



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

MĚŘENÍ TĚŽKÝCH OBROBKŮ POMOCÍ MOBILNÍCH MĚŘICÍCH ZAŘÍZENÍ

HEAVY WORKPIECE MEASUREMENT WITH MOBILE MEASUREMENT MACHINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Štěpán Plachý

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing., Dipl.-Ing Michal Holub, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	Štěpán Plachý
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojírenství
Vedoucí práce:	Ing., Dipl.-Ing Michal Holub, Ph.D.
Akademický rok:	2018/19

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

Měření těžkých obrobků pomocí mobilních měřicích zařízení

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Výroba těžkých obrobků sebou nese řadu problémů spojených s logistikou, samotnou výrobou, kontrolou a přejímkou. Tato práce je zaměřena na možnosti kontroly těžkých obrobků přímo na stroji. Technologie umožňující toto měření potom mají dopad na časovou a finanční náročnost výroby.

Cíle bakalářské práce:

Popis současného stavu vědy a techniky u řešené problematiky.
Systémový rozbor řešené problematiky.
Vlastní závěry a/nebo doporučení pro další rozvoj. řešené problematiky

Seznam doporučené literatury:

BORSKÝ, Václav. Základy stavby obráběcích strojů. 1. vyd. [s.l.] : [s.n.], 1986. 145 s. ISBN 55-600-86.
MAREK, J. a kol., MM Průmyslové spektrum: Konstrukce CNC obráběcích strojů IV. 2018. Speciální vydání. ISBN 978-80-906310-8-3.
WECK, Manfred. Werkzeugmaschinen. 8. neu bearb. Aufl. Berlin: Springer, 2006. ISBN 3-540-225-2-1.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je zaměřena na problematiku měření těžkých obrobků. První část se zabývá souřadnicovými měřicími stroji a inprocesním měřením pomocí obrobkových sond. Ve druhé části jsou řešena mobilní měřicí zařízení, konkrétně měřicí ramena a zejména laser trackery. U všech metod je popisován princip funkce a jejich rozdělení, případně srovnání výrobců a konkrétní zástupci zařízení. Všechny měřicí metody jsou zohledněny zvláště k měření těžkých obrobků. V závěru práce jsou popisovány vlivy na nejistotu měření u zmíněných metod.

ABSTRACT

This bachelor thesis is focused on heavy workpiece measurement. The first part deals with coordinate measuring machines and inprocess measurement with workpiece probes. The next section concerns mobile measurement machines, specifically measuring arms and especially laser trackers. For all methods there are a description of principle and their types, eventually comparison of manufacturers and concrete representatives of device. All measuring methods particularly relate to heavy workpiece measurement. The last part of the thesis describes factors affecting measurement uncertainty of mentioned methods.

KLÍČOVÁ SLOVA

Těžký obrobek, CMM, inprocesní měření, mobilní měřicí zařízení, měřicí rameno, laser tracker

KEYWORDS

Heavy workpiece, CMM, inprocess measurement, mobile measurement machine, measuring arm, laser tracker

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PLACHÝ, Štěpán. *Měření těžkých obrobků pomocí mobilních měřicích zařízení*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117542>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Michal Holub.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval Ing., Dipl.-Ing Michalu Holubovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky při vedení bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval rodině za veškerou podporu a pomoc při celém průběhu studia.

ČESTNÉ PROHLÁŠ ENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing., Dipl.-Ing Michala Holuba, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 21. 5. 2019

.....

Štěpán Plachý

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	MOTIVACE	17
3	STACIONÁRNÍ MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ	19
3.1	CMM - Coordinate Measuring Machine.....	19
3.1.1	Typy CMM pro těžké obrobky.....	20
3.1.2	Vhodnost použití CMM pro měření těžkých obrobků	21
3.2	Inprocesní měření pomocí obrobkových sond	22
3.2.1	Typy obrobkových sond	22
3.2.2	Použití obrobkových sond pro měření těžkých obrobků	24
4	MOBILNÍ MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ	25
4.1	Měřicí ramena	25
4.1.1	Typy měřicích ramen	25
4.1.2	Použití měřicích ramen pro měření těžkých obrobků	27
4.2	Trackery	28
4.2.1	Typy trackerů dle způsobu měření	29
4.2.2	Zástupci trackerů	32
4.2.3	Použití trackerů pro měření těžkých obrobků	36
5	VLIVY NA NEJISTOTU MĚŘENÍ	37
5.1	Nejistota měření pomocí CMM	38
5.2	Nejistota měření pomocí obrobkových sond	39
5.3	Nejistota měření pomocí měřicích ramen	39
5.4	Nejistota měření pomocí trackerů	39
6	ZÁVĚR	41
7	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	43
8	SEZNAM ZKRATEK, OBRÁZKŮ A TABULEK	47
8.1	Seznam zkratk	47
8.2	Seznam obrázků	47
8.3	Seznam tabulek	48

1 ÚVOD

Těžké obrobky mají využití v mnoha oblastech, ať už se jedná o lodní, energetický, chemický, kosmický, těžební či letecký průmysl. U daných obrobků je hmotnost úzce spojena i s jejich rozměry. Dle zdroje [1] je těžký obrobek definován hmotností větší než 10000 kg a nejdelším rozměrem větším než 4000 mm. Z předešlých parametrů vyplívá nutnost přizpůsobit konstrukci obráběcích strojů, tak i prostory výrobní firmy (jeřáby, haly atd.), příjezdové komunikace apod. S přepravou na delší vzdálenosti souvisí rovněž objízdné trasy, podepírání mostů, blokování dopravy, celková organizace převozu a s tím spojené rostoucí finanční náklady a časová náročnost výroby. Zázemí vyhovující pro výrobu těžkých obrobků má výrazně méně firem oproti společnostem poskytujících obrobky standardních rozměrů. Užívání i výroba těžkých obráběcích strojů tedy značně zvyšuje prestiž daných firem na trhu.

Měření obrobků lze rozdělit do dvou skupin, a to z hlediska mobility měřicích zařízení. Do první skupiny tzv. stacionárních měřicích zařízení náleží souřadnicový měřicí stroj (CMM - Coordinate Measuring Machine). Zde musí být obrobek přemístěn z obráběcího stroje do CMM. Rovněž lze do stejné skupiny zařadit i tzv. inprocesní měření přímo na obráběcím stroji, kde se využívá především dotykových obrobkových sond. Druhá skupina tzv. mobilních měřicích zařízení, která lze přemísťovat dle potřeby k obrobku, obsahuje měřicí ramena založená na kloubovém mechanismu a tzv. trackery, využívající laserový paprsek pro sledování přesné polohy [1]. Bližší rozbor výše zmíněných měřicích technologií spolu se zhodnocením daných metod a konkrétních zástupců vzhledem k těžkým obrobkům bude popsán dále v práci.

2 MOTIVACE

V dnešní době je kladen velký důraz na výrobní přesnost obrobků, která je vyžadována v mnoha oblastech průmyslu. Zejména se objevují tendence zvyšovat přesnosti výroby u rozměrných, resp. těžkých obrobků. Dle tabulky níže, jež popisuje stupeň výrobní přesnosti dle velikosti stroje (Tab. 1), je patrné, že vysoká přesnost u velkých obráběcích strojů již téměř odpovídá nízké přesnosti u malých strojů.

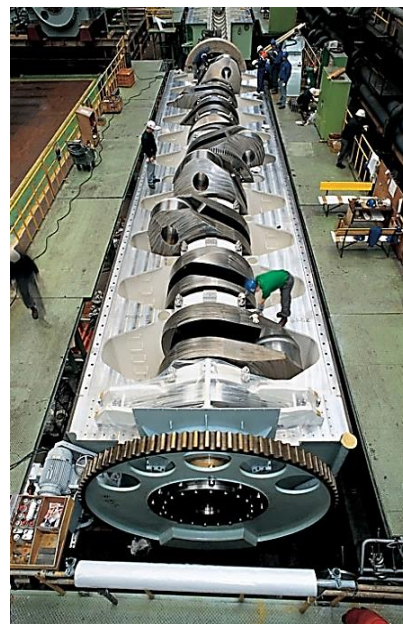
	Pojezd nejdelší osy [mm]	Hmotnost obrobku [kg]	Tolerance dosažená na obrobku [mm]	Stupeň výrobní přesnosti
Malý obráběcí stroj	< 999	< 999	> 0,05	nízká přesnost
			0,01	střední přesnost
			0,001	vysoká přesnost
Středně velký obráběcí stroj	1 000 - 3 999	1 000 - 9 999	> 0,09	nízká přesnost
			0,04	střední přesnost
			0,006	vysoká přesnost
Velký obráběcí stroj	> 4 000	> 10 000	> 0,3	nízká přesnost
			0,1	střední přesnost
			0,04	vysoká přesnost

Tab. 1) Stupeň výrobní přesnosti dle velikosti stroje [1]

Jednou z velkých oblastí průmyslu vyžadující vysokou přesnost těžkých obrobků je energetický průmysl. Ať už jde o uhelné, plynové, jaderné či vodní elektrárny využívající turbíny, výměníky tepla, kotle, reaktory apod. Také stavba větrných elektráren vyžaduje rozměrné rámy, lopatky (Obr.1), rotory nebo hlavní hřídele. Další oblastí průmyslu požadující vysokou přesnost velkých součástí je letecký a kosmický průmysl. Zde se může jednat např. o podvozky, křídla, trupy samotných letadel nebo raketoplánů a kosmických raket. V oblasti důlní techniky se jedná o rypadla, komponenty pro jeřáby, pro těžká nákladní vozidla či do drtičů rudy atd. Lodní průmysl se také vyznačuje těžkými obrobky, které mají zastoupení např. v blocích lodních motorů, převodovek, hřídelů (Obr.2) nebo lodních lopatek. Při těžbě ropy a plynu se využívá např. rozměrných skladovacích nádob, dílů pro těžební plošiny, ventilů i vhodného potrubí. Z výše zmíněných konkrétních případů v průmyslu, ve kterých se objevují četná zastoupení těžkých obrobků, je patrná nutnost přesného a efektivního měření daných dílů. [2]



Obr.1) Transport lopatky větrné elektrárny WinWinD [3]



Obr. 2) Kliková hřídel lodního motoru Wärtsilä RT-flex96C [4]

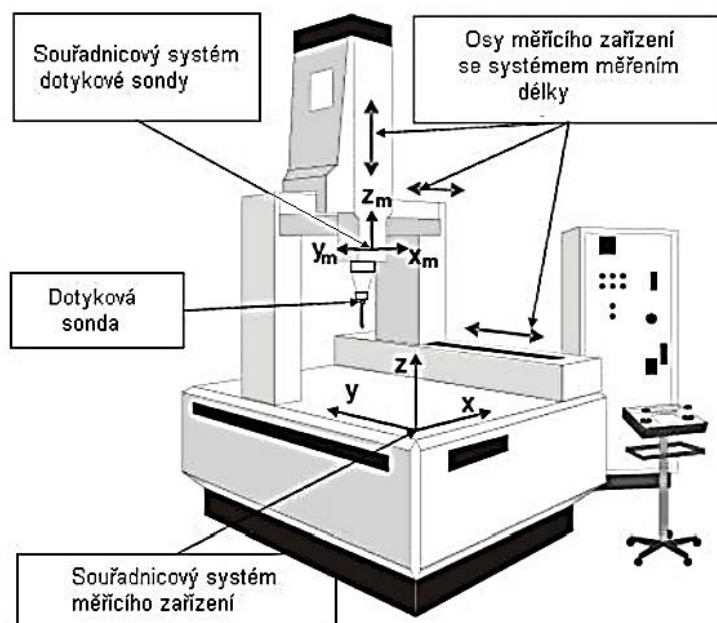
3 STACIONÁRNÍ MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ

Stacionární měřicí zařízení jsou nepřemístitelná zařízení, která jsou vázána na lokaci konkrétního stroje. Do této kategorie patří souřadnicové měřicí stroje (dále jen CMM), do kterého se obrobek musí přemístit z obráběcího stroje. Lze také do této kategorie zařadit i tzv. inprocesní měření probíhající přímo na obráběcím stroji nejčastěji pomocí dotykových obrobkových sond, které jsou tedy také vázány na lokaci v našem případě těžkého obráběcího stroje.

3.1 CMM – Coordinate Measuring Machine

Souřadnicový měřicí stroj je zařízení určené na měření komplexní geometrie různých objektů ve výrobě či montáži. Může být řízen ručně operátorem nebo automaticky pomocí počítače. Uvažujme 3D CMM a kartézský systém souřadnic, kde každá z os má vlastní systém měřítek, který určuje umístění dané osy (viz Obr. 3). Principem je zjištění konkrétních souřadnic X, Y, Z bodů měřeného tělesa. To probíhá pomocí snímací hlavy (dotykové či bezdotykové). Jednotlivé body zaznamená počítač a následně vyhodnotí charakteristiky jako např.: rovnoběžnost, kolmost, kruhovitost, polohu, přímost, vzdálenosti bodů apod. Software pomocí programu provádí měření a vyhodnocení zcela automaticky. Systém umožňuje následné srovnání zadaných výrobních tolerancí a mezních úchylek s naměřenými hodnotami včetně hodnot nacházejících se mimo toleranci. [5]

Snímací hlavy dotykové jsou v přímém kontaktu s měřeným objektem. Dotyková sonda je ukončena nejčastěji rubínovou kuličkou z důvodu minimální opotřebení (viz Obr. 4). Pohyb sondy se současně ve všech 3 osách přenáší na snímače polohy. Zaznamenává se až několik set bodů za sekundu. Bezdotykové snímací hlavy oproti dotykovým nejsou v přímém kontaktu s objektem a zrychlují měření, jelikož v kratším čase získávají znatelně více informací. Tyto systémy kombinují prvky optiky, kamer či laseru. [5]



Obr. 3) Schéma os portálového CMM [6]



Obr. 4) Dotyková sonda [5]

3.1.1 Typy CMM pro těžké obrobky

Pro rozměrovou kontrolu těžkých obrobků se využívá často CMM sloupového typu s horizontálním ramenem nebo CMM mostového typu. Třetí používaná kategorie CMM je portálového typu, který se ovšem zpravidla využívají na měření menších dílů [7] (schéma viz Obr.3). Pozn.: názvy kategorií portálové a mostové jsou v anglické literatuře prohozeny, v českém prostředí se ale častěji používá následující označení.

Sloupové CMM

Sloupové (nebo také stojanové) CMM s horizontálními rameny (Obr. 5) mají zpravidla měřicí stůl v úrovni podlahy, kde se po okrajích stolu pohybují jeden případně i dva stojany (duplex – pro zvětšení rozsahu měření v ose X) s vodorovným ramenem. Značné posuvové rychlosti a kombinace optických měřicích hlav spolu s dotykovými systémy urychluje rychlost měření. Značnou roli při stanovení přesnosti měření hrají teplotní podmínky v konkrétní hale. Výhodou tohoto typu je možnost pohybu v celém měřicím prostoru stroje a tím snadnému umístění dílů např. i pomocí průmyslového jeřábu. [8]



Obr. 5) CMM sloupového typu [9]

Srovnání výrobců CMM

sloupového typu vhodných pro měření těžkého obrobku (Tab. 2) je uvedeno níže. Tabulka byla sestavena na základě informací, které aktuálně poskytují společnosti na svých webových stránkách. Jedná se o výrobce HEXAGON Manufacturing Intelligence, COORD3 Industries S.R.L., Carl ZEISS group, API Metrology a WENZEL group. Počet modelů, jež firmy poskytují, je vyšší než u mostových CMM. Maximální dovolená chyba (MPE_E) se pohybuje v řádu desítek mikrometrů, může však u méně přesných modelů přesáhnout ± 100 mikrometrů. Uvedené měřitelné rozsahy jsou ve dvoustojanovém (duplex) provedení. Firmy často umožňují zvýšení rozsahu měření v ose Y na vyžádání konkrétního objednavatele. Maximální rozměry součástí v tabulce jsou však standardně poskytované modely daných výrobců.

Výrobce	HEXAGON Manufacturing Intelligence	COORD3 Industries S.R.L.	Carl ZEISS group	API Metrology	WENZEL group
Počet modelů	7	4	2	2	5
Max. měřitelné rozměry (X x Y x Z) m	3,8 x 12 x 3	3,4 x 20 x 3	3 x 7 x 2,5	2,6 x 20 x 3	3,8 x 40 x 3
Přesnost [MPE_E]	od $\pm 13 \mu\text{m}$ + $10 \mu\text{m/m}$ < $40 \mu\text{m}$	od $\pm 12 \mu\text{m}$ + $15 \mu\text{m/m}$ < $40 \mu\text{m}$	od $\pm 18 \mu\text{m}$ + $8 \mu\text{m/m}$ < $50 \mu\text{m}$	x	x
Dotykové sondy	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
Bezkontaktní skenery	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO

Tab. 2) Srovnání výrobců CMM sloupového typu vhodných pro měření těžkých obrobků

Mostové CMM

Mostové CMM se vyznačuje typickou mostovou konstrukcí v podobě nepohyblivých sloupů, nad kterými se pohybuje snímací hlava (Obr.6). Oproti sloupovému typu se vyznačují vyšší přesností. Měřicí rozsahy jsou podobné u obou typů, např. až 5000 x 20000 x 2500 mm (X x Y x Z). [7]



Obr. 6) CMM mostového typu [7]

Níže uvedená tabulka popisující srovnání výrobců CMM mostového typu vhodných pro měření těžkých obrobků (Tab. 3) byla sestavena na základě informací, jež v současné době poskytují výrobci na svých webových stránkách. Konkrétně se jedná o společnosti HEXAGON Manufacturing Intelligence, COORD3 Industries S.R.L., Carl ZEISS group, MORA Metrology a WENZEL group. Lze si všimnout nízkého počtu modelů, které firmy poskytují. Přesnosti se pohybují maximálně v řádu desítek mikrometrů. V současnosti je již standardem možnost umístit na CMM sloupové i mostové dotykovou sondu i bezkontaktní laserové skenery. Společnosti zpravidla umožňují zvětšovat maximální měřitelné rozměry (nejčastěji v ose Y) jako např. firma COORD3 (uvedeno v závorce), avšak na zakázku pro konkrétního objednavatele. Uvedené měřitelné rozměry jsou standardně poskytované velikosti strojů.

Výrobce	HEXAGON Manufacturing Intelligence	COORD3 Industries S.R.L.	Carl ZEISS group	MORA Metrology	WENZEL group
Počet modelů	4	3	3	1	1
Max. měřitelné rozměry (X x Y x Z) m	6 x 10 x 4	3,5 x 8 x 2,5 (5 x 20 x 2,5)	6 x 8 x 3,5	3,5 x 10 x 3	4 x 12 x 2,5
Přesnost [MPE _E]	od ± 3,5 μm + 3,5 μm/m < 30 μm	od ± 4,3 μm + 4 μm/m	od ± 2,2 μm + 2,5 μm/m < 12 μm	od ± 5,5 μm + 1 μm/m	x
Dotykové sondy	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
Bezkontaktní skenery	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO

Tab. 3) Srovnání výrobců CMM mostového typu vhodných pro měření těžkých obrobků

3.1.2 Vhodnost použití CMM pro měření těžkých obrobků

Jako největší problém využití CMM pro měření těžkých obrobků se jeví samotný přesun obrobku z obráběcího stroje ke konkrétnímu CMM. Vzhledem k relativně nízkému počtu dostatečně rozměrných strojů by hrozil přesun i na delší vzdálenosti, což by vyvolalo komplikace přepravy, časovou prodlevu a růst nákladů popisovaný již dříve. Musíme také uvážit možnost, když bychom na CMM odhalily nepřesnosti výroby a museli obrobek znovu vracet k obrobení, případně i vícekrát v řadě. I samotné opakované upnutí tak rozměrných a těžkých dílů vyvolává mnoho negativních důsledků (např. snížení přesnosti obrábění díky nemožnosti vícekrát ustavit obrobek na přesně identické pozice, časové prodlevy kvůli případné složitosti upínacích prvků, snížení produktivity obrábění atd.) [10]. Celkově se tedy využití CMM nejeví příliš výhodné pro měření těžkých obrobků.

3.2 Inprocesní měření pomocí obrobkových sond

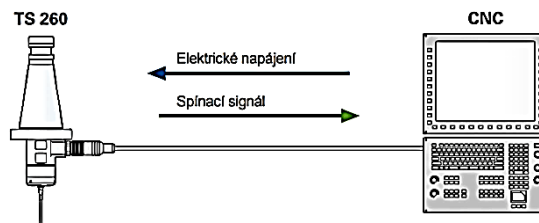
Abychom nemuseli několikanásobně upínat obrobek a přesouvat ho na CMM z důvodu měření, jeví se jako lepší varianta kontrolovat přesnost ihned na obráběcím stroji při jediném upnutí – tzv. inprocesní měření. K tomu se využívají především dotykové obrobkové sondy, kterou program navádí na konkrétní body a zaznamenává pozici v osách stroje. Sejmutím více bodů se vyhodnotí velikost a tvar prvku (např. min 3 body pro změření roviny apod.). Sonda se využívá také k ustavení obrobku, když změří polohu a natočení obrobku vzhledem k souřadnému systému stroje a řídicí systém automaticky přesune počátek a natočí souřadný systém dle aktuální polohy obrobku. Znatelnou výhodou je tedy odstranění chyb operátora či časová a finanční úspora. [11]

3.2.1 Typy obrobkových sond

Obrobkové sondy lze rozdělit na více kategorií. Výrobci používají rozdělení dle aplikace na sondy pro soustružení, frézování, broušení apod. Lze také provést dělení dle principu měření sondy na kinematický, tenzometrický a laserový. Dalším rozdělením dle přenosu měřicího signálu ze sond se rozlišuje komunikace kabelem, optická a rádiová komunikace. Známy výrobce měřicích sond Renishaw uvádí rozdělení svých sond dle velikosti stroje, dále na sondy se standardní přesností, sondy s vysokou přesností a nabízí i typ sondy skenovací. Rozdělení od výrobce Renishaw a dle přenosu signálu ze sond budou dále popsány.

Kabelový přenos signálu

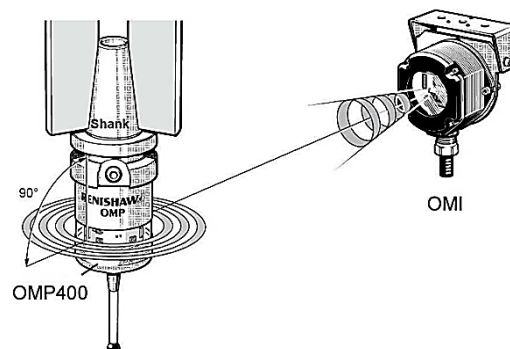
Přenos signálu ze sondy do řídicího systému obráběcího stroje pomocí kabelu (Obr.7) je nejjednodušším i nejlevnějším řešením. Kabel slouží jak k přenosu signálu, tak k napájení. Tento typ komunikace je vhodný pro nástrojové sondy, které jsou pevně spojeny se stolem stroje. Pokud se používají k ručnímu upínání do vřetene stroje, které musí být před upnutím zpevněno polohovou vazbou (stop vřetena), snižuje se přesnost měření a omezuje pohyb sondy v pracovním prostoru stroje. [12]



Obr. 7) Kabelový přenos signálu [13]

Optický přenos signálu

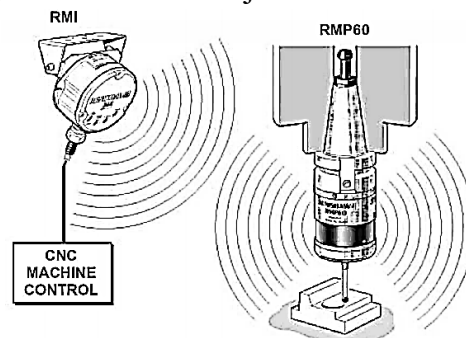
K přenosu signálu opticky se využívá infračervených světelných paprsků, které nejsou náchylné k vnějšímu rušení. Paprsky nelze lidským okem zachytit a jsou zdravotně nezávadné. Přenos probíhá zpravidla prostřednictvím komunikačního modulu (OMI), jenž je umístěn v pracovním prostoru stroje (Obr. 8). Dosah signálu se liší v závislosti na sondě a komunikačním modulu, může se pohybovat např. okolo 7 m. [12]



Obr. 8) Optický přenos signálu [14]

Rádiový přenos signálu

Rádiový přenos (Obr. 9) je využíván přednostně u velkých obráběcích strojů. Dosah se uvádí typicky 15 m, při ideálních podmínkách v praxi se však může ještě zvyšovat. Přenos pracuje na volném frekvenčním pásmu 2,4 GHz. Dojde-li k narušení frekvence, sonda se automaticky přeladí na jiný volný kanál. Kromě dosahu je další výhodou možnost přenosu signálu, i když se mezi sondou a komunikačním modulem (RMI) nachází součást a není tedy vzájemná přímá viditelnost. Nevýhodou je vyšší cena oproti předešlým typům. [13]



Obr. 9) Rádiový přenos signálu [15]

Sondy se standardní přesností snímání

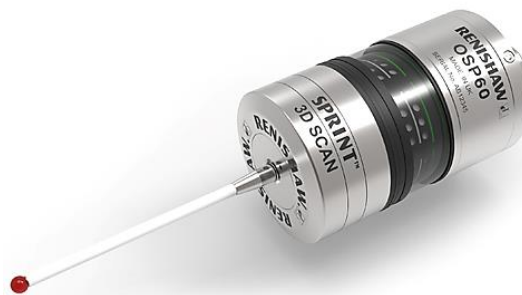
Sondy se standardní přesností snímání firmy Renishaw nabízí klasické měření či ustavení obrobku od malých obráběcích center, přes soustružnická centra, manuálně řízené stroje, brusky až po velké obráběcí stroje. Typ přenosu signálu je možný pomocí kabelu, opticky i rádiově dle druhu sondy. Opakovatelnost měření je uváděna 1 μm . Opakovatelností je myšlena odchylka, která vzniká při vícenásobném najetí sondy do stejného bodu, resp. schopnost sondy se opakovaně po vychýlení navrátit do výchozí polohy v rozsahu deklarované hodnoty. Můžou být nabízeny v kompaktním, miniaturním a ultra-kompaktním provedení. [16]

Sondy s vysokou přesností snímání

Sondy s vysokou přesností snímání jsou výhodnější variantou pro víceosé technicky vyspělé stroje, jelikož využívají jejich přednosti. V současné době jsou proto využívány stále častěji. Využití se pohybuje od brusek s kabelovým přenosem signálu až po velké obráběcí stroje s optickým nebo rádiovým přenosem signálu. Opakovatelnost měření je deklarována na 0,25 μm , což je v porovnání se standardní přesností čtyřnásobně vyšší opakovatelnost. Jeví se jako vhodná varianta pro měření obrobků na těžkých obráběcích strojích. [16]

Skenovací sondy

Výrobce Renishaw poskytuje i skenovací typ sondy, konkrétně sondu OSP60 (viz Obr.10). Nevýhodou je optický přenos signálu, který není příliš vhodný pro stroje velkých rozměrů. Jedná se o vysokorychlostní skenovací sondu. Principem skenovací sondy je stálý dotyk sondy s měřeným povrchem dílce při snímání velkého množství bodů, kde měření je zpravidla prováděno rychleji než u dříve popisovaných dotykových spínacích sond. Dotykové spínací sondy snímají pouze jednotlivé body z povrchu tělesa a následně vyhodnocují rozměry součásti. Při inprocesním měření na obráběcích strojích jsou však spínací sondy využívány přednostně, zatímco skenovací sondy se často aplikují na CMM. [16]



Obr. 10) Skenovací obrobková sonda Renishaw OSP60 [16]

3.2.2 Použití obrobkových sond pro měření těžkých obrobků

Zavedení měření pomocí obrobkových sond do procesu obrábění se pro těžké obrobky zdá vhodným řešením. Ustavení obrobků a nastavení souřadných systémů, korekce nepřesností již během obrábění, či odpadnutí nutnosti přesouvat a vícenásobně upínat obrobek jsou značné výhody zavedení inprocesního měření.

Avšak obrobkové sondy v sobě skrývají i negativní stránky. Při měření pomocí sond se využívá odměřovací systém obráběcího stroje, který v porovnání s CMM není zdaleka tak přesný [12]. Musí se uvažovat např. i s odolností stroje vůči teplotním dilatacím či s tím, že měření probíhá často na tepelně neustáleném obrobku. Kontrolovaná plocha by mohla být také znečištěna třískami [12]. Zmíněné nevýhody se však při měření těžkých obrobků dají kompenzovat zařazením mobilních měřicích zařízení, a to zejména laser trackerů. Např. firma Etalon AG poskytuje trackery schopné eliminovat chyby konstrukce obráběcího stroje a využít obrobkové sondy pro znatelně přesnější měření součástí. Princip samotného měření pomocí trackerů a jejich bližší rozbor bude rozveden dále v práci.

Obrobková sonda RMP 600

Výrobce Renishaw uvádí doporučené sondy dle velikosti a typu stroje. Pro měření na velkých obráběcích strojích výrobce doporučuje výběr sond RMP60 nebo RMP600. Sondy se liší zejména přesností snímání, kde řada 60 se vyznačuje standardní přesností a řada 600 vysokou přesností (popisováno dříve v kap. 3.2.1). Obě varianty mají radiový přenos signálu a v ostatních parametrech se liší minimálně. Jako nejvhodnější varianta pro měření těžkých obrobků se jeví dotyková spínací sonda RMP600 (Obr. 11), níže jsou uvedeny její parametry (Tab. 4).



Obr. 11)
Obrobková sonda
RMP600 [16]

Hlavní využití	Kontrola a ustavení obrobku na středních/velkých obráběcích centrech a portálových obráběcích centrech všech velikostí
Typ přenosu signálu	Rádiový přenos (frekvence 2400 MHz až 2483,5 MHz s rozšířením frekvenčního spektra přepínáním frekvence)
Pracovní dosah signálu	Až 15 m
Doporučené doteky	Délky 50 až 200 mm
Hmotnost (bez kuželu včetně baterií)	1010 g
Životnost baterií (v nepřetržitém provozu)	Max. 230 hodin
Opakovatelnost	0,25 μm
Rozsah pracovních teplot	(+5) $^{\circ}\text{C}$ až (+50) $^{\circ}\text{C}$

Tab. 4) Parametry sondy RMP600 [16]

4 MOBILNÍ MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ

Mobilní měřicí zařízení jsou přenosná zařízení, která svými rozměry zpravidla umožňují převoz i osobním vozidlem. Tím se stávají vhodnou variantou k měření těžkých obrobků, kde součásti budeme moci měřit přímo na obráběcí stroji bez nutnosti přesunu obrobku. Do kategorie mobilních zařízení patří měřicí ramena využívající kloubového mechanismu. Dále zde řadíme trackery, které pracují na principu laserového paprsku.

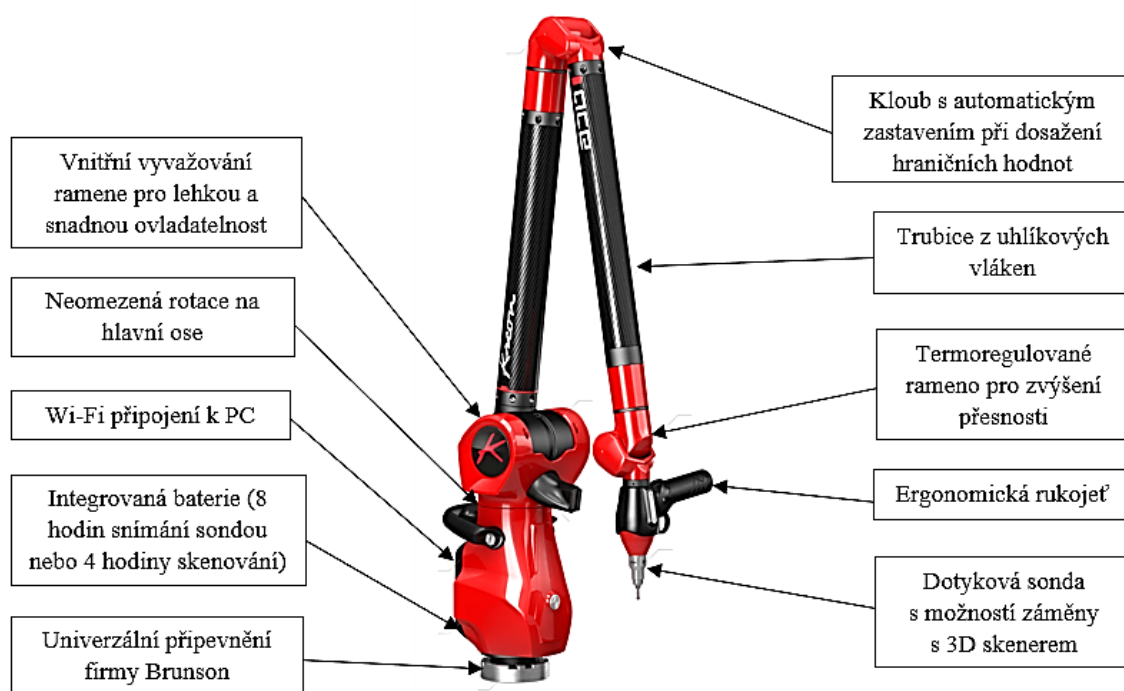
4.1 Měřicí ramena

Měřicí ramena pracují na kloubovém mechanismu, který obsluhuje pracovník zpravidla pomocí ergonomické rukojeti. Ramena jsou celkově velmi flexibilní a mají hladký chod. Obsahují vlastní baterii a Wi-Fi připojení, takže je umožněno je přemístit kdekoli i bez připojení k elektrické síti. Mají možnost měřit pomocí dotykového snímání nebo s použitím bezkontaktních 3D laserových skenerů. [17]

Dosah ramen se běžně pohybuje do 5 m, avšak např. výrobce Trimos poskytuje ramena s rozsahem až 9 m [18]. Nevýhodou při zvětšování rozsahu je však rostoucí nepřesnost měření i hmotnost samotného ramene. Porovnáme-li například 7-osá ramena s dosahy 1.8 m a 9 m od zmiňovaného výrobce, nepřesnost měření ze zvýší čtyřnásobně (až na cca 0,1 mm) [18].

4.1.1 Typy měřicích ramen

V dnešní době jsou standardem 7-osá či 6-osá měřicí ramena. Dále lze rozdělit ramena na snímání pomocí dotykových sond a s použitím bezkontaktních 3D laserových skenerů, které lze zpravidla zaměňovat na stejném ramenu. Poslední rozdělení bude dále popsáno. Niže je popsáno měřicí rameno Ace firmy Kreon s dotykovou sondou (Obr. 12).



Obr. 12) Popis měřicího ramena Ace firmy KREON [19]

Ramena s dotykovým snímáním

Měřicí ramena s dotykovou sondou (Obr. 12) se vyznačují vyšší přesností oproti ramenům se skenery. Zpravidla se jedná o 6-osá ramena, která umožňují rychlou výměnu sond za provozu bez nutnosti opětovné recalibrace nebo zahřívání. Firma Hexagon poskytuje rameno Absolute Arm, které je kompatibilní s více než 100 všestrannými měřicími sondami (doteky) – od sond pro měření průměrů trubek až po úhlové sondy pro obtížně přístupné prvky (viz Obr. 13). Ramena s dotykovým snímáním však velmi často umožňují záměnu sondy za bezkontaktní skener případně kombinují oba prvky zároveň (viz Obr. 14). [20]



Obr. 13) Různé druhy doteků pro mobilní měřicí ramena [20]

Níže je uvedena tabulka přesností měřicích ramen Ace firmy KREON s využitím dotykového snímání (Tab. 5). Lze si všimnout zhoršující se přesnosti při větším měřicím rozsahu ramene, stejně tak mírně zvýšené nepřesnosti u 7-osých ramen oproti 6-osým. Maximální dovolená chyba (MPE_E) stanovená stejně jako u CMM pro dotykové snímání dle normy ČSN EN ISO 10 360-2 se pohybuje v řádu desítek mikrometrů, avšak při využití méně kvalitních modelů ramen a sond může přesahovat $\pm 100 \mu\text{m}$.

Měřicí rozsah ramene [m]	Přesnost [MPE_E]: 6-osá ramena [μm]	Přesnost [MPE_E]: 7-osá ramena [μm]
2	± 26	± 32
2,5	± 34	± 38
3	± 43	± 51
3,5	± 56	± 62
4	± 67	± 74
4,5	± 82	± 89

Tab. 5) Přesnosti měřicích ramen Ace firmy KREON s využitím dotykového snímání [21]



Obr. 14) Kombinace skeneru a dotykové sondy firmy Hexagon [22]

Ramena s bezkontaktním skenerem

Ramena využívající bezkontaktní laserové 3D skenery (Obr. 15) jsou nejčastěji 7-osá ramena, která mají výhodu rychlejšího měření součástí oproti použití dotykové sondy. V současné době lze skenovat libovolné povrchy z jakýchkoli materiálů. Záměna skeneru za sondu během měření či kombinace obou typů měření současně (Obr. 14) je dnes již standardem, který poskytuje většina výrobců. Při výměně není nutná žádná kalibrace skeneru ani sond. [23]

Přesnosti měřicích ramen Ace firmy KREON s využitím skeneru Zephyr II blue (Tab.6) jsou uvedeny níže. Lze si všimnout mírně snížené přesnosti při použití skeneru oproti využití dotykových sond. Maximální dovolená chyba (MPE) se pohybuje v řádu desítek mikrometrů, avšak stejně jako u dotykových sond může přesáhnout i $\pm 100 \mu\text{m}$ při použití méně kvalitních ramen či skenerů.

Měřicí rozsah ramene [m]	Přesnost [MPE]: 6-osá ramena [μm]	Přesnost [MPE]: 7-osá ramena [μm]
2	± 34	± 39
2,5	± 42	± 45
3	± 51	± 58
3,5	± 64	± 69
4	± 75	± 81
4,5	± 90	± 96

Tab. 6) Přesnosti měřicích ramen Ace firmy KREON s využitím skeneru Zephyr II blue [21]

4.1.2 Použití měřicích ramen pro měření těžkých obrobků

Měřicí ramena poskytují výhodu mobilního zařízení, které můžeme přesouvat dle potřeby ke konkrétní součásti a měřit ji z více úhlů. Pro měření těžkých obrobků by však bylo nutno rameno vícenásobně přesouvat kvůli změření veškerých požadovaných rozměrů, jelikož je omezeno maximálním rozsahem. Jako výhodnější varianta se jeví využití laser trackerů, které zrychlí a zpřesní měření součástí. Detailnější rozbor trackerů bude popsán dále v práci.

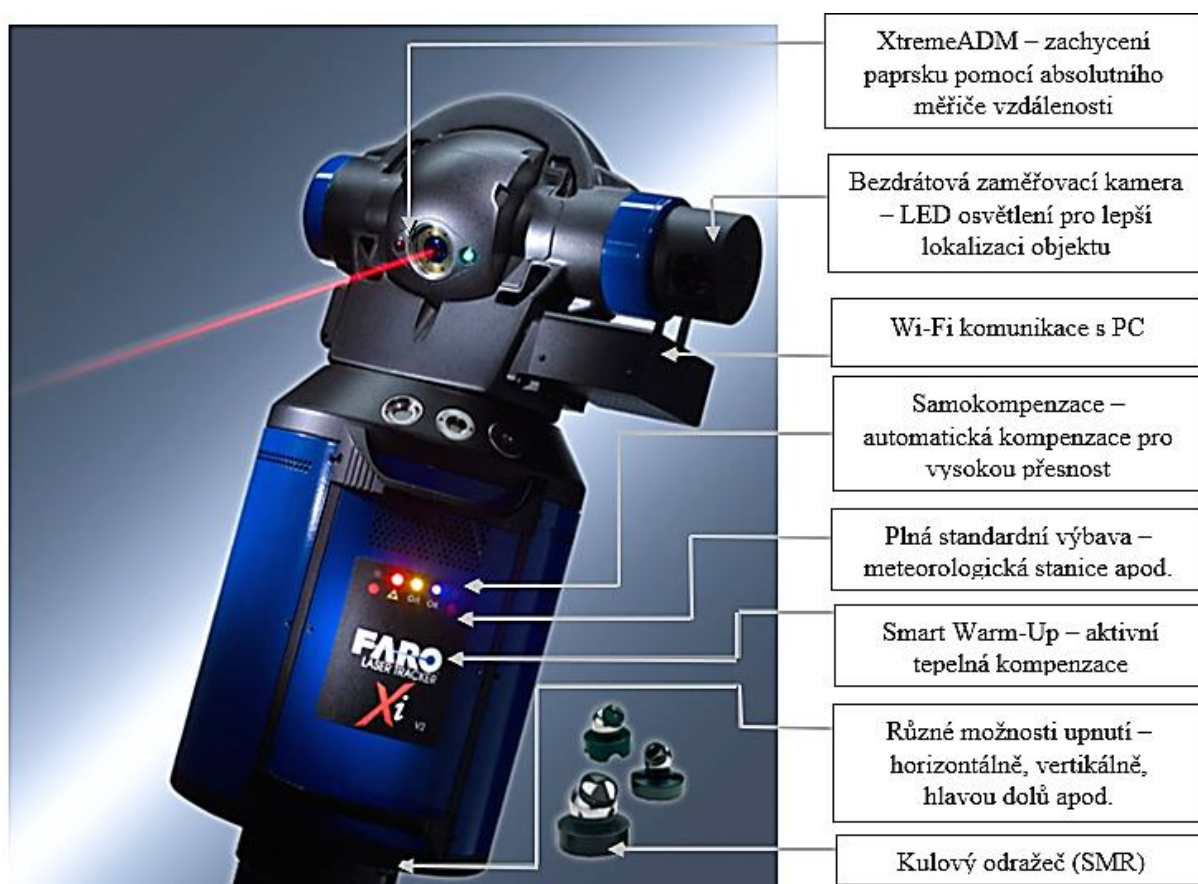


Obr. 15) Měřicí rameno firmy KREON s bezkontaktním skenerem [23]

4.2 Trackery

Laser trackery jsou mobilní měřicí zařízení určená primárně k měření rozměrných objektů, jejichž velikost se může pohybovat řádově v desítkách až stovkách metrů. Zařízení se skládá z optické hlavičky, stojanu a řídicí jednotky. Měřicí software poskytuje zpracování a analýzu výsledků, porovnání s CAD modely nebo tvorbu protokolů přímo na místě měření zpravidla prostřednictvím PC. Princip měření spočívá v nepřetržitém sledování polohy cílového odražeče umístěného proti měřenému objektu. Sledování polohy je prováděno pomocí optické hlavičky, resp. laserového paprsku, který se odrazí od odražeče a navrací se zpět do výchozí pozice, což probíhá na vzdálenosti desítek až stovek metrů. Hlavička je ovládána pomocí dvou servomotorů, které jí natáčejí na požadovanou polohu. Měření je prováděno pomocí odečtu polárních souřadnic, kde jsou zaznamenávány 2 úhly a vzdálenost. V současnosti je standardem technologie umožňující přerušování laserového paprsku během měření, jelikož řídicí jednotka automaticky naváže spojení s odražečem při odstranění překážky v cestě a to beze ztráty přesnosti. [24]

Velká mobilita zařízení je dosažena pomocí snadné přepravy, kde se v jednom příručním kufru zpravidla nachází stojan a v druhém hlavička spolu s ostatním příslušenstvím. Hmotnost zařízení se v současné době pohybuje nejčastěji do 15 kg. Systém má dokonalé těsnění proti prachovým částicím, jelikož je navržen pro měření přímo ve výrobním prostředí. Rozsah pracovních teplot při dosažení plné přesnosti je u výrobců uváděn od cca -10°C do $+40^{\circ}\text{C}$. Tracker lze provozovat i ve velmi náročných podmínkách např. s velkým stupněm elektromagnetického rušení svařoven, v prašném prostředí sléváren apod. Níže je popsán Laser Tracker Xi firmy FARO (Obr. 16). [24]



Obr. 16) Popis FARO Laser Trackeru Xi [25]

4.2.1 Typy trackerů dle způsobu měření

Hlavní dělení trackerů spočívá v rozdělení na měření pomocí tzv. kulového odražeče SMR, dotykové sondy a 3D skeneru. Využití trackerů pro automatizované řešení pomocí robotů je v současnosti rozšiřující se oblastí. Posledním typem objevujícím se na současném trhu je tzv. přímé skenování, které nepotřebuje žádný odražeč v bodě měření oproti ostatním technologiím. Popis zmíněných typů trackerů bude popsán dále v práci.

Kulový odražeč (SMR)

Princip měření pomocí kulového odražeče (SMR - Spherically Mounted Retro reflector) je nepřetržité sledování daného odražeče pomocí laserového paprsku. Popis měření vzdálenosti a možnost přerušení a navázání paprsku je popsán dříve (viz kap. 4.2). Pracovník umísťuje postupně dané odražeče na konkrétní místa měřeného tělesa, z čehož se následně vyhodnotí pomocí softwaru konečný model. Odražeč je tvořen trojicí navzájem kolmých zrcadel uzavřených v kulovém pouzdru (Obr. 17). Tím je zaručeno odražení dopadajícího paprsku laseru nazpět ve stejném směru. Velikost pouzdra se pohybuje v řádu centimetrů. Výrobci nabízejí mnoho druhů odražečů (viz Obr. 18) různých velikostí či přesností. [26]

Dotyková sonda

Měření pomocí dotykové sondy je prováděno pracovníkem, který zpravidla bezdrátovou sondou zaznamenává konkrétní body na měřeném tělese, což je následně vyhodnoceno softwarem pro vytvoření konečného modelu. Výhodou metody je možnost se dostat i na jinak nepřístupná místa, která nejsou měřitelná pomocí jiných metod. To je umožněno tvarem sondy a malou plochou dotyku s tělesem. Princip sledování polohy sondy pomocí laseru je proveden pomocí odražečů, které jsou umístěny po stranách sondy. Jako příklad firmy Leica Geosystems (patřící pod skupinu Hexagon) lze uvést dotykovou sondu Leica T-Probe (Obr. 19) s dosahem až 60 m ve všech směrech od laser trackeru. [27]



Obr. 17) Kulové odražeče SMR firmy API [26]



Obr. 18) Odražeč SMR s širokým vstupním úhlem Hexagon [28]



Obr. 19) Sonda Leica T-Probe [27]

3D skener

Skenování pro laser tracker systémy je vyřešeno opět pomocí obsluhy, která provádí ruční skenování pomocí 3D skeneru ze vzdálenosti nejčastěji desítek centimetrů případně až jednoho metru od měřeného objektu. Šířka skenovacího řádku se pohybuje od cca 200 mm až po 600 mm (u Leica Absolute Scanner LAS-XL – Obr. 20). Provoz skeneru je zajišťován pomocí baterie případně je používán jeden napájecí kabel. Sledování skeneru pomocí laserového paprsku z trackeru je provedeno pomocí odražečů umístěných po stranách skeneru. [29]

Automatizované řešení pomocí robotů

V současné době je kladen důraz na automatizaci výroby a kontroly jednotlivých součástí. Společnost Leica Geosystems poskytuje řešení pomocí sledovacího zařízení Leica T-Mac (Tracker-Machine control sensor). Zařízení je sledováno laserovým paprskem, stejně jako předešlé typy pomocí odražečů umístěných na zařízení. Umisťuje se na robota vybaveného např. dotykovou sondou, který může provádět automatické přesné měření. Zařízení T-Mac je možno také umístit na robota provádějící přímo výrobní operace. Laser tracker snímá přesnou polohu ramene robota a software v reálném čase provádí korekci polohy, čímž je dosažena velmi vysoká přesnost již při výrobě součástí. Na robota nemusí být umístěno jen zařízení T-Mac, ale je možnost použít rameno robota např. pro 3D skener (Obr. 21), čímž nám vzniká plně automatizovaný měřicí systém. Zřejmou výhodou eliminace obsluhujících pracovníků je časová i finanční úspora. Avšak pro využití těžkých obrobků velkých rozměrů je omezení dosahem robota velmi omezující záležitostí. [30]



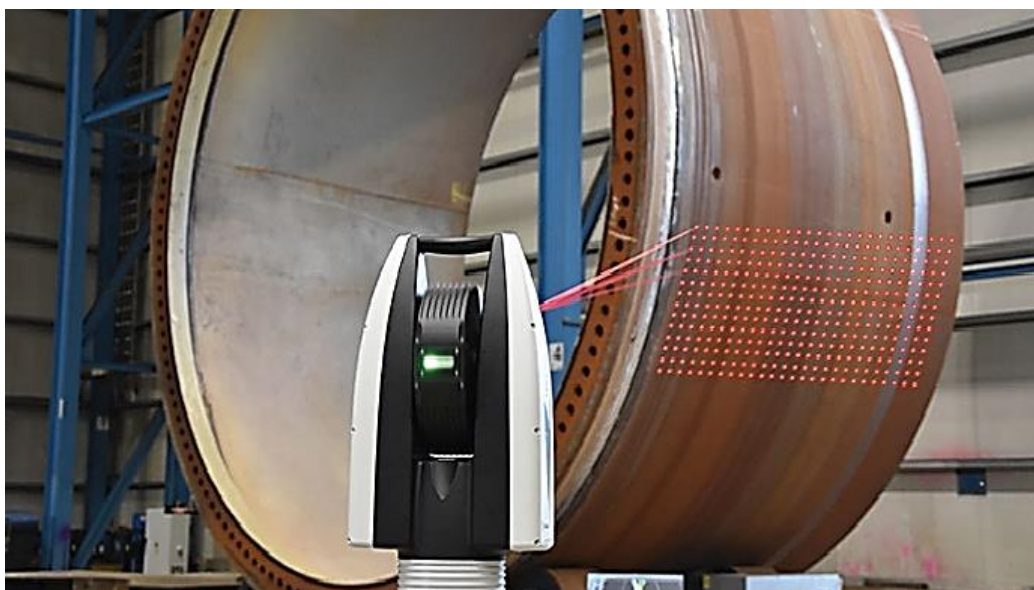
Obr. 20) Leica Scanner LAS-XL [29]



Obr. 21) Robot s 3D skenerem při využití Leica Absolute Tracker AT901 [30]

Přímé skenování

První laser tracker s přímým skenováním uvedla na trh firma Leica Geosystems, jedná se konkrétně o Leica Absolute Tracker ATS600 (Obr. 22). Princip přímého skenování je rozdílný oproti dříve popisovaným technologiím, jelikož je schopen přesně lokalizovat bod v prostoru bez nutnosti použití odražeče v místě měření. Model ATS600 je založený na Wave-Form Digitiser technologii, je vybaven skenovacím absolutním dálkoměrem a na základě iterací dokáže lokalizovat bod s přesností v řádu stovek mikrometrů na vzdálenost až 60 m. Měření probíhá nejprve definováním oblasti pomocí obsluhy v CAD modelu nebo prostřednictvím integrované přehledové kamery. Dále se zvolí požadovaná hustota sítě bodů (viz Obr. 22), na čemž bude záviset rychlost skenování a výsledná přesnost. Následně už měření probíhá zcela bezobslužně a automaticky, bez nutnosti použití odražečů. Nakonec měřicí software vyhodnotí data a vytvoří přesný model. Tracker však umožňuje i použití klasických kulových odražečů zejména pro účely vyrovnání a definice, což zefektivňuje výsledné měření. Měření bez nutnosti jakýchkoli odražečů otevírá možnosti skenování těžkých obrobků, které nebylo možno skenovat ani pomocí klasického ručního skeneru např. z důvodu příliš velkých rozměrů nebo nedostupnosti pro obsluhu apod. Časová a finanční úspora je také nespornou výhodou přímého skenování. [31]



Obr. 22) Grafické znázornění sítě bodů trackeru s přímým skenováním [31]

4.2.2 Zástupci trackerů

Leica Absolute Tracker AT960

Jedná se o laser tracker společnosti LEICA Geosystems (patřící do skupiny Hexagon). Tento model (Obr. 23) nabízí měření pomocí kulového odražeče, dotykové sondy, ručního skeneru a možnost využití pro automatizované řešení (se zařízením Leica T-Mac). Bezdrátová komunikace a možný provoz na baterii je standardní výbavou jako u všech laser trackerů společnosti LEICA. Technologie PowerLock umožňující automatické navázání paprsku při přerušení a intuitivní ovládání pomocí dotykového displeje minimalizující uživatelské chyby jsou také přítomny u všech modelů, které budou uváděny. Hlavní výhodou modelu je možnost použít všechny standardní typy měření a jejich libovolné kombinace, což jistě umožní najít vhodný způsob měření pro téměř jakoukoli aplikaci. Níže jsou uvedeny parametry trackeru (Tab.7). [32]

Metody měření	SMR/dotyk/skener/automatizace
Dosah -SMR	80 m
Dosah - dotyk	30 m
Přesnost [MPE] - SMR	$\pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m/m}$
Přesnost [MPE] - dotyk	$\pm 35 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m/m}$
Přesnost [MPE] - skener	$\pm 60 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m/m}$
Provozní teplota	0 až +40 °C
Rel. vlhkost	max. 95 %
Hmotnost	13,8 kg
Rozměry (X x Y)	25,8 x 47,7 cm
Frekvence obnovování	1000 Hz

Tab. 7) Parametry Leica Absolute Tracker AT960 [32]



Obr. 23) Leica Absolute Tracker AT960 [32]

Leica Absolute Tracker AT403

Tracker AT403 (Obr. 24) společnosti LEICA Geosystems je navržen speciálně na měření pro velké objemy, náročné provozní podmínky a snadnou přenosnost. Jedná se o laser tracker s největším dosahem na trhu. Lze s ním měřit součásti o průměru až 320 m bez nutnosti přesunu (pomocí SMR, s dotykovou sondou lze měřit stejné objemy, avšak s nutností přesunu trackeru). Velkou výhodou je také široký rozsah provozních teplot, za kterých může být využíván (-15 až +45 °C). Přenosnost trackeru je umožněna zejména nízkou hmotností a rozměry, což umožňuje využít přepravy dokonce pomocí speciálního batohu na zádech. Poskytuje možnost měřit pomocí kulového odražeče nebo dotykové sondy. Parametry trackeru jsou uvedeny níže (Tab. 8). [33]

Metody měření	SMR/dotyk
Dosah -SMR	160 m
Dosah - dotyk	10 m
Přesnost [MPE] - SMR	$\pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m/m}$
Přesnost [MPE] - dotyk	$\pm 200 \mu\text{m}$
Provozní teplota	-15 až +45 °C
Relativní vlhkost	max. 95 %
Hmotnost	7,3 kg
Rozměry (X x Y)	22,1 x 40,3 cm
Baterie/Wi-Fi	ANO

Tab. 8) Parametry Leica Absolute Tracker AT403 [33]



Obr. 24) Leica Absolute Tracker AT403 [33]

Leica Absolute Tracker ATS600

Absolute Tracker ATS600 (Obr.25) společnosti LEICA Geosystems je prvním laser trackerem s přímým skenováním na trhu, který zároveň umožňuje kombinovat tradiční metodu měření pomocí kulového odražeče. (Výrobce NIKON Metrology také poskytuje metody přímého skenování odpovídající přesnosti, avšak bez kombinace s klasickými metodami měření jako SMR v jednom modelu.) Na základě požadované přesnosti měření (výběr hustoty sítě bodů) se rychlost skenování pohybuje od 10 do 135 sekund na čtvereční metr. Velká efektivita modelu je umožněna díky možnosti kombinace kulového odražeče (zejména pro vyrovnání a definice) a přímého skenování rozsáhlých nebo složitých ploch součástí. Tabulka parametrů modelu je uvedena níže (Tab. 9). [31]

Metody měření	Přímé skenování/SMR
Dosah - SMR	80 m
Dosah - přímé sken.	60 m
Přesnost [MPE] - SMR	$\pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m/m}$
Přesnost [MPE] – př. sk.	$\pm 300 \mu\text{m}$ (na vzdálenosti 30 m)
Rychlost sken.	10 - 135 sec/m ²
Provozní teplota	0 až 40 °C
Relativní vlhkost	max. 95 %
Hmotnost	14,2 kg
Rozměry (X x Y)	25,8 x 47,7 cm
Baterie/Wi-Fi	ANO
Frekvence obnovování	1000 Hz

Tab. 9) Parametry Leica Absolute Tracker ATS600 [31]



Obr. 25) Leica Absolute Tracker ATS600 [31]

Srovnání výrobců laser trackerů

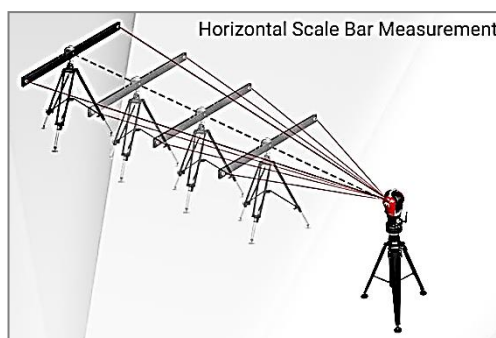
Níže je uvedeno srovnání výrobců laser trackerů (Tab. 10) sestavené na základě informací, které aktuálně poskytují na svých webových stránkách. Konkrétně se jedná o společnosti LEICA Geosystems, API Metrology, FARO Technologies a NIKON Metrology. Maximální dosahy jsou uvedeny při využití kulového odražeče (SMR) bez nutnosti přesunu trackeru. Dosahem je myšlen poloměr měřené oblasti, kterou dokáže tracker zachytit. Lze tedy měřit objekty o průměru až 320 m (u LEICA). Dosahy s využitím dotykové sondy či skeneru se pohybují v menších hodnotách (např. 25 m). Maximální dovolená chyba (MPE) trackerů při použití na relativně běžnou vzdálenost 30 m se pohybuje do hodnoty $\pm 300 \mu\text{m}$. Při využití na větší dosahy se přesnost odpovídajícím způsobem zhoršuje.

Pozn.*: Zmínění výrobci neposkytují konkrétní laser tracker s přímým skenováním a odpovídající přesností, ale pouze 3D skenery s přímým skenováním, které jsou vhodné např. ke skenování budov, avšak s přesností až v řádu milimetrů.

Výrobce	LEICA Geosystems	API Metrology	FARO Technologies	NIKON Metrology
Počet modelů	4	3	4	3
Max. dosah [m]	160	80	80	50
Přesnost [MPE]	$\pm 15 \mu\text{m}$ + $6 \mu\text{m/m}$	$\pm 15 \mu\text{m}$ + $7 \mu\text{m/m}$	$\pm 20 \mu\text{m}$ + $7 \mu\text{m/m}$	$\pm 300 \mu\text{m}$
SMR/dotyk/skener	ANO	ANO	ANO	ANO
Příme skenování	ANO	NE*	NE*	ANO

Tab. 10) Srovnání výrobců laser trackerů

Maximální dovolená chyba (MPE – Maximum Permissible Error) je deklarována pomocí normy ASME B89.4.19-2006 speciálně pro zařízení typu laser tracker. Definicí MPE jsou extrémní hodnoty chyby dovolené při předepsaných podmínkách pro daný laser tracker. Avšak běžné hodnoty nepřesností se pohybují typicky v polovičních velikostech. Měření maximální dovolené chyby pro délkové rozměry probíhá pomocí přesně kalibrované tyče s odražeči po stranách o délce 2,3 m, která se postupně oddaluje od trackeru (viz Obr. 26). [34]



Obr. 26) Princip měření MPE pro délkové rozměry pomocí laser trackeru [34]

4.2.3 Použití trackerů pro měření těžkých obrobků

Laser trackery zpravidla umožňují kombinaci základních měřicích metod pomocí kulového odražeče, dotykových sond nebo skenerů, což umožňuje rychlé a efektivní měření součástí. Použití laser trackerů při měření těžkých obrobků se jeví jako velmi výhodná varianta. Oproti CMM je jasnou výhodou mobilita daných zařízení a měření přímo v náročných výrobních prostředích, čímž odpadá nutnost přesunu součástí. Také omezení rozměrové, které je problémem u CMM i měřicích ramen, není pro trackery žádnou překážkou a může být prováděno měření součástí až v řádu stovek metrů. Časová a z toho plynoucí finanční úspora oproti zmíněným metodám měření je zřejmá.

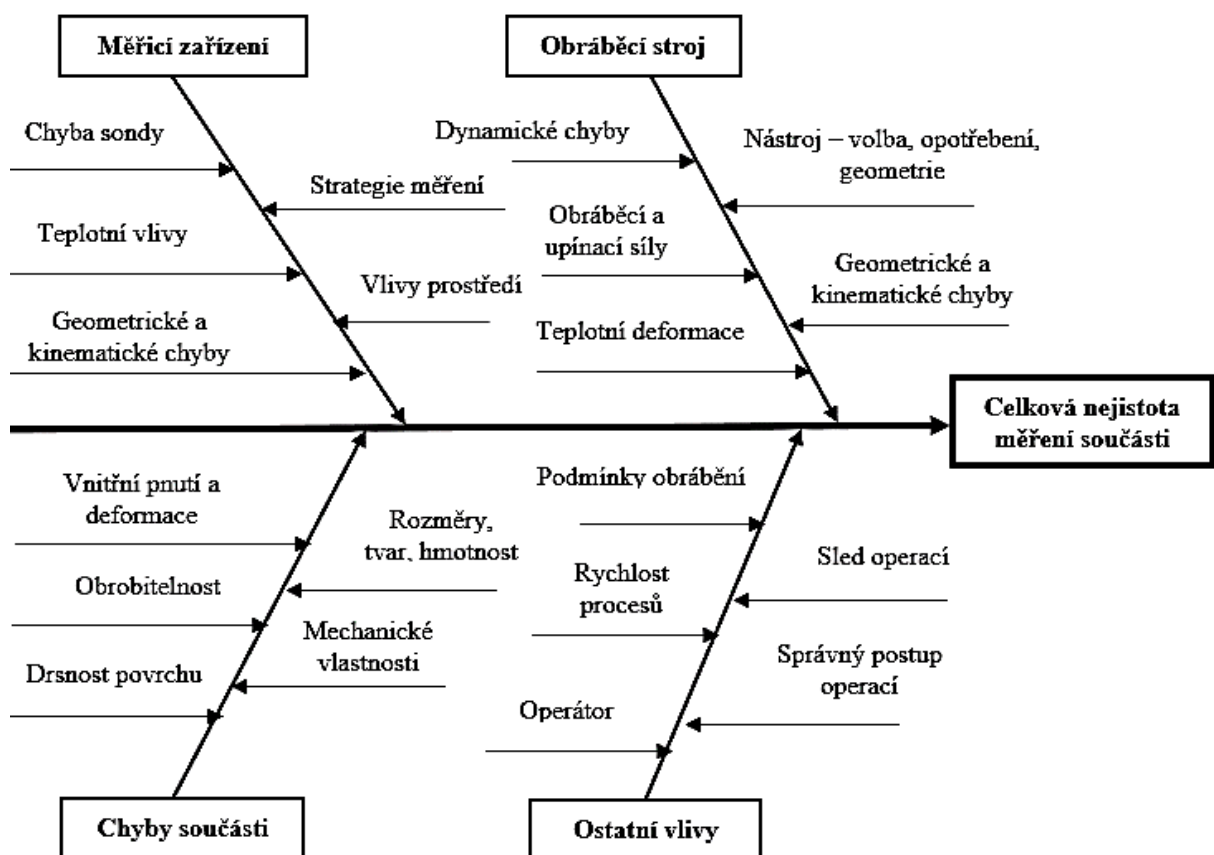
Jako vhodná varianta pro měření těžkých obrobků se zdá kombinace obrobkových sond, které jsou vhodné pro ustavení a „orientační“ měření součásti během obrábění, a využití přesnějších laser trackerů přepravených přímo ke stroji pro finální měření součástí. V případě změřených nepřesností je možnost ihned korigovat dané chyby na obráběcím stroji.

5 VLIVY NA NEJISTOTU MĚŘENÍ

V praxi nelze provést měření, které by dosahovalo absolutní přesnosti. Objevuje se množství negativních vlivů způsobující odchylku mezi skutečnou a naměřenou hodnotou sledované veličiny. Výsledek měření se tedy nachází v určitém intervalu okolo skutečné hodnoty. V současné době je vyhodnocování naměřených dat prováděno pomocí nejistoty měření. Tzv. *standardní nejistota* $\pm u$ představuje rozptyl hodnot okolo výsledku měření. [35]

Za zdroje nejistot lze označit jevy, které ovlivňují neurčitost výsledku měření, a tedy vzdalují naměřenou a skutečnou hodnotu. Lze za ně považovat např. nevhodný výběr přístroje, konstrukční chyby strojů, nevhodný postup při měření, nekompensované vlivy prostředí atd. [35]

Níže je uvedeno schéma vlivů ovlivňující celkovou nejistotu měření součásti (Obr. 27). Lze si všimnout hlavního rozdělení na nejistoty vznikající při obrábění, měření, chyby samotné součásti a ostatní dříve nezahrnuté vlivy. Všeobecně lze považovat za hlavní vlivy geometrické chyby obráběcího a měřicího zařízení, chyby snímání sondy (kontaktní i bezkontaktní), vlivy teploty a okolního prostředí, rozměry a tvar samotné součásti nebo chyby způsobené obsluhou. Vzhledem k rozměrům a hmotnostem těžkých obrobků a nutnosti použití velkých obráběcích strojů jsou patrné vysoké nejistoty při měření těchto součástí oproti obrobkům standardních rozměrů.



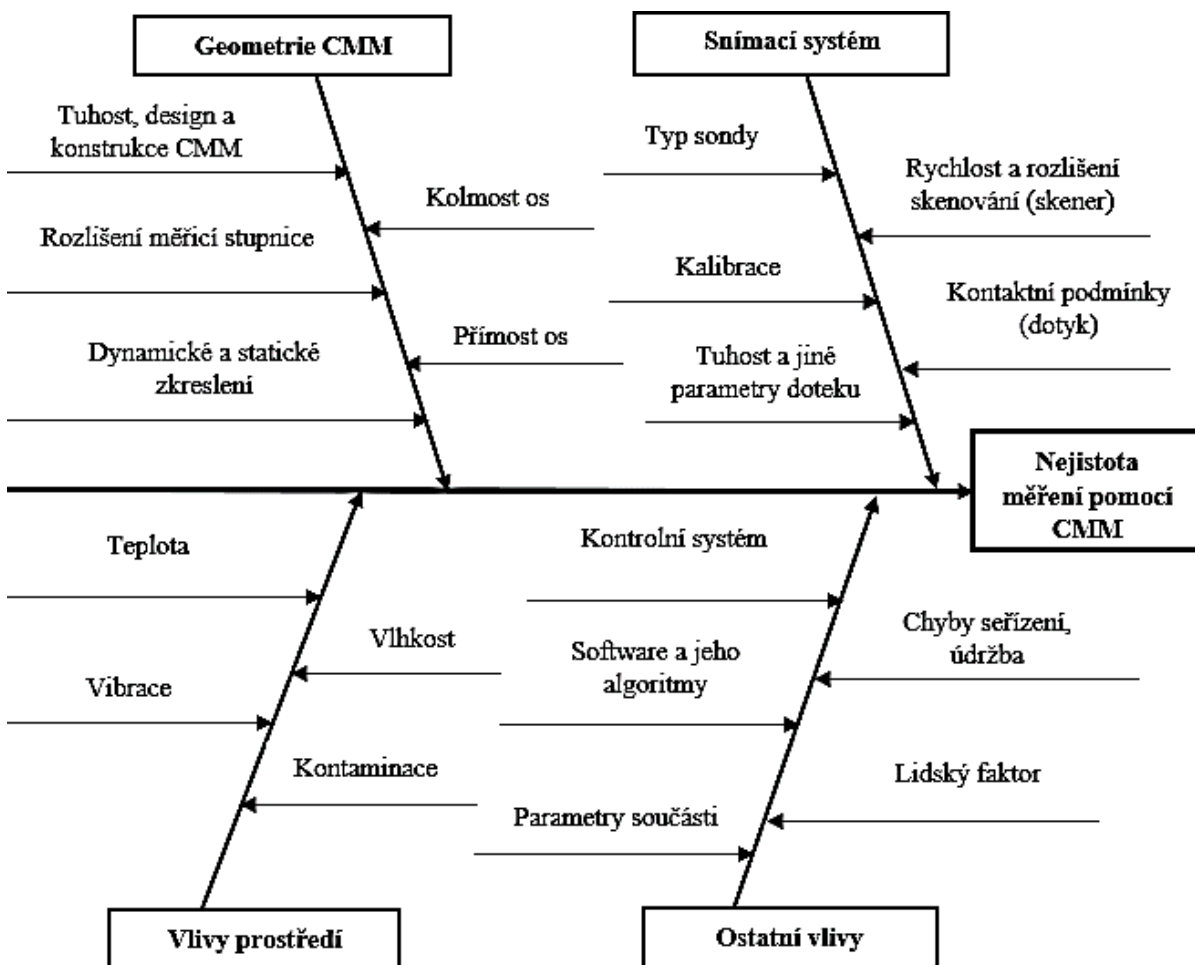
Obr. 27) Schéma vlivů ovlivňující celkovou nejistotu měření součásti [36, upraveno]

5.1 Nejistota měření pomocí CMM

Schéma vlivů na nejistotu měření pomocí CMM (Obr. 28) je uvedeno níže. První oblastí ovlivňující nejistotu měření je geometrie CMM, která je ovlivněna např. přímostí a kolmostí os, konstrukcí nebo tuhostí souřadnicového stroje apod. Další oblastí mající vliv na přesnost měření je použitý snímací systém, kde patří zvolený typ sondy (kontaktní i bezkontaktní), rychlost a rozlišení skenování (za použití bezkontaktního skeneru), kalibrace atd. [37]

Oblast vlivu prostředí má také neméně důležitý dopad na nejistotu měření. Při používání CMM je zpravidla nutná tepelná stabilita prostředí, jelikož přesnost je u těchto zařízení deklarována v relativně úzké oblasti teplot např. +15 až +30 °C, proto se v současné době osy i sloupky CMM chrání izolovanými kryty a měchy a je používána nucená vnitřní cirkulace vzduchu [38]. Také vlivy vlhkosti, vnějších vibrací nebo možné kontaminace prostředí např. prachovými částicemi je nutné brát v úvahu.

Poslední oblast v sobě zahrnuje všechny ostatní dříve nezmíněné vlivy. Může sem patřit např. údržba stroje, chyby při seřízení, použitý kontrolní systém, software stroje a jeho algoritmy apod. Vliv parametrů obrobku, tedy jeho velikost, geometrie či hmotnost ovlivňuje nejistotu měření, jak již bylo uvedeno dříve a bude platit u všech popisovaných měřicích metod.



Obr. 28) Schéma vlivů na nejistotu měření pomocí CMM [37, upraveno]

5.2 Nejistota měření pomocí obrobkových sond

Nejistota měření pomocí obrobkových sond je mimo jiné ovlivněna faktory, které byly zmiňovány již dříve (viz Obr. 27). Stejně tak tyto vlivy budou mít dopad na měření pomocí měřicích ramen i trackerů. Zejména má však při inprocesním měření velký vliv na nejistotu měření geometrie obráběcího stroje a jeho deformace. Ty mohou nastávat z mnoha příčin, např. teplotními dilatacemi způsobenými změnou teploty během dne, přímým slunečním zářením na stroj nebo lokálními teplotními zdroji vznikajícími při samotném obrábění. Deformace stroje mohou nastávat také z důvodu sil vznikající při řezném procesu nebo mohou být následkem upnutí či velké hmotnosti obrobků. Negativně působí i dlouhodobá změna geometrie stroje způsobená dlouhodobým provozem. [39]

Zmíněné vlivy na geometrii stroje a jeho deformace negativně ovlivňují samotnou přesnost obrábění, tak i nejistotu měření za použití obrobkových sond. Proto se objevuje v současné době snaha zpřesňovat měření na obráběcích strojích, což je prováděno např. pomocí trackerů sledujících přesnou polohu vřetena stroje. Tím jsou částečně eliminovány chyby konstrukce obráběcího stroje, jelikož trackery využívají vlastního odměřovacího systému nezávislého na samotném stroji. [40]

5.3 Nejistota měření pomocí měřicích ramen

U měřicích ramen je primárním vlivem ovlivňujícím nejistotu měření délka ramene, jak je patrné z dříve uvedených tabulek přesností ramen (viz. Tab. 5 a Tab. 6). Se zvětšujícím se dosahem ramene se odpovídajícím způsobem zvyšuje nejistota měření. Stejně tak se objevují větší nepřesnosti při využití bezkontaktních skenerů oproti dotykovému snímání a při využití 7-osých ramen oproti 6-osým. Vlivy teploty jsou zde eliminovány v relativně velkém rozsahu, jelikož jsou ramena konstruována na použití v náročných provozních podmínkách např. o rozsahu teplot +5 až +40 °C, což je umožněno díky teplotním senzorům a termoregulaci. Nejistota měření může být také ovlivněna zkušenostmi obsluhy, která provádí samotné měření součásti.

5.4 Nejistota měření pomocí trackerů

Nejistota měření za použití trackerů je zejména ovlivněna vzdáleností cílového odražeče a trackeru, resp. vzdáleností na kterou probíhá přímé skenování, kde s rostoucí vzdáleností lineárně roste nejistota. Zvolená metoda měření a použitý typ kulového odražeče, sondy či skeneru rovněž ovlivňuje výslednou nejistotu měření. Vliv prostředí je kompenzován ve velkém rozsahu, podobně jako u měřicích ramen, jelikož je předpokládáno použití v náročných provozních podmínkách. To je umožněno díky integrovaným meteorologickým, které monitorují okolní prostředí včetně teploty, tlaku i vlhkosti. Tak je zajištěno přesné měření bez ohledu na většinu vnějších vlivů prostředí. Široký rozsah provozních teplot pohybujících se např. v rozsahu -15 až +45 °C poskytuje využití v nejproblematictějších podmínkách ze všech zmiňovaných měřicích metod. Vliv pracovníka provádějící měření součásti může být dalším faktorem zvyšujícím nejistotu měření.

6 ZÁVĚR

Tato práce byla zaměřena na problematiku měření těžkých obrobků. První část se zabývala stacionárními měřicími zařízeními, konkrétně souřadnicovými měřicími stroji a inprocesním měřením pomocí obrobkových sond. Vhodnost použití CMM pro měření těžkých obrobků se nejeví jako vhodná varianta. Hlavní nevýhodou je přesun obrobku z obráběcího stroje do konkrétního CMM. Vzhledem k relativně nízkému počtu souřadnicových měřicích strojů odpovídajících rozměrů, jak je patrné ze srovnání výrobců, by hrozil přesun obrobků i na větší vzdálenosti, což by vyvolalo velké časové prodlevy a růst finančních nákladů. Za velkou výhodu lze označit vysokou přesnost zejména mostových CMM pohybující se maximálně v řádu desítek mikrometrů. Avšak i vzhledem k nejvyšší pořizovací ceně začínající v řádu desítek milionů korun využití souřadnicových měřicích strojů nebude patrně hlavní volbou pro společnost řešící problematiku měření těžkých obrobků.

Zavedení měření pomocí obrobkových sond do procesu obrábění se však pro těžké obrobky zdá vhodnějším řešením. Ustavení obrobků, korekce nepřesností již během obrábění či odpadnutí nutnosti přesouvat a vícenásobně upínat obrobek jsou značné výhody zavedení inprocesního měření. Negativní stránkou této metody měření jsou především chyby konstrukce obráběcího stroje, resp. využití jeho odměřovacího systému pro účely měření. Tento problém lze však částečně eliminovat zařazením laser trackerů.

Druhá část práce se zabývala mobilními měřicími zařízeními, konkrétně měřicími rameny a trackery. Měřicí ramena sice poskytují výhodu mobilního zařízení, které můžeme přesouvat dle potřeby ke konkrétní součásti a měřit ji z více úhlů, avšak pro měření těžkých obrobků se nejeví jako vhodné řešení. Důvodem je zejména nutnost vícenásobného přesunu ramene pro změření požadovaných rozměrů, jelikož je omezeno maximálním dosahem, který by dokonce nemusel dostávat na měření velmi rozměrných těžkých obrobků.

Využití trackerů při měření těžkých obrobků se jeví jako ideální řešení. Oproti CMM je jasnou výhodou mobilita daných zařízení a měření přímo v náročných výrobních prostředích a podmínkách, čímž odpadá nutnost přesunu součástí. Také omezení rozměrové, které je problémem u CMM i měřicích ramen, není pro trackery žádnou překážkou a může být prováděno měření součástí až v řádu stovek metrů. Časová a z toho plynoucí finanční úspora oproti zmíněným metodám měření je zřejmá. Jako výhodné řešení se zdá kombinace obrobkových sond, které můžeme využít při ustavení a měření součástí během obrábění, a následné použití přesnějších laser trackerů při finálním měření součástí. Při zjištění nepřesností by byla možnost ihned korigovat dané chyby přímo na obráběcím stroji.

Třetí část práce se zabývala vlivy na nejistotu měření. Faktorů negativně ovlivňujících výsledné měření je celá řada. Lze zmínit např. konstrukční chyby měřicích zařízení a jejich geometrie, nekompenzované vlivy prostředí (zejména teploty), chyby obsluhy atd.

Zařízení typu laser tracker je v současnosti stále více využíváno při automatizaci, kde robot provádí měření či přímo výrobní operaci za použití sledovacího zařízení, které umožňuje korekci polohy v reálném čase. Podobně se výrobní společnosti zabývají korekcí polohy při měření pomocí obrobkových sond na obráběcích strojích. Předpokládám, že by se rozvoj problematiky v budoucnu mohl ubírat směrem korekce polohy přímo při výrobní operaci na obráběcích strojích pomocí laser trackeru. Také předpokládám rozvoj zejména v oblasti přímého skenování a jeho větší využití při měření, což by vedlo ke snížení chyb obsluhy a snížení časové a finanční náročnosti výroby.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MAREK, J. a kol., Konstrukce CNC obráběcích strojů IV.0. Praha: MM publishing, s.r.o, 2018. Speciální vydání. 427 s. ISBN 978-80-906310-8-3.
- [2] Oblasti využití. *ŠKODA MACHINE TOOL* [online]. 2019 [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: <https://skodamt.com/cs/oblasti-vyuziti>
- [3] KOČ, Břetislav. Větrné elektrárny VI. *TZB-info* [online]. 2016 [cit. 2019-04-09]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/14392-vetrne-elektrarny-vi-restart-a-soucasnost-vetrne-energetiky-v-cr>
- [4] Biggest engine in the world. *ZME science* [online]. 2017 [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: <https://www.zmescience.com/science/biggest-most-powerful-engine-world/>
- [5] FOJTEK, Oldřich. Souřadnicové měřicí stroje. Elektronická učebnice [online]. [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/>
- [6] DOLÁK, D. Rešerše souřadnicových měřicích strojů CMM a měřicích ramen CMMs.. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 28 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Miroslav Opl.
- [7] Souřadnicové měřicí stroje. *ALWAID s.r.o.* [online]. [cit. 2019-03-15]. Dostupné z: <https://www.alwaid.cz/souradnicove-stroje/>
- [8] NENÁHLO, Čeněk. Souřadnicová měřicí technika. *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2019-03-19]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/souradnicova-merici-technika.html>
- [9] Souřadnicové měřicí stroje. *BRT servis* [online]. 2019 [cit. 2019-03-19]. Dostupné z: <https://brtservis.cz/produkty-wenzel/souradnicove-merici-stroje/>
- [10] BORSKÝ, Václav. Základy stavby obráběcích strojů. 1. vyd. Brno: Ediční středisko VUT, 1986. 145 s. ISBN 55-600-86.
- [11] KATOLICKÝ, Jiří. Je čas získat čas. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2007 [cit. 2019-03-21]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/je-cas-ziskat-cas.html>
- [12] VLČEK, M. Integrace měření do CNC obrábění. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 81 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Aleš Polzer, Ph.D.
- [13] Dotykové sondy pro obráběcí stroje. *Heidenhain* [online]. 2017 [cit. 2019-03-22]. Dostupné z: <https://www.heidenhain.cz/>
- [14] OMP400 Vysoce přesná obrobková sonda. *Renishaw plc* [online]. 2016 [cit. 2019-03-22]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz>
- [15] RMP60 – obrobková sonda s rádiovým přenosem. *Renishaw plc* [online]. 2016 [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz>
- [16] Obrobkové sondy pro obráběcí stroje. *Renishaw plc* [online]. 2018 [cit. 2019-04-11]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/obrobkove-sondy-pro-obrabeci-stroje--6075>
- [17] 3D měřicí ramena. *Alwaid* [online]. 2017 [cit. 2019-03-24]. Dostupné z: <https://www.alwaid.cz/3d-ramena/>

- [18] Portable measuring arms. *Trimos* [online]. 2015 [cit. 2019-03-24]. Dostupné z: <https://www.trimos.com/products/portable-measuring-arms>
- [19] Ace measuring arm. *Kreon3D* [online]. 2017 [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <https://kreon3d.com/scanning-arms-portable-cmm/ace-measuring-arm-portable-cmm/>
- [20] Absolute Arm 6osé. *Hexagon Manufacturing Intelligence* [online]. 2018 [cit. 2019-04-14]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/portable-measuring-arms/absolute-arm-6-axis>
- [21] 3D ramena Ace. *Alwaid* [online]. 2017 [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <https://www.alwaid.cz/3d-ramena-ace/>
- [22] Laserový skener RS5. *Hexagon Manufacturing Intelligence* [online]. 2019 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/3d-laser-scanners/rs5-laser-scanner>
- [23] Ace Skyline. *Kreon3D* [online]. 2018 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <https://kreon3d.com/scanning-arm/ace-skyline/>
- [24] Co je laser tracker. *Topmes* [online]. 2018 [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <http://www.topmes.cz/>
- [25] FARO Laser Tracker Xi. *Trojans* [online]. 2009 [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: http://trosol.com/laser_tracker/downloads/04REF201-147-EN%20-%20FARO%20Laser%20Tracker%20Xi%20Tech%20Sheet.pdf
- [26] SMR odražec. *Topmes* [online]. 2018 [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: <http://www.topmes.cz/technologie/tracker/prislusenstvi/105-smr-odrazec>
- [27] Leica T-Probe. *Hexagon Manufacturing Intelligence* [online]. 2019 [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/laser-tracker-systems/leica-probing-solutions/leica-tprobe>
- [28] Reflektor Super CatEye. *Hexagon Manufacturing Intelligence* [online]. 2019 [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/laser-tracker-systems/accessories-for-laser-tracker-systems/super-cateye-reflector>
- [29] Leica Absolute Scanner LAS-XL. *Hexagon Manufacturing Intelligence* [online]. 2019 [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/3d-laser-scanners/leica-absolute-scanner-las-xl>
- [30] Automatizovaná řešení Leica. *Hexagon Manufacturing Intelligence* [online]. 2019 [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/laser-tracker-systems/leica-automated-solutions>
- [31] Leica Absolute Tracker ATS600. *Hexagon Manufacturing Intelligence* [online]. 2019 [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/laser-tracker-systems/leica-absolute-tracker-ats600>
- [32] Leica Absolute Tracker AT960. *Hexagon Manufacturing Intelligence* [online]. 2019 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/laser-tracker-systems/leica-absolute-tracker-at960>
- [33] Leica Absolute Tracker AT403. *Hexagon Manufacturing Intelligence* [online]. 2019 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/laser-tracker-systems/leica-absolute-tracker-at403>

- [34] Radian 3D Laser Tracker Systems. *API Metrology* [online]. 2018 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://apimetrology.com/laser-trackers/>
- [35] Nejistoty měření. *VŠB - Technická univerzita Ostrava* [online]. [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <http://352lab.vsb.cz/Podklady/AT/nejistoty1.pdf>
- [36] TALABGAEW, Sompoap. A survey of modeling the performance of coordinate measuring machines (CMMs). *Research Gate* [online]. 2014 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Factors-affecting-final-part-accuracy_fig3_274080643
- [37] BENKO, Peter. Uncertainty of CMM measurement. *Metrology Expert* [online]. 2015 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://www.metrologyexpert.com/2015/10/20/153/>
- [38] DEA LAMBDA SP. *Hexagon Manufacturing Intelligence* [online]. 2019 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/coordinate-measuring-machines/gantry-cmms/dea-lambda-sp>
- [39] WECK, Manfred. *Werkzeugmaschinen*. 8. neu bearb. Aufl. Berlin: Springer, 2006. 701 s. ISBN 3-540-22502-1.
- [40] ŠVÉDA, Jiří. Inprocesní měření obrobků. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2013 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/inprocesni-mereni-obrobku.html>

8 SEZNAM ZKRATEK, OBRÁZKŮ A TABULEK

8.1 Seznam zkratek

CAD	Computer Aided Design – počítačová podpora konstruování
CMM	Coordinate Measuring Machine – souřadnicový měřicí stroj
CNC	Computer Numeric Control – číslicové řízení počítačem
MPE	Maximum Permissible Error – max. dovolená chyba (snímání bezkontaktně)
MPE _E	Maximum Permissible Error – maximální dovolená chyba (snímání dotykem)
OMI	Optical Machine Interface – optický komunikační modul
RMI	Radio Machine Interface – rádiový komunikační modul
SMR	Spherically Mounted Retro reflector – kulový odražeč
T-Mac	Tracker-Machine control sensor – sledovací zařízení polohy
Wi-Fi	Bezdrátová komunikace
3D	Three Dimensional – trojrozměrný

8.2 Seznam obrázků

Obr. 1	Transport lopatky větrné elektrárny WinWinD [3]	17
Obr. 2	Kliková hřídel lodního motoru Wärtsilä RT-flex96C [4]	17
Obr. 3	Schéma os portálového CMM [6]	19
Obr. 4	Dotyková sonda [5]	19
Obr. 5	CMM sloupového typu [9]	20
Obr. 6	CMM mostového typu [7]	21
Obr. 7	Kabelový přenos signálu [13]	22
Obr. 8	Optický přenos signálu [14]	22
Obr. 9	Rádiový přenos signálu [15]	23
Obr. 10	Skenovací obrobková sonda Renishaw OSP60 [16]	23
Obr. 11	Obrobková sonda RMP600 [16]	24
Obr. 12	Popis měřicího ramena Ace firmy KREON [19]	25
Obr. 13	Různé druhy doteků pro mobilní měřicí ramena [20]	26
Obr. 14	Kombinace skeneru a dotykové sondy firmy Hexagon [22]	26
Obr. 15	Měřicí rameno firmy KREON s bezkontaktním skenerem [23]	27
Obr. 16	Popis FARO Laser Tracker Xi [25]	28
Obr. 17	Kulové odražeče SMR firmy API [26]	29
Obr. 18	Odražeč SMR s širokým vstupním úhlem Hexagon [28]	29
Obr. 19	Sonda Leica T-Probe [27]	29

Obr. 20	Leica Scanner LAS-XL [29]	30
Obr. 21	Robot s 3D skenerem při využití Leica Absolute Tracker AT901 [30]	30
Obr. 22	Grafické znázornění sítě bodů trackeru s přímým skenováním [31]	31
Obr. 23	Leica Absolute Tracker AT960 [32]	32
Obr. 24	Leica Absolute Tracker AT403 [33]	33
Obr. 25	Leica Absolute Tracker ATS600 [31]	34
Obr. 26	Princip měření MPE pro délkové rozměry pomocí laser trackeru [34]	35
Obr. 27	Schéma vlivů ovlivňující celkovou nejistotu měření součásti [36, upraveno]...	37
Obr. 28	Schéma vlivů na nejistotu měření pomocí CMM [37, upraveno]	38

8.3 Seznam tabulek

Tab. 1	Stupeň výrobní přesnosti dle velikosti stroje [1]	17
Tab. 2	Srovnání výrobců CMM sloupového typu vhodných pro měření těžkých obrobků	20
Tab. 3	Srovnání výrobců CMM mostového typu vhod. pro měření těžkých obrobků...	21
Tab. 4	Parametry sondy RMP600 [16]	24
Tab. 5	Přesnosti měř. ramen Ace firmy KREON s využitím dotyk. snímání [21]	26
Tab. 6	Přesnosti měř. ramen Ace fy KREON s využ. skeneru Zephyr II blue [21].....	27
Tab. 7	Parametry Leica Absolute Tracker AT960 [32]	32
Tab. 8	Parametry Leica Absolute Tracker AT403 [33]	33
Tab. 9	Parametry Leica Absolute Tracker ATS600 [31]	34
Tab. 10	Srovnání výrobců laser trackerů	35