a připojení k řídicímu systému a v neposlední řadě zjednodušuje obsluhu.

4.1.2 Laserové nástrojové sondy k proměření a kontrole nástroje

Laserové nástrojové sondy představují řešení pro měření a kontrolu stavu nástroje obdobně jako dotykové sondy. Laserové bezdotykové nástrojové sondy mají ale výhodu v tom, že mohou díky bezkontaktnímu optickému měření kontrolovat i velmi malé

nebo speciální, velmi tvrdé a křehké nástroje bez hrozícího nebezpečí poškození nebo kolize. Další velkou výhodou je možnost měření všech druhů nástrojů při jejich jmenovitých otáčkách a to i proměření jednotlivých břitů. Precizní měření při jmenovitých otáčkách zajistí proměření a kompenzaci geometrických odchylek nástroje a odhalení závady na vřetenu stroje nebo jeho upínacím mechanismu (například čelní nebo obvodové házení).

Bezkontaktní laserové nástrojové sondy pro proměřování nástroje používají laserový paprsek k detekci přítomnosti nástroje. Sondy jsou vyráběné buď jako kompaktní systémy s pevně nastavenou vzdáleností mezi přijímačem a vysílačem laserového paprsku (Obr. 4.2) jejichž výhodou je jednodušší instalace bez nutnosti směřování paprsku anebo je možné opatřit provedení s rozdělenými sestavami vysílače a přijímače.



Obr. 4.2 - Laserová nástrojová sonda Hexagon m&h LTS 35.65 [14]

Mezi hlavní výhody laserových nástrojových sond ve srovnání s dotykovými je zamezení ohybu tenkých nástrojů, měření v celém rozsahu otáček těžkých obráběcích strojů, kontrola jednotlivých břitů s detekcí odštípnutých nebo vylomených destiček a možnost několika měřících bodů.

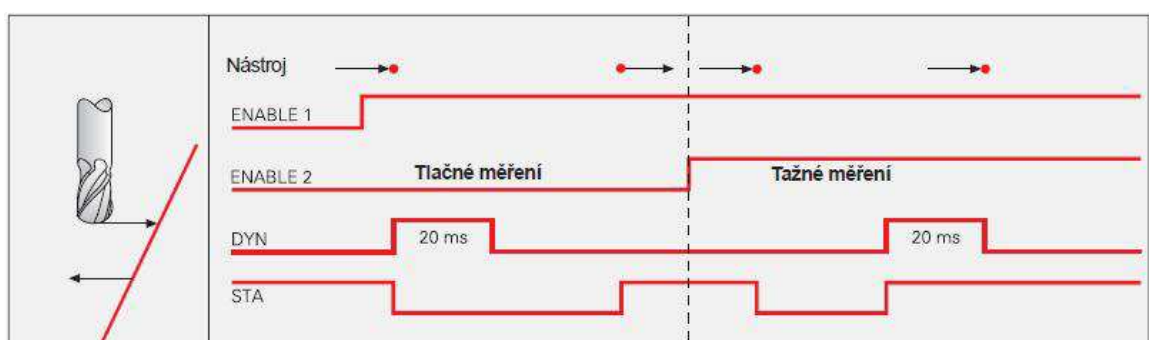
Nevýhodou laserových nástrojových sond je především ovlivnitelnost měření zbytky chladicí kapaliny nebo třískami přichycené na nástroji a vyšší pořizovací cena. Pro omezení

nepřesnosti měření vlivem nečistot jsou laserové sondy vybaveny přívodem vzduchu využívaným k ofukování a tím k čištění nástrojů před a během měření [7,14]

4.1.2.1 Princip funkce laserových nástrojových sond

Laserové nástrojové sondy pracují na principu vysoce precizní světelné závory. Laserový zdroj vysílá laserový paprsek a protilehlý snímač detekuje každé jeho přerušení. Při každé změně stavu na přijímací straně (při přerušení nebo obnovení laserového paprsku) generuje vnitřní elektronika spínací impuls o definované délce trvání. Tento dynamický signál označovaný DYN je předán do řídicího systému stroje, který na základě zpětné vazby z odměřovacího systému stroje definuje parametry a polohu nástroje. Společně s dynamickým signálem je vysílán ještě signál statický STA, který je generován s každým přerušením a po celou délku daného přerušení laserového paprsku. Pomocí statického signálu STA a informací ze zpětné vazby od odměřovacího systému stroje je řídicí systém schopen vypočítat průměr nástroje nebo tvar indikující stav řezných destiček (Obr. 4.3).

Proměření nástroje můžeme provádět ve dvou režimech. Provádíme měření buď při zanořování nástroje do laserového paprsku (tlačné měření) nebo při vynořování (tažné měření). Každý ze dvou režimů má své výhody a nevýhody a je používán rozdílně pro určité druhy nástrojů. To z důvodu ovlivňování měření zbytky chladicí kapaliny nebo zašpinění třískami.



Obr. 4.3 - Výstupní signály při tažném a tlačném měření délky a poloměru nástroje [7]

4.1.3 Laserové sondy k detekci poškození nástroje

V některých případech je potřebná pouze detekce přítomnosti nástroje. Tím je myšlena detekce poškození nástroje bez potřeby proměrování nástroje. To se používá v případech,

kdy kontrolu stavu nástroje zjišťujeme pomocí obrobkové sondy při proměřování rozměrů obrobku.

Sondy pro detekci poškození nástroje pracují na principu snímání odrazu od nástroje samotného. Zařízení se skládá pouze z jedné části obsahující zdroj i detektor laserového paprsku a vzhledem k danému dosahu snímání je možné sondu umístit mimo pracovní prostor stroje.

Sonda samotná vysílá laserový paprsek do prostoru a obráběcí stroj najíždí k tomuto paprsku podobně jako k laserové nástrojové sondě určené k proměřování nástrojů. Elektronika sondy určuje přítomnost nástroje pomocí analýzy odrazů paprsků od rotujícího nástroje a je schopná rozeznat nahodilé odrazy od chladicí kapaliny nebo třísek kovu. Každý nástroj při daných otáčkách odráží laserový paprsek s určitým charakteristickým vzorem. Díky tomu, že je nástroj snímán před jeho použitím a data se uloží do tabulky nástrojů, je sonda schopná rozpoznat i odlomení části nástroje dle změny v odrazivosti laserového paprsku. Příkladem takové sondy pro detekci poškození nástroje může být sonda od firmy Renishaw TRS2 (Obr. 4.4).

Sonda Renishaw je schopná detekovat nástroje od průměru 0,2 mm a větším ve vzdálenosti 0,3 až 2m při otáčkách vřetena 200, 1000 a 5000 ot/min. Výrobce deklaruje rozpoznání nástroje při 5000 ot/min v čase ≤ 1 s. [15]



Obr. 4.4 - Laserová sonda pro bezkontaktní detekci poškození nástroje Renishaw TRS2 [15]

4.1.4 Parametry vybraných nástrojových sond

	Renishaw TS27R	Renishaw NC4 Separate	Heidenhain TL Micro 300	Hexagon m&h RWT35.50
Typ sondy	Dotykový	Laserový	Laserový	Dotykový
Způsob přenosu signálu	kabelový	kabelový	kabelový	radiový
pracovní dosah	-	-	-	14 m
reprodukovatelnost snímání (2σ)	1.0 μm	od $\pm 0.15 \mu\text{m}$ do $\pm 1.0 \mu\text{m}$	$\pm 1.0 \mu\text{m}$	1.0 μm
stupeň krytí IP XX	IP X8	IP X8	IP 67	IP 68
směr snímání	$\pm X, \pm Y, +Z$	-	-	$\pm X, \pm Y, +Z$
zdvih doteku sondy	$X, Y = \pm 10^\circ, Z = +5,5 \text{ mm}$	-	-	$X, Y = \pm 12,5^\circ, Z = -6 \text{ mm}$
Průměr nástroje	-	0,03 - 5 000 mm	0,1 - 428 mm	$\geq 0,5 \text{ mm}$
Maximální otáčky měření	1 000 min^{-1}	výrobce neudává	30 000 min^{-1}	1 000 min^{-1}

Kvalita obrábění ale úzce souvisí s dynamickými vlastnostmi a úchytkami v polohování a s hodnotami zrychlení stroje v jednotlivých osách. Obrobené kusy jsou kontrolovány a z přesnosti jejich rozměrů je určováno dynamické chování stroje.

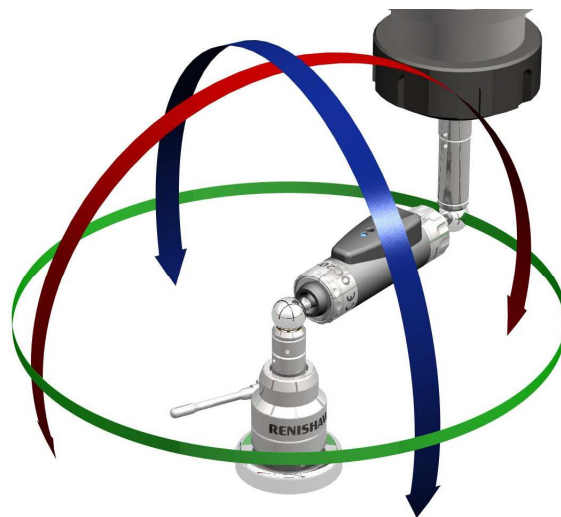
Kalibrace polohování stroje je proces, kdy se ověřuje, zda odměřovací systém zobrazuje aktuální polohu stroje s určitou přesností. Ke kalibraci odměřovacího systému je vždy nutné použít přesnější měřicí systém než systém měřený.

V následujících odstavcích jsou uvedeny dostupné metody kontroly a možnosti následné kalibrace odměřovacích a polohovacích systémů stroje, potřebných k dosažení výrobních přesností a jakosti povrchu.

4.2.1 Ballbar test

Diagnostický systém ballbar přináší jednoduchou a rychlou inspekční metodu testování přesnosti CNC obráběcího stroje dle mezinárodních norem. Tento systém umožňuje uživatelům obráběcích strojů testovat a v krátkém čase diagnostikovat nepřesnosti stroje a jejich příčiny.

Systém ballbar je určen k inspekci kruhového pohybu generovaného pomocí kruhové interpolace v osách X, Y a Z (Obr. 4.5).

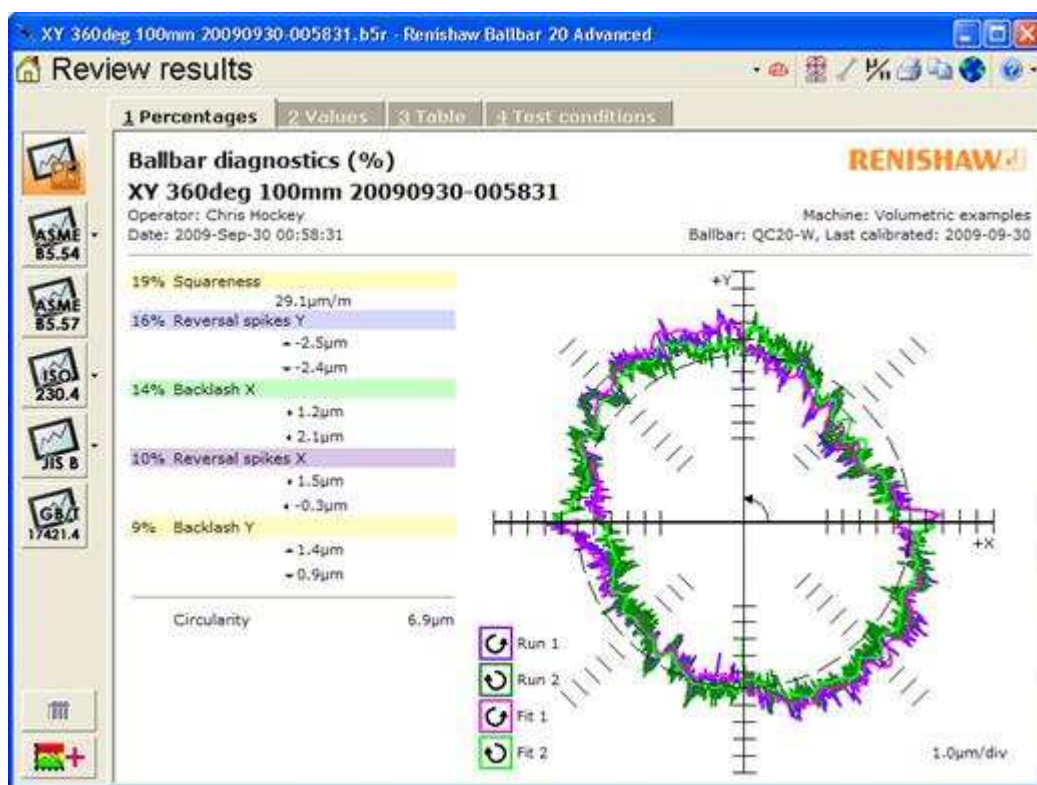


Obr. 4.5 - Diagnostický systém ballbar [18]

4.2.1.1 Princip systému ballbar

Systém ballbar se skládá ze samotného ballbaru. Jak název napovídá, jedná se o přesný teleskopický lineární snímač v podobě tyče opatřené na obou koncích přesnými koulemi. Ke koulím na koncích lineárního snímače patří dvojice držáků v podobě kulovitých magnetických pouzder. Jeden držák se upevňuje do pracovního vřetene CNC stroje a druhý konec se umísťuje na upínací desku otočného stolu nebo na základovou desku v pracovním prostoru stroje. Při měření jsou koule lineárního snímače kinematicky vedeny v magnetických pouzdrech. Tím je umožněno vytvářet kruhový pohyb okolo držáku pevně přichyceného k upínací desce a lineární snímač může zaznamenávat změny v poloměru kruhové dráhy.

Získaná data se odesílají do počítače vybaveného softwarem od výrobce ballbaru. Program z naměřených hodnot zpracovává údaje o přesnosti dané dle mezinárodních norem a data se zobrazují číselně i graficky. Teoreticky by měly mít kruhové dráhy v jednotlivých rovinách dané osami XY, XZ a YZ tvar kružnice. Ve skutečnosti se do kruhové dráhy projevují různé faktory jako mechanické vůle stroje, chybné nastavení a neshody posuvových motorů, odchylky ve vzájemné kolmosti jednotlivých os, chybné odečítání hodnot odměřovacího systému, trhavý pohyb a mnoho dalších. Výsledná dráha se liší od ideální kružnice viz. Obr. 4.6. Měření se obvykle provádí ve směru a v proti směru hodinových ručiček. Měřicí systém tuto dráhu zaznamená a je schopný definovat odchylky od kruhové dráhy a kvantifikovat jednotlivé příčiny chyby kruhovitosti dle jejich důležitosti. Pomocí obslužného softwaru lze také jednoduše generovat CNC program pro daný typ testu a řídicí systém CNC stroje.



Obr. 4.6 - Záznam měření dráhy kruhového pohybu [19]

Software Ballbar 20 dodávaný společností Renishaw k měřicímu systému ballbar QC20-W dokáže simulovat následky změn v nastavení dynamických parametrů a geometrie stroje. Obsluha stroje tak může jednoduše porovnávat vliv jednotlivých zásahů do nastavení stroje a jejich následky v hodnotách kruhovitosti a polohové tolerance. [19]

4.2.1.2 Parametry systému

	Renishaw ballbar QC20-W
Rozlišení lineárního snímače	0,1 µm
Přesnost snímače ballbaru (při 20°C)	±0,5 µm
Přesnost měření systému (při 20°C)	±1,25 µm
Rozsah měření snímačem	±1 mm
Maximální rychlost snímání	1 000 Hz

Tab. 4.2 - Parametry systému Renishaw ballbar QC20-W

4.2.2 Moderní inspekční a kalibrační systémy

Měřicí a inspekční systémy Heidenhain KGM a VM 182 jsou určeny pro přímé zjišťování statických i dynamických úchylek. Použití těchto systémů přináší výhodu v oddělení technologických vlivů od vlastností obráběcího stroje. Díky tomu jsme schopni velmi přesně určit jednotlivé vlivy, které ovlivňují výslednou výrobní přesnost stroje a nejsme odkázáni na pouhé měření rozměrů obrobeneho zkušebního vzorku.

Při vysokých rychlostech polohování se ve vyšší míře projevuje chování stroje v průběhu pohybu pracovního vřetena po zadané dráze. Tím lze s použitím inspekčního systému KGM rozpoznat míru vlivů mechanických částí stroje od míry vlivů řídicích smyček CNC řízení, pohonů a odměřovacích systémů se zpětnou vazbou.

Naproti tomu při statických měřeních polohové úchytky lineárních os jsme schopni pomocí lineárního porovnávacího systému prověřit geometrickou přesnost stroje.

Výstupní data z obou systémů lze použít k dalšímu vývoji v konstrukci samotného stroje, k optimalizaci a nastavení parametrů řídicích smyček a jejich vzájemných vazeb anebo při předávání strojů zákazníkům. [21]

4.2.2.1 Plošný mřížkový snímač pro kontrolu požadovaných tvarů interpolace

Mřížkové plošné snímače Heidenhain KGM 181 a KGM 182 (Obr. 4.7) jsou inspekční systémy vyvinuté pro testování polohové přesnosti číslicově řízených obráběcích strojů. Pomocí těchto snímačů je možné provést test kruhové interpolace o průměru od 1 μ m do 230 mm při maximálních využitelných rychlostech polohování. Měřicí systém KGM je možné používat do rychlostí až 80 000 mm/min. Díky plochému tvaru mřížkového snímače lze se systémy KGM diagnostikovat pohyb po zadané dráze ve dvou základních osách obráběcího stroje (X-Y, X-Z, Y-Y) bez vlivu geometrie stroje například u malých testovaných poloměrů kruhové interpolace. Díky bezkontaktnímu snímači lze vyloučit vliv geometrie stroje na výsledky měření oproti kuličkovému magnetickému spojení u systémů ballbar.



Obr. 4.7 - Heidenhain KGM [21]

4.2.2.1.1 Princip funkce

Plošný mřížkový snímač KGM se skládá z měřicí desky s křížovou mřížkou a snímací hlavy. V průběhu měření se snímací hlava pohybuje nad křížovou deskou bez vzájemného kontaktu. Křížová deska se umísťuje do prostoru pro obrobky a snímací hlava do držáku nástrojů pracovního vřetena stroje. Vzájemná poloha křížové desky a snímací hlavy se vymezuje pomocí speciálního přípravku na hodnotu vzdálenosti $0,5 \pm 0,05$ mm.

Měřicí signály se zobrazují a dále zpracovávají pomocí vyhodnocovacího softwaru ACCOM instalovaném na PC, který se s KGM propojuje s využitím boxu rozhraní EIB 741 (ethernet) nebo kartou čítačů IK 220 (PCI - Bus) Heidenhain schopnou interpolovat vstupní sinusové signály až 4096 s^{-1} . Tím je možné snímat s krokem 1 nm v obou zvolených osách. Vyhodnocení naměřených dat je prováděno na PC softwarem ACCOM, který po vyžádání všech potřebných parametrů testu vytvoří CNC program a odešle do CNC řídicího systému stroje.

4.2.2.1.2 Parametry mřížkového snímače KGM

	KGM 181	KGM 182
provedení měřítka	Dvousouřadnicová fázová mřížka TITANID na skle (křížová mřížka)	
teplotní koeficient délkové roztažnosti	$\alpha_{\text{therm}} = 8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$\alpha_{\text{therm}} = 8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
třída přesnosti	$\pm 2 \mu\text{m}$	$\pm 2 \mu\text{m}$
měřicí rozsah	$\varnothing 140 \text{ mm}$	$\varnothing 230 \text{ mm}$
výstupní signály	1 V _{ss}	1 V _{ss}
perioda signálu	4 μm ve směru měření I a II	4 μm ve směru měření I a II
doporučený krok měření	$\geq 0,001 \mu\text{m}$	$\geq 0,001 \mu\text{m}$
elektrické napájení	5V $\pm 5\%$ / < 100 mA (na osu)	5V $\pm 5\%$ / < 100 mA (na osu)
max. rychlost pojezdu	$\leq 80\,000 \text{ mm/min}$	$\leq 80\,000 \text{ mm/min}$

Tab. 4.3 - Parametry mřížkového snímače KGM [21]

4.2.2.2 Porovnávací systém pro lineární inspekci a kalibraci

Lineární porovnávací systém Heidenhain VM 182 (Obr. 4.8) je zařízení určené pro inspekci a kalibraci posuvů os obráběcích strojů. VM 182 lze použít k určení lineárních i nelineárních úchylek a ke stanovení chyby reverzace strojních os dle ISO 230-2. Zařízení je schopné určit i chybu vedení, kolmou ke směru pohybu osy. Výstup z měřicího systému lze použít k elektronické kompenzaci úchylek řízení a odměřovacího systému měřené osy. Pro obráběcí stroje vybavené řídicím systémem Heidenhain iTNC lze výstup z porovnávacího systému VM 182 nahrát přímo.



Obr. 4.8 - Heidenhain VM 182 [21]

4.2.2.2.1 Princip funkce

Lineární porovnávací systém se skládá z dvousouřadnicového ocelového měřítka s fázovou mřížkou s velmi vysokou přesností a ze snímací hlavy připevněné k pracovnímu vřetenu stroje pomocí magnetů. Snímací hlava se pohybuje nad mřížkou bez vzájemného kontaktu. Měřicí signály se zobrazují a dále zpracovávají stejně jako u systému KGM pomocí vyhodnocovacího softwaru ACCOM instalovaném na PC, který se s KGM propojuje s využitím boxu rozhraní EIB 741 (ethernet) nebo kartou čítačů IK 220 (PCI - Bus) Heidenhain schopným interpolovat vstupní sinusové signály až 4096 s^{-1} . Dosažitelný krok měření je roven hodnotě 1 nm. Vyhodnocení dat, tvorba CNC programu pro samotné měření a odeslání do CNC řídicího systému stroje, je možné pomocí PC softwaru ACCOM.

4.2.2.2.2 Parametry lineárního porovnávacího systému VM 182

	VM 182
provedení měřítka	Dvousouřadnicová fázová mřížka DIADUR s referenční značkou na ocelovém nosiči
teplotní koeficient délkové roztažnosti	$\alpha_{\text{therm}} = 10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
třída přesnosti	$\pm 1 \text{ } \mu\text{m}$ v podélném směru $\pm 1.5 \text{ } \mu\text{m}$ v příčném směru
měřicí rozsah	420 mm, 520 mm, 720 mm, 1020 mm, 1220 mm, 1520 mm $\pm 1 \text{ mm}$
výstupní signály	1 Vss
perioda signálu	$4 \text{ } \mu\text{m}$ v podélném a kolmém směru (ortogonální)
doporučený krok měření	$\geq 0,001 \text{ } \mu\text{m}$ (IK 220)
elektrické napájení	$5\text{V} \pm 5\% / < 100 \text{ mA}$ (na osu)
max. rychlost pojezdu	$\leq 80\,000 \text{ mm/min}$

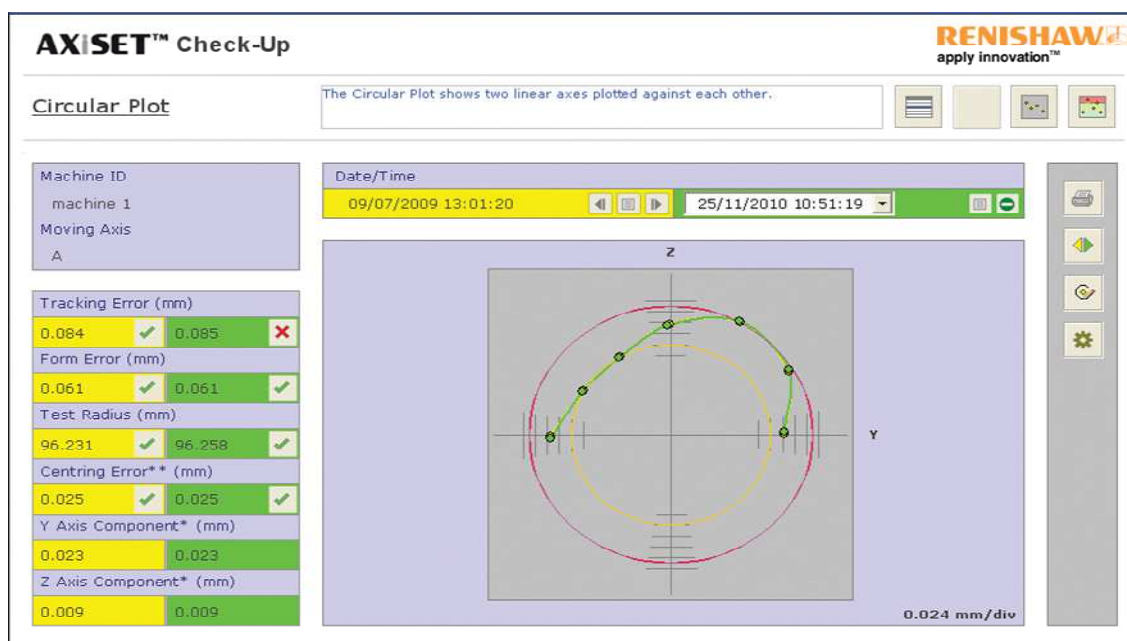
Tab. 4.4 - Parametry lineárního porovnávacího systému VM 182 [21]

4.2.2.3 Rychlá kontrola stavu rotačních os CNC strojů

Na trhu existují i jednoduché inspekční metody pro prověření provozních vlastností rotačních os. Tyto metody jsou schopné rozpoznat nepřesnosti způsobené nesprávným nastavením stroje, opotřebením strojního mechanismu nebo kolizi. Někteří výrobci obráběcích strojů upravili tyto rychlé inspekční metody stavu stroje a jsou schopni po změření hodnot definovat hodnoty pro kalibraci středů otáčení rotačních os. Tím lze předejít zdlouhavému mechanickému ustavení geometrické přesnosti a nastavování stroje a jeho příslušenství po případné kolizi, opotřebením mechanických částí nebo chybně nastaveným hodnotám.

Výrobce Renishaw vyvinul software AxiSet™ Check-Up, který s pomocí dotykové obrobkové sondy a speciálního kalibračního nástroje odhalí nepřesnosti středů otáčení rotačních os stroje. Možnost zjistit a ohlásit odchylky otočných bodů jsou důležité zejména pro pětiosou interpolaci.

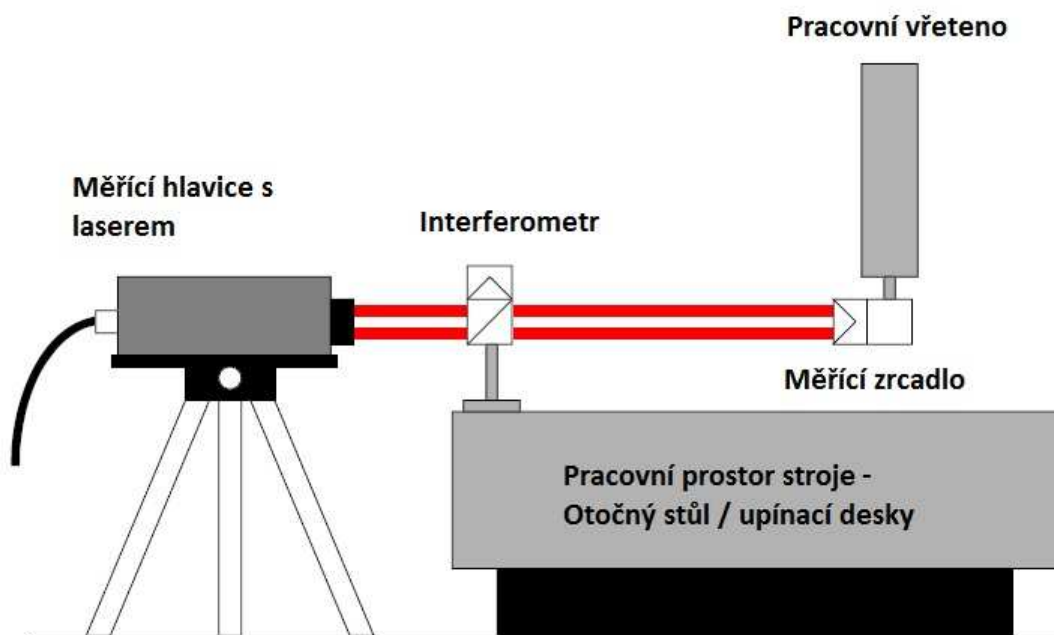
Při měření se provedou měřicí cykly na kalibračním nástroji s použitím dotykové sondy. Software graficky znázorňuje naměřená data a zobrazuje informace, zda se měření pohybuje v definované toleranci (Obr. 4.9). Výstupem jsou názorné grafy s možností ukládání jednotlivých měření a porovnání s naměřenými hodnotami při minulých inspekcích. Pro tuto inspekční metodu jsou doporučovány obrobkové dotykové sondy s tenzometrickým spínačem. [23]



Obr. 4.9 - Náhled obrazovky inspekčního systému AxiSet™ Check-Up firmy Renishaw [23]

4.2.2.4 Laserový interferometr pro měření kinematiky stroje

Pro správnou funkci a přesnost obráběcího stroje je nezbytná geometrická přesnost polohování stroje a správnost údajů o jeho poloze získaných z odměřovacího systému. K proměření a kalibraci číslicově řízených těžkých obráběcích strojů zpravidla používáme laserový interferometr (Obr. 4.10). S jeho pomocí se na těžkých obráběcích strojích měří přímost, kolmost, vzdálenost a rovinnost pohybů stroje v jeho základních osách anebo přesnost pohybů rotačních.



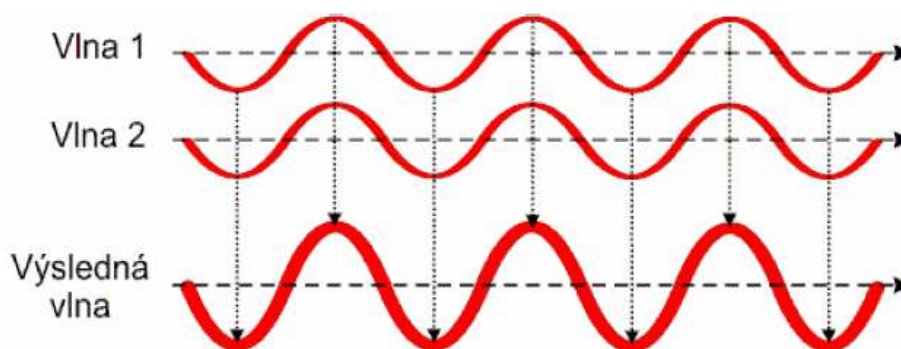
Obr. 4.10 - Laserový interferometr - obecné schéma použití k měření na CNC stroji [24]

4.2.2.4.1 Princip funkce

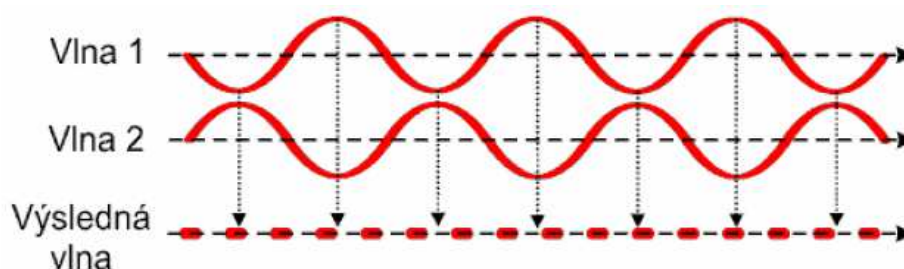
Laserové interferometry pracují na principu interference světelného paprsku. Interference světelného paprsku je superpozice dvou nebo více světelných svazků. Ke vzniku interference může dojít pouze v případě splnění všech následujících podmínek:

- Interferující svazky mají stejný směr
- Interferující svazky mají stejnou polarizaci
- Interferující svazky mají stejnou vlnovou délku

Při interferenci světelných svazků může dojít ke konstruktivní interferenci v případě, kdy jsou světelné vlny ve fázi (Obr. 4.11) anebo k destruktivní interferenci, pokud světelné vlny mají opačnou fázi. (Obr. 4.12). V případě dvou světelných svazků s odlišnou fází dojde k součtu amplitud obou svazků u výsledné vlny.



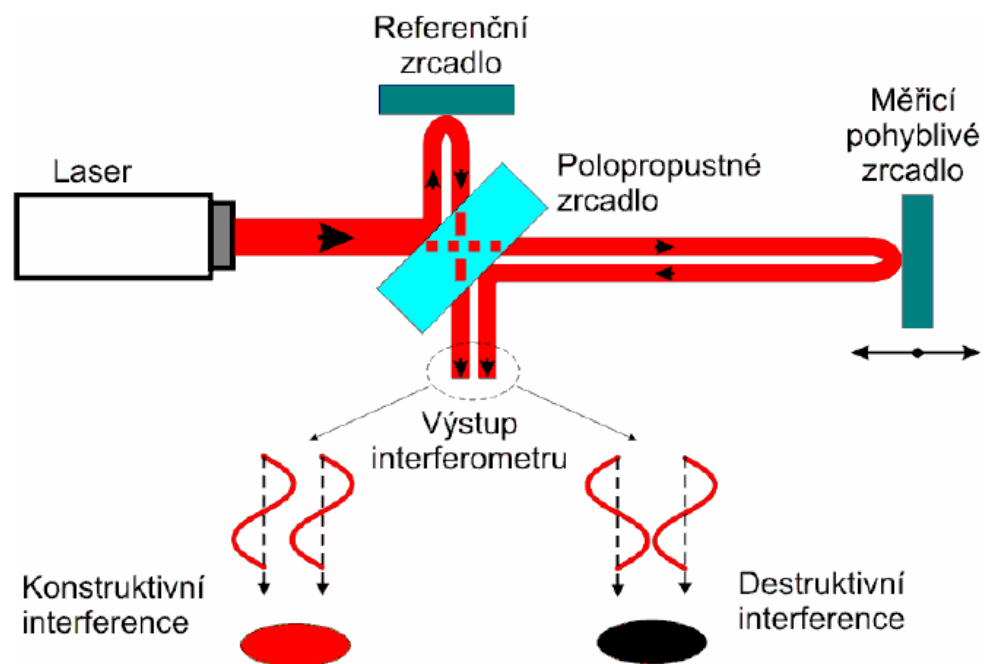
Obr. 4.11 - Konstruktivní interference [25]



Obr. 4.12 - Destruktivní interference [25]

Laserové interferometry využívané pro měření na obráběcích strojích jsou založeny na principu Michelsonova laserového interferometru (Obr. 4.13). Na vstup interferometru se generuje laserový světelný paprsek, který dopadá na polopropustné zrcadlo. To rozdělí světelný svazek na část, která se odráží zpět od referenčního pevného zrcadla a na část svazku směřující k pohyblivému měřicímu zrcadlu. Podle rozdílu délky drah, vedoucím k pevnému a pohyblivému zrcadlu, se na výstupu interferometru generuje signál pohybující se mezi stavy konstruktivní nebo destruktivní interference. Perioda, s jakou se tyto dva mezní stavy vyskytují, se rovná polovině vlnové délky laserového světelného paprsku $\lambda/2$. To je dáno dvojnásobnou dráhou vedoucí k pohyblivému měřicímu zrcadlu (svazek prochází dráhu k měřicímu zrcadlu a zpět). Změní-li se tedy poloha měřicího zrcadla o vzdálenost $\lambda/2$, je změna výsledné fáze měřicího svazku o 1λ .

Vnitřní elektronika laserového interferometru zpracovává výstupní signály z měřicí části, zachycuje periodu interferencí a generuje potřebná data pro měřicí software. Software LaserXL™ dodávaný s přenosným laserovým měřicím a kalibračním systémem Renishaw XL-80 je schopný po doplnění modulu pro kompenzaci lineárních chyb z naměřených údajů vytvořit kompenzační hodnoty pro řídicí systém obráběcího stroje. [24,25]



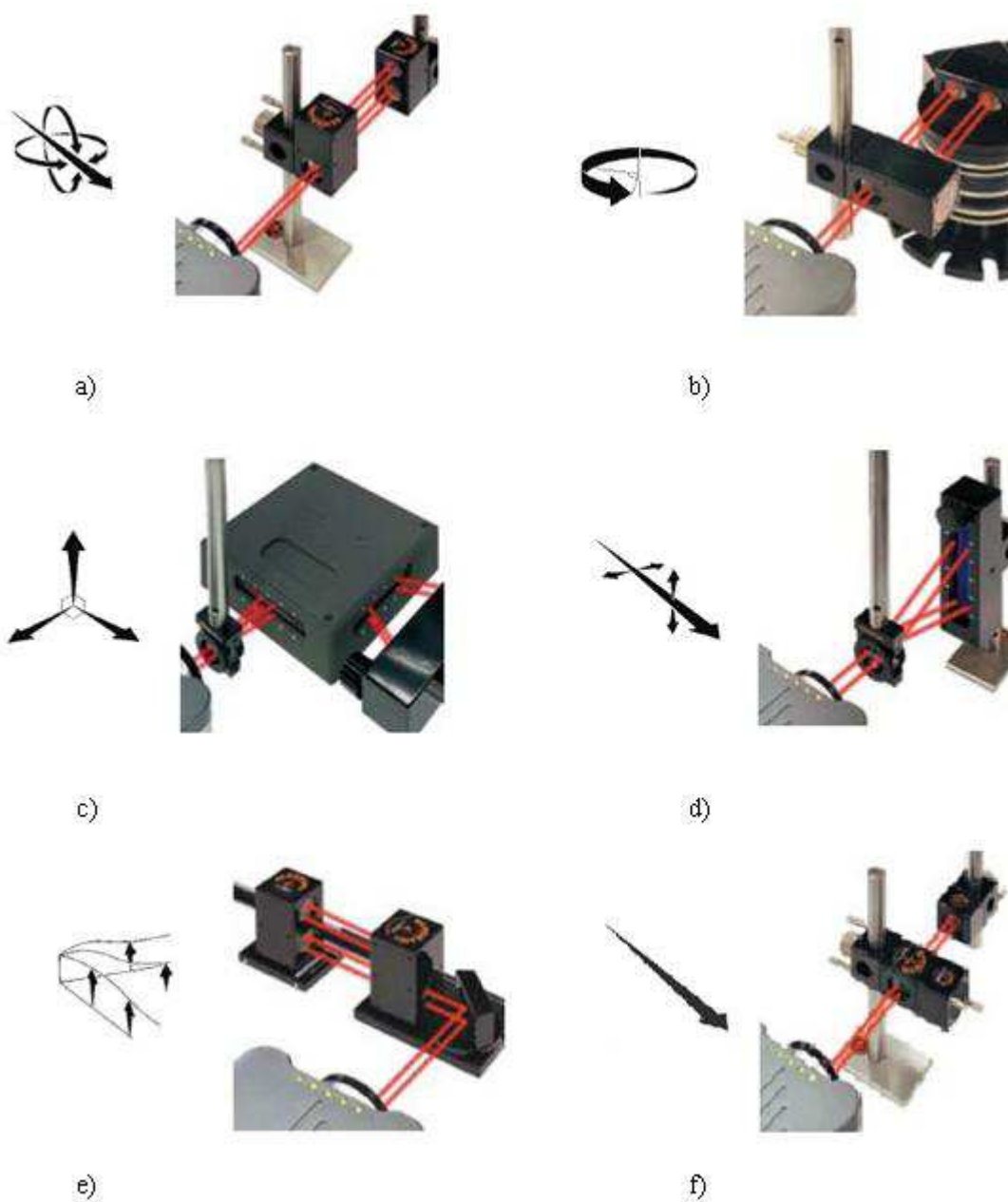
Obr. 4.13 - Schéma uspořádání Michelsonova laserového interferometru [25]

4.2.2.4.2 Možné druhy měření pomocí Renishaw XL-80

K měřicímu systému XL-80 výrobce Renishaw dodává širokou škálu příslušenství využitelného pro různé druhy měření. K samotnému měřicímu systému skládajícímu se z měřicí hlavičky XL-80, interferometru a volitelných optických členů je možné připojit kompenzátor vlivu prostředí, který snímá teplotu okolního vzduchu, tlak vzduchu a relativní vlhkost. Ze zjištěných hodnot se upravuje vlnová délka laserového paprsku tak, aby do výpočtů vstupovala její stálá, a tedy správná hodnota. Tím lze odstranit prakticky všechny chyby způsobené vlivem změny prostředí.

Pomocí laserového interferometru lze s využitím potřebných optických členů a držáků měřit následující geometrické parametry (Obr. 4.14) [26]:

- a) Vychýlení z přímé osy vedení – jedná se o nejčastější příčinu nepřesností při polohování. Velmi malé vychýlení z přímé osy může způsobit velkou nepřesnost na špičce nástroje.
- b) Přesnost rotace otočného stolu – je dána přesností při odečítání hodnot snímače úhlu natočení. S příslušenstvím XR20-W je možné automaticky měřit úhel při rotaci otočného stolu pomocí laserového interferometru.
- c) Vzájemná kolmost vedení – osy stroje musí být vzájemně kolmé v celé jejich délce. S použitím optického čtyřhranu a příslušenstvím pro měření přímosti lze měřit vzájemnou kolmost os.
- d) Přímost vedení – je dána horizontální i vertikální složkou. Z důvodu zajištění přesnosti stroje by měly být odchylky v přímosti vedení v celé délce vedení stejné.
- e) Rovinnost plochy – pomocí tohoto měření lze změřit s využitím laserového interferometru rovinnost plochy a zaznamenat údaje z libovolného bodu na měřené ploše.
- f) Linearita vedení – pomocí laseru XL-80 lze měřit aktuální polohu stroje a naměřené údaje porovnat s hodnotou zobrazenou odměřovacím systémem stroje. Odchylky, zobrazené odměřovacím systémem stroje od skutečné polohy, můžeme pomocí dodávaného softwaru kompenzovat v řídicím systému stroje.



Obr. 4.14 - a) úhel b) rotační osa c) kolmost d) přímota e) rovinnost f) linearita [26]

Laserový interferometr od výrobce Renishaw XL-80 dosahuje vysoké stability frekvence vyzařované vlnové délky $\pm 0,05$ ppm za 1 rok a $\pm 0,02$ ppm za 1 hodinu. Díky tomu lze měřit lineární vedení s přesností $\pm 0,5$ $\mu\text{m}/1\text{m}$ v rozsahu 0 až 80 m. [26]

5 Automatické rozpoznání obrobku včetně kalibrace stroje

Aby bylo možné minimalizovat nevýrobní časy a lidské zásahy do výrobního procesu z důvodu zabránění vzniku možných lidských chyb a urychlení celého procesu přípravy před samotným obráběním, existuje metoda rozpoznání obrobku v pracovním prostoru stroje, jeho proměření a kalibrace bez nutnosti zásahu obsluhy stroje v plně automatizovaném režimu.

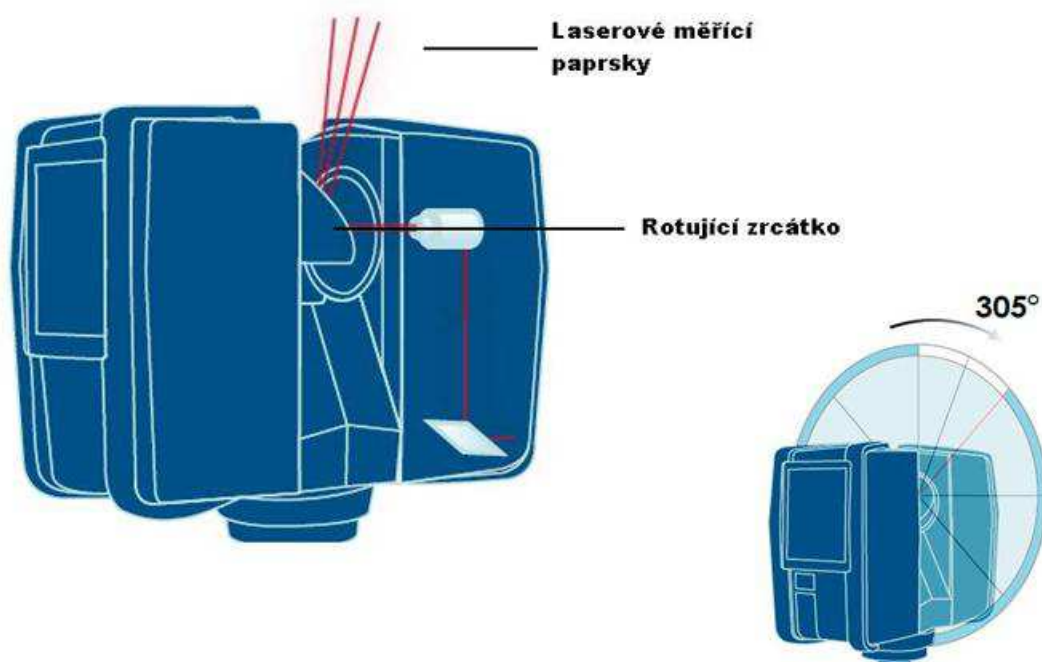
Z důvodu rozsáhlého pracovního prostoru stroje a velikých rozměrů obrobků je nutné použít takový systém rozpoznávání a detekce obrobku, který bude schopný provádět tuto činnost na velké vzdálenosti. Pro navrhovaný systém jsem zvolil laserový 3D scanner Focus^{3D} X 130 od výrobce FARO (Obr. 5.1).



Obr. 5.1 - Laserový 3D scanner FARO Focus^{3D} X 130 [27]

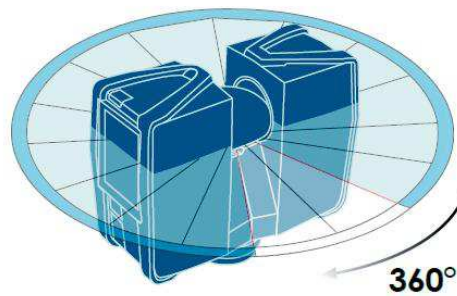
5.1 Parametry a funkce 3D laserového skeneru FARO

3D laserový skener FARO Focus^{3D} X 130 používá k určování vzdálenosti laserový paprsek odražený zpět do přijímače od měřených objektů. Vzdálenost měřených bodů je vypočítána na základě fázového posunu mezi vyslaným a přijímaným paprskem. FARO Focus^{3D} X 130 tedy zpracovává údaj o době letu laserového paprsku k měřenému objektu a zpět metodou s využitím interferometru blíže popsanou v kapitole 4.2.2.4.1.



Obr. 5.2 - Vertikální rovina vysílání měřícího laserového paprsku [27]

Vysílání paprsku ve vertikální rovině zabezpečuje rotující zrcátko souběžně s výpočtem a přiřazením vertikální souřadnice k měřenému bodu a měření jeho vzdálenosti v prostoru od měřící hlavy (Obr. 5.2). Natáčení měřící hlavy a přiřazování souřadnic v horizontální rovině (Obr. 5.3) zajišťuje servomotor s rotačním snímačem současně s měřením vzdálenosti měřeného bodu tak, jako u určování vertikální pozice.



Obr. 5.3 - Horizontální rovina vysílání měřicího laserového paprsku [27]

3D skener FARO Focus^{3D} X 130 v závislosti na snímací rychlosti, rotování zrcátka ve vertikální rovině a otáčení snímací hlavy v horizontální rovině určí souřadnice snímaných bodů v jeho okolí a uloží je na paměťovou kartu ve skeneru. Těmto bodům se říká mračno bodů. Jednotlivé režimy snímání, volby parametrů nebo oblast snímání lze volit přes dotykový displej umístěný na snímací hlavě nebo vzdáleně s využitím místní sítě LAN či WiFi.

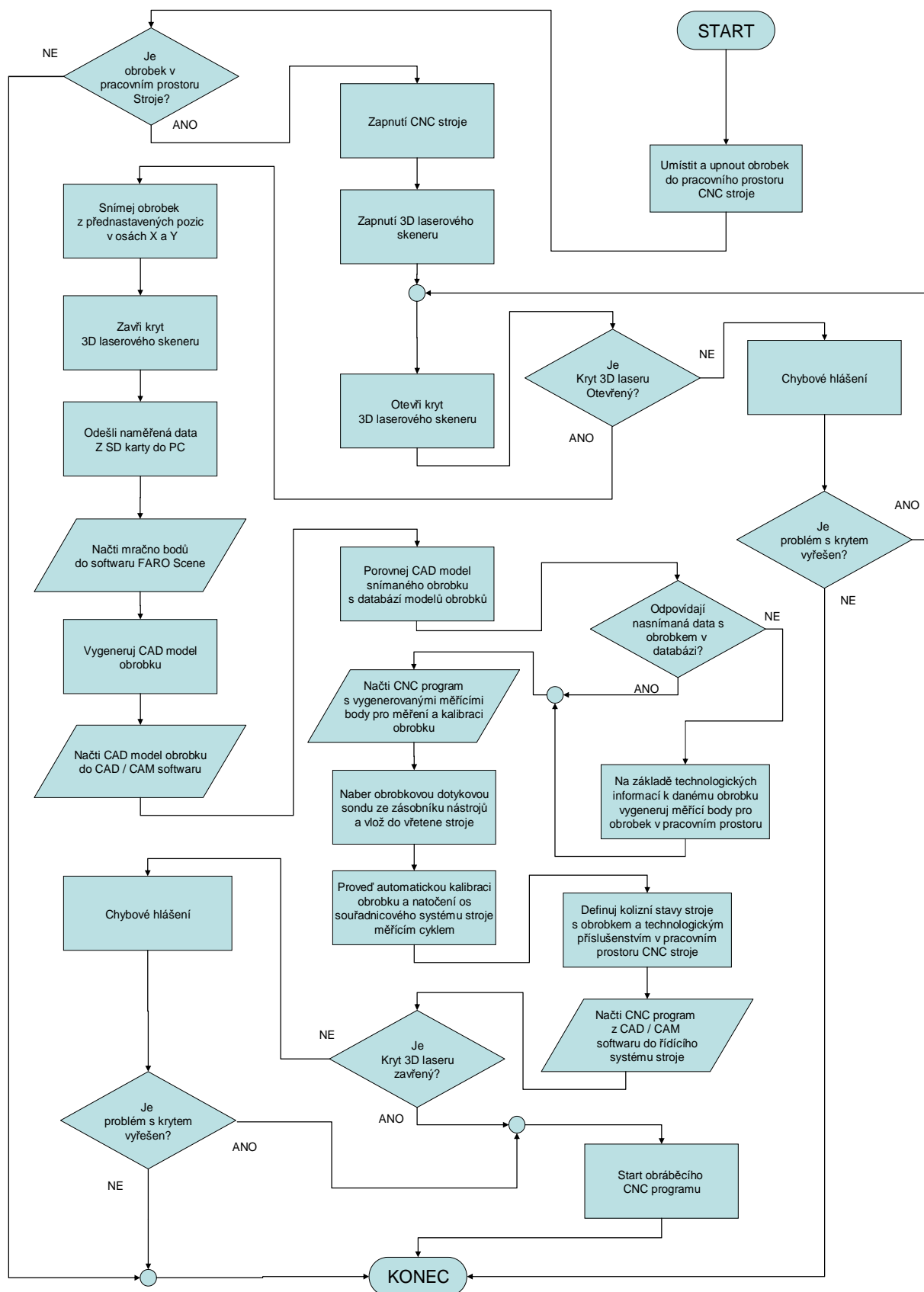
Dodávaný software FARO Scene vyvinutý přímo pro 3D skenery FARO Focus je určený přímo pro práci s daty získanými skenerem. S jeho pomocí lze provádět vizualizaci na PC, 2D i 3D měření, obarvování mračna bodu s využitím integrovaného digitálního fotoaparátu ve snímací hlavě a vytvářet realistické 3D modely, detekovat hrany a plochy objektů a exportovat naměřená data do většiny dostupných CAD systémů. S využitím softwaru FARO Scene lze také slučovat naměřená data z jednotlivých stanovišť a skládat výsledný 3D model.

Laserový skener lze vybavit paměťovou kartou formátu Secure Digital, ve zkratce psané jako SD karta, s integrovaným WiFi modulem pro rychlejší bezdrátový přenos dat zapisovaných na SD kartu oproti integrovanému a pomalejšímu Bluetooth.

	FARO Focus^{3D} X 130
Dosah skeneru [m]	0,6 – 130
Rozsah snímání ve vertikální rovině [°]	305
Rozsah snímání v horizontální rovině [°]	360
Rychlost snímání [bodů/s]	122 000 / 244 000 / 488 000 / 976 000
Systematická chyba měření [mm]	max. ±2
Přesnost měření [mm]	0,3 – 0,5
Třída laseru	1
Vlnová délka laserového paprsku [nm]	1 550
Paměťové medium	SD, SDHC TM , SDXC TM
Napájecí napětí [V]	19
Napětí integrovaného akumulátoru [V]	14,4
Příkon [W]	40
Příkon při nabíjení akumulátoru [W]	80
Rozsah pracovní teploty [°C]	5 – 40
Hmotnost [kg]	5,2
Rozměry (šířka x výška x hloubka) [mm]	240 x 200 x 100

Tab. 5.1 - Základní parametry 3D skeneru FARO Focus^{3D} X 130 [27]

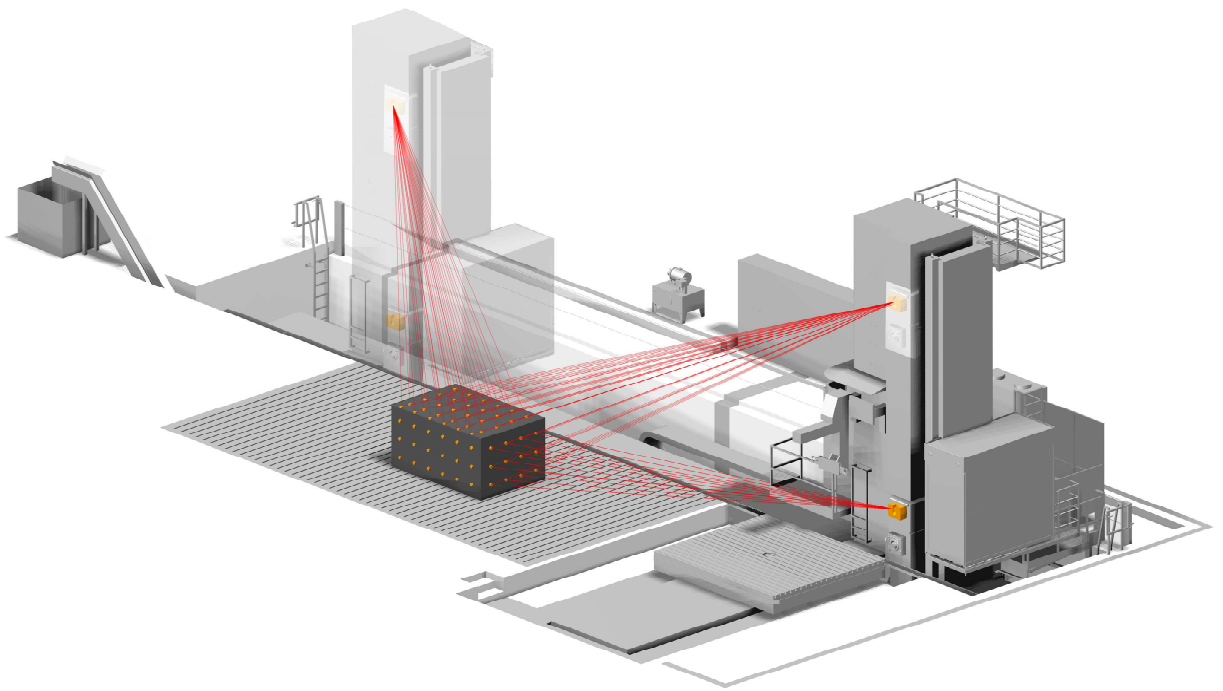
5.2 Vývojový diagram



Obr. 5.4 - Vývojový diagram rozpoznání obrobku na pracovišti CNC stroje

5.3 Model pracoviště

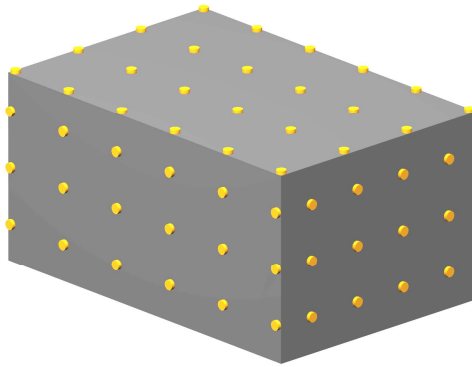
Vlivem velkých rozměrů a různorodých tvarů obrobků, které je možné na strojích ŠKODA HCW obrábět, je nutné provádět snímání z více úhlů při dostatečné vzdálenosti. Pro účely snímání obrobků se snímací hlavou skeneru umístěnou na těžkých číslicově řízených obráběcích strojích bude snímání probíhat v koncových polohách os X a Y. Tím se zajistí nejlepší možný výsledek skenování. Na Obr. 5.5 je znázorněn průběh snímání obrobku umístěného v pracovním prostoru obráběcího stroje ŠKODA HCW ze 4 pozic roviny dané osami stroje X a Y. Dodávaný software k 3D laseru FARO Scene automaticky sloučí získaná data během jednotlivých snímání v koncových polohách a výsledné mračno bodů převede do CAD souboru.



Obr. 5.5 - Model pracoviště se znázorněnou polohou při snímání obrobku

5.4 Naskenovaná data

Během snímání obrobku umístěného v pracovním prostoru CNC obráběcího stroje je získán soubor souřadnic jednotlivých měřených bodů - mračno bodů. Na Obr. 5.6 jsou pro ukázkou znázorněny jednotlivé body, ze kterých by dodávaný software vytvořil obrysy a plochy obrobku. Přesnost vykreslení obrysů a ploch snímaného objektu závisí na snímací rychlosti laserového skeneru, která u popisovaného skeneru FARO dosahuje až 976 000 bodů za sekundu.

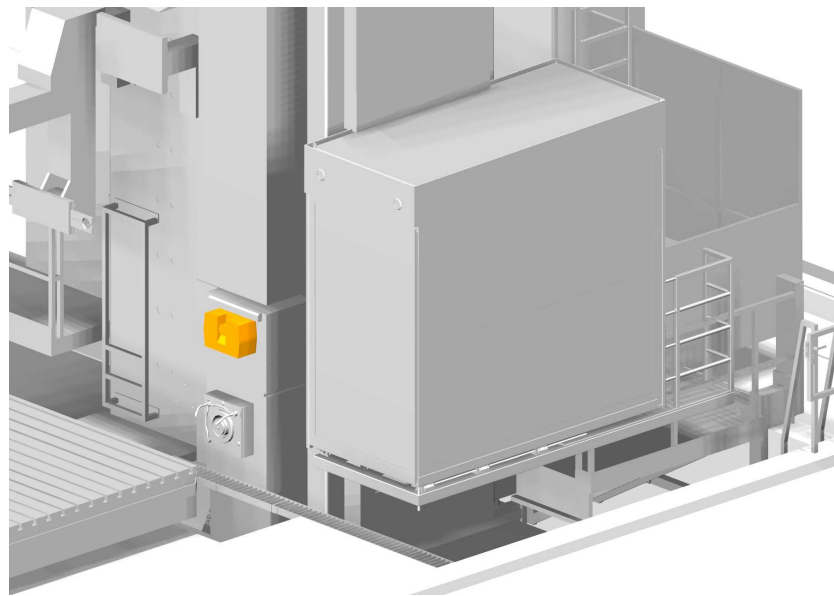


Obr. 5.6 - Mračno bodů získaných při snímání obrobku 3D skenerem

5.5 Umístění laserového skeneru

Na Obr. 5.7 je znázorněno přibližné umístění snímací hlavy 3D laserového skeneru FARO Focus^{3D} X 130. Před realizací vybavení obráběcího stroje ŠKODA HCW laserovým skenerem bude nutné upravit čelo vřeteníku CNC stroje z důvodu ochrany skeneru před možnou kolizí s obrobkem nebo poničením odletujícími třískami a stříkající chladicí kapalinou během obrábění. Čelní stranu skeneru je nutné vybavit automaticky otevíraným krytem, který umožní otáčení snímací hlavy v rozmezí $\pm 90^\circ$ od osy pracovního vřetená stroje v horizontální rovině a viditelnost paprsku v rozmezí $+90^\circ$ až $-62,5^\circ$ v rovině vertikální.

Díky umístění snímací hlavy na vřeteníku obráběcího stroje je možné trvalé připojení napájecího a datového kabelu a není nutný zásah obsluhy stroje a ustavení laseru na stativ před každým snímáním obrobku.



Obr. 5.7 - Umístění snímací hlavy laserového 3D skeneru FARO Focus^{3D} X 130

6 Zhodnocení a porovnání navrženého systému

Jak již bylo uvedeno v předcházejících kapitolách, zefektivnění výroby je v dnešní ekonomicky velmi obtížné době klíčovým faktorem každého podniku. Vynakládají se nemalé částky na zrychlení a zpřesnění výroby bez zbytečných prostojů, bez finančních a materiálových ztrát v podobě vadných výrobků a určité finanční náklady plynou také na minimalizaci lidské obsluhy během samotného procesu výroby.

Rozdíly mezi klíčovými výrobci těžkých obráběcích CNC strojů se postupně smazávají a úspěch v podobě prodeje nového stroje zákazníkovi lze čím dál tím častěji přičíst kritériím netechnického charakteru. Těmi mohou být například sympatie k danému výrobcí CNC strojů, použití nejmodernějších doplňkových systémů, vyhovění speciálním požadavkům zákazníků a v neposlední řadě cena. Proto musí výrobci těžkých obráběcích CNC strojů sledovat současné trendy v oblasti vývoje a implementace moderních automatizovaných systémů.

6.1 Porovnání navrženého systému s jinými výrobci těžkých obráběcích CNC strojů

Během účasti na mezinárodních strojírenských veletrzích v letech 2012 až 2014, při studování dostupných materiálů a při konzultacích s oddělením konstrukce ve společnosti ŠKODA MACHINE TOOL a.s. jsem nenalezl u žádného z hlavních výrobců těžkých obráběcích CNC strojů podobný systém automatického rozpoznávání obrobku v pracovním prostoru CNC stroje a jeho následné kalibrace.

Někteří výrobci již nějaký čas nabízejí ke svým strojům systémy pracující na podobném principu jako diagnostický systém AxiSetTM od společnosti Renishaw. Takové systémy se odlišují databází možných stavů, které jsou sestavené přímo výrobcem na vlastní CNC stroje a na jejichž základě lze přesně diagnostikovat možný problém nebo kompenzovat mechanické nepřesnosti CNC stroje změnou kompenzačních dat v CNC programu. Jedná se ale jen o rychlou diagnostickou metodu a následnou automatickou kalibraci stroje samotného.

Porovná-li se navržený systém z předchozí kapitoly s některým, v současné době dostupným systémem, byl by nejpodobnější paletizační systém.

Paletizační systém pracuje na principu upínání obrobků na palety, se kterými se pohybuje a přijíždí ke stroji. Do pracovního prostoru CNC stroje se umístí předem připravená paleta s již upnutým a ustaveným obrobkem. Paleta před stroj najíždí po předem vymezené dráze s definovanou tolerancí polohy. Díky tomu se může okamžitě po najetí palety před CNC stroj začít s obráběním bez nutnosti proměrování a kalibrace obrobku. Po ukončení obráběcího procesu se palety s obrobkem vymění a celý proces se opakuje.

Výhodou takového systému je minimalizace mezioperačních nevýrobních časů potřebných pro upnutí anebo kalibraci nulových bodů obrobku. Nevýhodou mohou být vyšší nároky na prostor, pořizovací cena a využitelnost pouze při sériové výrobě. Paletizační systém lze také použít pouze do určitých maximálních rozměrů a hmotností obrobku, což může být mnohdy pro těžké obráběcí CNC stroje limitujícím faktorem.

Alternativou k paletizačnímu systému může být rozdělení pracovního prostoru stroje na dvě a více částí, do kterých by se obrobek mohl umístit a upnout během procesu obrábění v jiné části pracovního prostoru. Tento systém se v běžné praxi využívá poměrně často. Naráží se zde ale na problém zajištění bezpečnosti pracovníků pohybujících se v pracovním prostoru stroje během procesu obrábění.

6.2 Zhodnocení navrženého systému automatického rozpoznání obrobku

Uváží-li se pořizovací cena samotného laseru pohybující se v řádu desítek tisíc Euro, náklady spojené s konstrukční úpravou obráběcího stroje ŠKODA a propojení laserového 3D skeneru s řídicím systémem CNC stroje, dojdeme k závěru, že za současné ekonomické situace na světovém trhu by byla investice v takovýto systém velice nerentabilní. Málokterý výrobce, popřípadě zákazník, by si mohl vybavení CNC stroje takovýto specifickým systémem dovolit.

V současné době je k dispozici nepřeberné množství systémů, pomocí kterých by bylo možné téměř plně automatizovat výrobní proces obrobku. přesto docházíme k závěru, že pro těžké obráběcí CNC stroje, které jsou v produkci společnosti ŠKODA MACHINE TOOL a.s., je vybavení řídicího systému CNC stroje navrženým systémem rozpoznávání a následné kalibrace obrobků v pracovním prostoru stroje velice drahé a z toho důvodu obtížně realizovatelné.

Závěr

V první části této práce se pojednává o základních charakteristických vlastnostech řídicího systému CNC obráběcích strojů a o jejich rozdělení. Popsány jsou jednotlivé způsoby programování strojů, zadávání souřadnic při vytváření CNC programu, možnosti řízení CNC stroje anebo způsoby odměřování polohy v jednotlivých osách.

Druhá část je věnována popisu historického vývoje číslicově řízených obráběcích strojů a jejich řídicího systému od předchůdců prvních číslicově řízených strojů až po současnou generaci. Popis je rozdělen do jednotlivých vývojových stupňů s naznačením současných trendů v dalším vývoji. Součástí kapitoly je přehled historie a současných možností záznamu a přenosu dat včetně popisu počítačem integrovaném výrobním systému.

V třetí části je přiblížena problematika automatického proměřování a rozpoznávání obrobků v pracovním prostoru CNC strojů. Tato část obsahuje popis a rozdělení obrobkových dotykových sond používaných pro těžké číslicově řízené obráběcí stroje, princip jejich činnosti, typy používaných senzorů a také způsobu přenosu dat do řídicího systému stroje. Jsou zde uvedeny základní vlastnosti a parametry vybraných kusů dotykových sond od různých výrobců nebo způsob jejich využití ve spojení s CNC obráběcím strojem ŠKODA. Rovněž je uvedeno použití laserových trackovacích stanic a 3D laserových skenerů s popisem principu jejich funkce.

Čtvrtá část se věnuje problematice diagnostiky a kalibrace CNC stroje s využitím moderních měřících a diagnostických systémů či využití dotykových nebo laserových nástrojových sond ke kalibraci CNC stroje. V této části práce je vysvětlen princip funkce laserového interferometru, jenž se používá pro přesné měření u většiny laserové techniky popisované v této práci.

Pátá část práce obsahuje popis a základní vlastnosti potřebného hardwarového vybavení navrhovaného systému pro automatické rozpoznávání obrobku v pracovním prostoru CNC stroje. Je zde popsáno umístění systému na stroji ŠKODA typu HCW s popisem činnosti a část této kapitoly je věnována popisu získaných dat pomocí navrženého systému a eventuálních výhod při jeho použití v praxi.

V poslední části je uvedeno krátké porovnání s existujícími systémy ostatních výrobců těžkých CNC obráběcích strojů a zhodnocení navrhovaného systému z finančního i funkčního hlediska. Ačkoli se popisovanou problematikou konstruktéři ve společnosti ŠKODA MACHINE TOOL a.s. již několikrát zabývali, vždy byla daná problematika vyhodnocena s podobným výsledkem.

V práci navrhované řešení i jemu podobné alternativy jsou s využitím dostupných systémů použitelné spíše u malých CNC obráběcích center se sériovou výrobou. Zde lze schopnosti 3D skenerů s malým dosahem a vyšší přesností využít i ke kontrole vyrobených kusů, ke sledování procesu obrábění apod.

Moderní měřicí a diagnostické systémy jsou velmi dobrým nástrojem pro zvýšení efektivity výroby na CNC obráběcích strojích. Návrh systému automatického rozpoznávání obrobků použitelného na strojích ŠKODA může být v budoucnosti dobrým vodítkem při vývoji. Při studování podkladů k problematice této práce byly získány cenné poznatky použitelné při následném profesním rozvoji a pracovní činnosti. Přestože je navržené řešení z finančních a kapacitních důvodů v současné době obtížně realizovatelné, může se tato práce stát vodítkem a inspirací při budoucím řešení popisované problematiky.

Seznam použitých zdrojů

- [1] Webová stránka Heidenhain: *Školící portál*. [online]. [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://training.heidenhain.cz/home/>
- [2] Produktový katalog Heidenhain: *Linear Encoders: For Numerically Controlled Machine Tools*. Německo, 9/2013. [PDF dokument]. [online]. [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: http://www.heidenhain.cz/cs_CZ/produkty-a-pouziti/linearni-snimace/zapouzdrene-linearni-snimace/
- [3] Webová stránka Vysoké učení technické v Brně: *Fakulta stavební*. [online]. Fakulta stavební VUT v Brně, 2014 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: http://www.fce.vutbr.cz/studium/materialy/autocad/acad_I_cz/zaklad/sour_system.html
- [4] Archiv fotografií společnosti ŠKODA MACHINE TOOL a.s., Tylova 57, 301 00 Plzeň
- [5] Archiv produktových katalogů společnosti ŠKODA MACHINE TOOL a.s., Tylova 57, 301 00 Plzeň
- [6] Fotografie pořízené ve firmě ŠKODA MACHINE TOOL a.s., Tylova 57, 301 00 Plzeň
- [7] Produktový katalog Heidenhain: *Dotykové sondy: pro obráběcí stroje*. Česká Republika, 3/2011. [PDF dokument]. [online]. [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: http://www.heidenhain.cz/cs_CZ/produkty-a-pouziti/dotykovy-sondy/
- [8] Katalogový list Renishaw: *RMP60 radio transmission probe*. 2/2013. [PDF dokument]. [online]. [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://renishaw.cz/cs/rmp60-dotekova-sonda--6100>
- [9] Katalogový list Renishaw: *Vysoce přesná optická strojní sonda OMP400*. 2008. [PDF dokument]. [online]. [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://renishaw.cz/cs/omp400-kompaktni-vysoce-presna-dotekova-sonda--6089>
- [10] Produktový katalog Hexagon Metrology: *m&h Probing Systems With Radio-Wave Transmission: Measuring on Machine Tools – fast and reliable*. Německo, 8/2013. [PDF dokument]. [online]. [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: http://www.mh-inprocess.com/mh-Radio-wave-Touch-Probe-RWP2041_563.htm
- [11] Webová stránka nms: *noncontact measuring systems*. NMS INTERNATIONAL AG. [online]. 2014 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://www.nms-int.com/produkty/leica-t-probe/>

- [12] Webová stránka OMC: Optical Metrology Centre. In: *OMC Technical Brief - Laser Tracker* [online]. 2001, 2002 -2004 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: http://www.optical-metrology-centre.com/Downloads/Tech_Briefs/TechBrief_LaserTracker.pdf
- [13] Webová stránka OMC: Optical Metrology Centre. In: *OMC Technical Brief - Single point optical triangulation* [online]. 2001, 2002 -2004 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: http://www.optical-metrology-centre.com/Downloads/Tech_Briefs/TechBrief_SinglePtOpticalTriangulation.pdf
- [14] Produktový katalog Hexagon Metrology: *m&h Laser Tool Setters: Measuring on Machine Tools – fast and reliable*. Německo, 8/2013. [PDF dokument]. [online]. [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: http://www.mh-inprocess.com/mh-Laser-Tool-Setter-LTS3565_719.htm
- [15] Katalogový list Renishaw: *TRS2 non-contact tool breakage detection system*. 2011. [PDF dokument]. [online]. [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://renishaw.cz/cs/bezkontaktni-system-pro-detekci-poskozeni-nastroje-trs2--6409>
- [16] Katalogový list Renishaw: *Probing system for CNC machine tools*. 10/2011. [PDF dokument]. [online]. [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://renishaw.cz/cs/sondy-a-software-pro-obrabeci-stroje--6073>
- [17] Produktový katalog Hexagon Metrology: *m&h Tool Setters: Measuring on Machine Tools – fast and reliable*. Německo, 8/2013. [PDF dokument]. [online]. [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: http://www.mh-inprocess.com/mh-Radio-wave-Tool-Setter-RWT3550_579.htm
- [18] Webová stránka Renishaw: *QC20-W ballbar*. [online]. 2001 - 2014 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/renishaw-qc20-w-ballbar-novy-bezdratovy-system-s-funkci-volumetrickeho-testovani--11232>
- [19] Katalogový list Renishaw: *Diagnostický systém ballbar QC20-W – popis a specifikace*. 2010. [PDF dokument]. [online]. [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/system-qc20-w-ballbar--11075>
- [20] Technický článek Renishaw: *Snímací technologie a nová sonda OMP400 společnosti Renishaw s tenzometrickou technologií v ultra kompaktním provedení*. [PDF dokument]. [online]. [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://resources.renishaw.com/cs/details/technicky-clanek-omp400-tenzometricka-sonda--19529>

- [21] Webová stránka Heidenhain: *Produkty a použití: Porovnávací snímače*. [online]. 2014 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: http://www.heidenhain.cz/cs_CZ/produkty-a-pouziti/porovnavaci-snimace/
- [22] Interní dokumenty, návody a dokumentace společnosti ŠKODA MACHINE TOOL a.s., Tylova 57, 301 00 Plzeň
- [23] Katalogový list Renishaw: *AxiSetTM Check-Up*. 2013. [PDF dokument]. [online]. [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://www.renishaw.com/en/axiset-check-up--11353>
- [24] Technický článek Renishaw: *The benefits of laser system that use remote interferometer optics for linear, angular and straightness measurement*. 2001 [PDF dokument]. [online]. [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://renishaw.cz/cs/vysvetleni-interferometrie--7854>
- [25] Ing. Ondřej ČÍP, Ph.D. a Ing. Zdeněk BUCHTA, Ph.D. . *Přesné měření délek pomocí laserové interferometrie* [online]. Brno, 2011 [cit. 2014-05-02]. CZ.1.07/2.3.00/09.0031. Dostupné z: http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_06_1110.pdf. Učební texty k semináři - Centrum pro rozvoj výzkumu pokročilých řídicích a senzorických technologií. VUT v Brně.
- [26] Katalogový list Renishaw: *Přenosný laserový měřicí a kalibrační systém*. 2007. [PDF dokument]. [online]. [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://renishaw.cz/cs/laserovy-merici-system-xl-80--8267>
- [27] Katalogový list FARO: FARO Laser Scanner Focus^{3D}. 2010. [PDF dokument]. [online]. [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://www.faro.com/products/3d-surveying/laser-scanner-faro-focus-3d/downloads#main>