

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 644

ISSN 1213-4198

thesis
?
IS

Ing. Michal Holub

**Vliv geometrické přesnosti
vybraných obráběcích center
na požadované vlastnosti výrobků**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

ING. MICHAL HOLUB

**VLIV GEOMETRICKÉ PŘESNOSTI VYBRANÝCH
OBRÁBĚCÍCH CENTER NA POŽADOVANÉ
VLASTNOSTI VÝROBKŮ**

**EFFECT OF GEOMETRICAL PRECISION MACHINING
CENTERS ON THE DESIRED CHARACTERISTICS
OF THE GOODS**

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

VEDOUcí PRÁCE PROF. DR. ING. JIŘÍ MAREK
OPONENTI PROF. ING. PETER DEMEČ, CSC.
 DOC. ING. JIŘÍ PERNIKÁŘ, CSC.
 ING. BŘETISLAV HÝBNER

DATUM OBHAJOBY 18. 1. 2012

KLÍČOVÁ SLOVA

Geometrická přesnost, přesnost polohování, svislé soustruhy, predikce

KEYWORDS

Geometric accuracy, positioning accuracy, vertical lathes, prediction

Název pracoviště kde je uložen rukopis

Dizertační práce je uložena na Oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně, Technická 2, 616 69 Brno

Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě strojního inženýrství. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.

© Michal Holub, 2012

ISBN 978-80-214-4416-4

ISSN 1213-4198

OBSAH

1 ÚVOD.....	5
2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	5
3 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE	7
3.1 Motivace.....	7
3.2 Definice problémů.....	8
3.3 Cíle řešení dizertační práce	8
3.4 Zvolené metody zpracování dizertační práce.....	9
4 TESTOVANÝ STROJ	9
5 NÁVRH METODIKY MĚŘENÍ	10
5.1 Rozbor problematiky.....	10
5.2 Současné přístupy ke zjišťování geometrických chyb obráběcích strojů	10
5.3 Návrh měření.....	11
5.3.1 Identifikace chyb obrobku z chyb na stroji	11
5.3.2 Stav vědy a techniky v oblasti popisu geometrických odchylek obrobku a stroje....	11
5.3.3 Lineární osy svislého soustruhu.....	12
5.3.4 Návrh měření rotační osy.....	13
5.3.5 Celková chyba od translace a rotace	13
5.3.6 Negativní faktory ovlivňující přesnost vyhodnocených dat.....	13
5.4 Využití navržené metodiky měření.....	14
5.5 Systémový přístup návrhu metodiky měření svislých soustruhů.....	15
6 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE	19
7 ZÁVĚRY A DOPORUČENÍ	19
8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	22
9 VLASTNÍ PUBLIKACE.....	24
10 TVŮRČÍ AKTIVITY A PROJEKTY	25
11 ŽIVOTOPIS.....	26
12 ABSTRAKT	28

1 ÚVOD

Třískové obrábění patří k nejrozšířenějším strojírenským technologiím, od kterého se odvíjí další technické směry ve strojírenství. Neustále se vyvíjející technika a technologie umožňují nasazení nejen nových technických prvků do obráběcích strojů, ale i metodik zpracovávající potřebné informace, kterými je zvyšována efektivita výroby a také povýšení technické úrovně samotného obráběcího stroje.

Obráběcí stroje prošly historickým vývojem jako každé jiné odvětví, kde hlavním cílem bylo a stále je zvyšování produktivity a zvyšování pracovní přesnosti strojů. Tento trend nadále trvá a pro obrábění nejpreciznějších součástí jsou nasazovány CNC obráběcí stroje, kde obrobek je obroben na minimálním počtu strojů a upnutí. Díky vývoji materiálů, pohonů, řízení a měřicí techniky, je možné neustále zvyšovat přesnost polohování jednotlivých částí stroje.

Dosažením kvalitní konstrukce jednotlivých dílů je docíleno vysoké geometrické přesnosti, která ovlivňuje výslednou pracovní přesnost obráběcího stroje. Na základě vypracovaných analýz v oblasti geometrické přesnosti i přesnosti polohování obráběcích center a shrnutím poznatků současné techniky bude v této práci sestaven systémový přístup pro predikci vybraných vlastností obráběcího stroje. Cíl je zaměřený na možnost určení již u výrobce, zda dojde na nabízeném stroji k obrobení zákazníkem určené součástí, či nikoliv. Tato skutečnost má velký vliv nejen na nabídkový proces a případný průchod zakázky firmou, ale může sloužit jako velmi silný nástroj pro zpětnou vazbu na konstrukci.

Úspěšné zpracování navržené metodiky je podporováno firmou TOSHULIN, a.s., kde byly provedeny příslušné měření a ověření výsledku na svislém soustruhu SKIQ30 (v.č. 1604). Právě požadavky z průmyslu na sestavení systémového přístupu (metody) predikce vybraných vlastností obráběcího stroje, kde výchozími parametry mají být specifické požadavky zákazníka na budoucí obrobek, je absence takovéto metody.

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

NC obráběcí stroje se sériovou kinematikou jsou nejdůležitější součástí ve výrobě a současně nositelem high-technologií ve strojírenském průmyslu. Hnacím prvkem jsou požadavky od zákazníků na neustále vyšší dosahované přesnosti, jakosti obrobků a jakosti celé výroby. Důsledkem těchto požadavků je souvislý vývoj s cílem dosažení vyšší výrobní přesnosti, kterou z nemalé části ovlivňuje geometrická přesnost obráběcích strojů (dále jen OS). Ve výsledku se nejedná o nic jiného, než definovaně zajišťovat ideální polohu nástroje vůči obrobku s minimálními vzájemnými odchylkami.

Ve skutečnosti vzniká během obrábění nepřesnost, která je dána celkovou chybou nástroje vůči obrobku od vzájemné ideální polohy. Tato chyba je důsledkem nedokonalosti soustavy stroj-nástroj-obrobek a je možné ji minimalizovat vhodnými metodami. Pro aplikaci těchto metod, konstrukčních nebo pasivních či aktivních kompenzací je nezbytné odhalit a vhodně popsat příčiny vzniklé chyby. V celkové chybě stroje jsou promítnuty chyby geometrické přesnosti, chyby vzniklé tepelnou dilatací a chyby vyvolané silami od obrábění. Mezi další prvky ovlivňující vzájemnou polohu nástroje a obrobku jsou např. dynamická stabilita stroje (tuhost) vyvolaná nesouměrným záběrem destiček nástroje do obrobku, naladění pohonů a celkové řízení ovlivňující nejen dynamickou stabilitu vybuzenou silami od zrychlení a brždění částí strojů, ale také najetí do požadované polohy, atd. Nicméně geometrické chyby tvoří hlavní část nepřesnosti obráběcího stroje [1].

Při tvorbě modelů popisujících geometrické chyby vychází autoři [1, ..., 19] převážně z dokonale tuhých os, přičemž jsou modelovány pomocí homogenních transformačních rovnic (HTM). Z provedené rešerše popisu obráběcího stroje a vyskytujících se chyb na něm lze aktuální výzkum v tomto směru rozdělit do následujících oblastí:

- Popis kinematické struktury
- Přístup měření a vyhodnocení
- Přístup ke kompenzačním metodám

Aktuální stav poznání pracovní přesnosti obráběcích strojů

Jak bylo řečeno v úvodní kapitole, tak mezi jeden z důležitých faktorů táhnoucích vývoj obráběcích strojů je zvyšování jejich pracovní přesnosti, která je úzce spojena s jeho geometrickou přesností.

Výzkumná činnost v této oblasti je zaměřena především na optimalizaci konstrukčních řešení a nasazení aktivních kompenzací do OS. V dnešní době jsou tyto konstrukce koncepčně stavěny na požadavcích zákazníků. Z takového kritéria se výrobci strojů snaží o stavbu „jednouúčelových“ obráběcích strojů určených na konkrétní aplikaci. S tímto přístupem je možné rapidně zvýšit základní parametry stroje (přesnost, výkonnost, atd.), ale současně roste pořizovací cena stroje (případně i provozní náklady), což může být pro zákazníka neakceptovatelné. V případě vývoje nové řady obráběcích strojů jde opět o kompromis mezi konstrukcí a požadavky zákazníků (rozšíření o opce stroje). Pořizovací cena stroje tím klesá, jelikož jsou pro stejné řady použity stejné nebo alespoň podobné komponenty. Oblast vývoje v konstrukční části je možné neustále vyvíjet a to především v použití nových materiálů nosných částí, využití přesnějších mechanismů k vyvození translačních i rotačních pohybů, uložení a mazání vzájemně se pohybujících komponent, aktivnímu odvodu tepla z nestabilních teplotních zón stroje, ustavení celého stroje, atd.

Druhou částí výzkumu výrobců OS i výzkumných institucí je použití aktivních kompenzací doplněné o příslušné algoritmy. Právě rozšiřování kompenzačních prvků (teplotní, geometrické, dynamické, atd.) mají vést ke zvyšování výsledné přesnosti obráběcích strojů. Nejedná se přitom pouze o minimalizaci chyb vzniklých mezi nástrojem a obrobkem, ale také o sledování stavu stroje. S implementací nejnovějších technologií do OS roste možnost vytvářet diagnostické systémy výrobních strojů.

Tento přístup zajišťuje výrobcí výrobního stroje neustále sledovat stav vyráběných strojů a současně porovnávat nově vyvíjené řady výrobních strojů. Dalším stěžejním přínosem je konkrétní volba stroje výrobcem dle požadavků zákazníka na kvalitu budoucího obrobku. Snížení času nutného pro stanovení nabídky je dalším přínosem výrobcí, který může rychle reagovat na požadavky zákazníka. V neposlední řadě jsou to ušetřené finance v průběhu stanovení nabídky volbou nejvhodnějšího stroje pro aplikaci vyžadovanou zákazníkem.

Současný stav poznání v oblasti zvyšování pracovní přesnosti obráběcích strojů je převážně zaměřen na malé a střední CNC obráběcí stroje. Důvodem je především dostupnost těchto strojů s možností experimentálních ověření a tím spojenou finanční náročnost. Co se týče velkých CNC obráběcích strojů a jejich pracovní přesnosti, jsou tyto stroje v průběhu životního cyklu ovlivněny mnoha faktory (přesnost obrobku velkých komponent OS, deformace jednotlivých komponent a celé nosné soustavy od vlastní hmotnosti, velké statické i dynamické zatížení od velkých obrobků), které mohou být u malých a středních CNC OS zanedbány a tudíž nemusí být nijak blíže řešeny.

3 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

3.1 MOTIVACE

Současný stav řešené problematiky v oblasti popisování chyb vzniklých v procesu obrábění byl získán podrobnou rešerší. Informace zpracované rešerše byly převážně čerpány ze zahraničních odborných publikací a časopisů (Precision Engineering, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Mechatronics, apod.), dále ze sborníků konferencí, komerčních materiálů a domácích odborných publikací. Výsledky rešerše ukázaly, že stav popisovaného tématu dizertační práce je v průmyslové praxi velmi málo nebo skoro vůbec řešen, a to na úrovni teoretické i experimentální. Pro ilustraci je v práci věnována kapitola metodice posuzování geometrické přesnosti obráběcích strojů, především měřicí techniky a zpracování získaných hodnot. Současně tato partie zvýrazňuje motivaci řešení dizertační práce a její potenciál pro výrobce CNC obráběcích strojů, a to se zaměřením na velké CNC obráběcí stroje.

Motivací pro řešení této práce jsou následující body:

- snižování nákladů na vývoj nových strojů doplněním o databázi geometrického chování jednotlivých částí nových i stávajících svislých soustruhů
- doposud nebyl publikován žádný přístup k sledování stavu „geometrického chování“ svislých soustruhů a ověřování konstrukčních řešení
- využití nových technologií z oblasti výpočetní a měřicí techniky v procesu vývoje a kontroly obráběcích strojů
- zrychlení času pro identifikaci vhodného stroje a stanovení cenové nabídky dle specifikace zákazníka.

3.2 DEFINICE PROBLÉMU

Pro zvýšení konkurenceschopnosti firem je nutné neustále nabízet zákazníkům služby, které uspokojí jejich rostoucí požadavky na výrobní stroje. Jedním z požadavků je doba ke stanovení ceny a dodací lhůty nového stroje.

Druhým požadavkem jsou neustále se zvyšující nároky na kvalitu obráběcího stroje po dobu jeho životního cyklu. Na tyto požadavky se bude soustředit dizertační práce, kde v řešení budou zpracovány právě problémy zaměřené na vybrané vlastnosti obráběcího stroje a predikování vybraných vlastností budoucích obrobků vyrobených na svislém soustruhu.

Řešením těchto klíčových bodů se podpoří zrychlení procesu pro dobu ocenění i dodání nového stroje. Současně budou získané informace dále využity pro zpětnou vazbu při vývoji nových strojů, popř. jejich konstrukčních uzlů.

3.3 CÍLE ŘEŠENÍ DIZERTAČNÍ PRÁCE

Cílem této práce je navrhnout metodiku měření, ze které bude možno predikovat vlastnosti budoucího obrobku v závislosti na vybraném obráběcím stroji. Z dostupných norem, metodik a nových technologií určených pro kontrolu obráběcích strojů bude sestavena nová metodika, určená k predikci budoucího obrobku a vybraných vlastností obráběcího stroje. Součástí je i zohlednění faktorů, které mohou navrženou metodiku negativně ovlivnit. Jelikož není možné sestavit metodiku, která by byla schopná zohlednit všechny faktory ovlivňující výslednou přesnost budoucího obrobku, bude nutné vybrat takové veličiny, které budou schopny vypovědět co nejvyšší mírou o budoucích geometrických vlastnostech obrobku. Ve stejném smyslu bude metodika zohledňovat i ekonomické hledisko a to v náročnosti na technické vybavení a vynaloženého času k získání potřebných informací.

3.4 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ DIZERTAČNÍ PRÁCE

Předložená práce je zpracována tak, že bude nejdříve představen zkušební stroj, který je vybrán z výrobního spektra firmy TOSHULIN, a.s. Pro vybraný svislý soustruh se sestaví metodika měření, a budou na něm prováděny veškeré experimentální zkoušky. V následující kapitole bude naznačen základní princip nové metodiky měření a současně představeny požadavky na hledané vlastnosti zkušebního stroje, včetně budoucího obrobku. Na základě těchto požadavků se sestaví princip pro získávání hledaných parametrů ze zkušebního stroje. Současně probíhá rešerše s aktuálními trendy měření, jsou vytipovány vhodné přístroje pro měření a představeny principy získávání hledaných veličin.

V návaznosti je popsáno jak teoretické zpracování návrhu měření pro svislé soustruhy, tak vytipování technického vybavení k jeho úspěšné realizaci.

Navržené měření je experimentálně ověřeno na testovaném stroji a podrobně popsáno. Zpracované informace budou sloužit jako vstupní hodnoty do navržené metodiky. Další část práce je věnována modifikaci navrženého principu měření svislých soustruhů a doporučeních pro další zpracování a aplikace metodiky.

4 TESTOVANÝ STROJ

Popis stroje

Za testovaný stroj (demonstrátor) byl zvolen svislý soustruh z produkce firmy TOSHULIN, a.s. Výrobní program firmy TOSHULIN se skládá z osmi výrobních a osmi velikostních řad. Zvolený demonstrátor spadá do výrobní řady SKIQ velikosti 30 (SKIQ30) a byl zvolen z následujících důvodů:

- Velikostně odpovídá vyšší řadě vyráběné firmou TOSHULIN, což vyhovuje zadání dizertační práce zabývající se velkými CNC obráběcími stroji
- Svislý soustruh SKIQ30, v.č. 1604 byl k dispozici po celou dobu plánovaného měření

Mezi základní parametry vybraného stroje patří průměr upínací desky stroje o velikosti 3 000 mm, nosnosti 30 000 kg a maximálních otáčkách 200 ot/min. Svislý soustruh je osazen dvěma smykadly, z nichž jedno umožňuje rotační náhon nástrojů pro plnohodnotné obrábění v součinnosti s C-osu svislého soustruhu.

5 NÁVRH METODIKY MĚŘENÍ

5.1 ROZBOR PROBLEMATIKY

Cíl, požadavky na stanovení cílů

Z požadavků kladených na cíle dizertační práce vznikly dílčí požadavky na zajištění příslušných vlastností svislých soustruhů. Pro predikování chování svislého soustruhu a stanovení vlastností budoucího obrobku, které jsou ovlivněny vybranými faktory, bude sestaven příslušný model, sloužící ke srovnání a hodnocení jednotlivých svislých soustruhů. Mezi vybrané faktory ovlivňující výsledné chování stroje patří geometrická přesnost lineárních os, geometrická přesnost rotační osy, přesnost najetí do polohy všech řízených os, technologické podmínky (otáčky rotační desky, zatížení rotační desky, dokončovací operace). Nebudou zde řešeny chyby vzniklé silami od obrábění, chyby vzniklé dynamickým chováním jednotlivých os a stroje jako celku, tepelně ovlivněná soustava stroj-nástroj-obrobek, chyby vzniklé řízením, od upínacích sil, od upnutí obrobků atd. I přes to, že chyby vzniklé silami od obrábění a tepelným ovlivněním nebudou dále řešeny, bude rozebrána myšlenka pro implementaci těchto chyb do připravovaného modelu.

Dalším důležitým předpokladem je ověření na reálném stroji (zkušebním stroji). Vzhledem k finanční, časové náročnosti na experiment a výrobním možnostem firmy TOSHULIN, není možné proměřit, vyhodnotit a porovnat několik strojů stejné výrobní řady a velikosti. Vzhledem k tomuto aspektu bude v práci naznačen přístup pro další zpracování predikování vlastností svislých soustruhů a jejich vhodné volbu pro konkrétní obrobek. Jelikož tato práce je zaměřena na problematiku velkých obráběcích centrech, u kterých nebylo možné vyhledat publikace v odborné literatuře, je zde velký potenciál pro návrh nového přístupu sledování vybraných částí těchto strojů.

5.2 SOUČASNÉ PŘÍSTUPY KE ZJIŠŤOVÁNÍ GEOMETRICKÝCH CHYB OBRÁBĚCÍCH STROJŮ

Geometrická přesnost vycházející z ustavení a seřízení obráběcího stroje je jednou z podmínek pro další úspěšné nasazení do výrobního procesu.

Prvním krokem, bez kterého nemá cenu dále postupovat v seřizování stroje, je samotné ustavení stroje. Cílem je dosáhnout předepsané vodorovnosti v celém pracovním rozsahu jednotlivých os, ustavování se provádí pomocí libel. Následně je provedena kontrola rovinnosti desky stolu a její kolmosti ke smykadlu stroje. Dalšími úkony jsou zkoušky obvodového a čelního házení desky stolu svislého soustruhu. Těmto zkouškám, platným pro všechny obráběcí stroje dal základy již v roce 1932 prof. Schlesinger. Tyto postupy, které byly postupem času do jisté míry rozšířeny, jsou využívány dodnes.

S dalším rozvojem číslicově řízených obráběcích strojů a zvyšování jejich pracovní přesnosti se začali využívat i nové přístroje pro jejich kontrolu. S dalším vývojem měřících sond, kdy se neustále zvyšuje jejich přesnost, spolehlivost a možnosti nasazení, si našly tyto přístroje cestu do oblasti kontroly a kalibrace obráběcích strojů. Mezi tyto přístroje a přístupy k měření lze zařadit MT-Check, R-test od firmy IBS Precision Engineering (IBSPE). Dalším zástupcem zabývající se kontrolou a diagnostikou výrobních strojů je firma RENISHAW. Zástupcem v této oblasti může být měřící sada pro kontrolu pětiosých obráběcích center AxiSet Check-Up.

5.3 NÁVRH MĚŘENÍ

5.3.1 Identifikace chyb obrobku z chyb na stroji

Přístup k identifikaci, zpracování a vyhodnocení geometrických chyb na obráběcích stroji byl definován ze systémového přístupu [20, ..., 25] zpracovaného v dizertační práci. V první části tohoto bodu byly stanoveny požadavky na vybrané vlastnosti svislého soustruhu definující jeho „geometrické“ chování. Z řešení vyplynulo několik variant identifikování a popsání hledaných parametrů stroje. Odlišnost těchto metod spočívá v náročnosti a efektivitě zpracování získaných dat o svislém soustruhu. Jako nejvhodnější varianta byla zvolena metoda, kdy bude svislý soustruh rozdělen na dvě subsoustavy. Subsoustavy se dělí na část stroje s rotační osou, tedy rotační deska svislého soustruhu a na část s translačními osami (pohyby X a Z). Pro zvolený přístup k dekompozici a vhodného popisu stroje byla dále provedena podrobná rešerše z dané oblasti. Výsledky jsou krátce popsány v následující kapitole.

5.3.2 Stav vědy a techniky v oblasti popisu geometrických odchylek obrobku a stroje

Dalším krokem je podrobný popis geometrických chyb vybraného stroje, v tomto konkrétním případě se jedná o popis svislého soustruhu. Z provedené rešerše lze konstatovat, že téma popisu chyb a kompenzačních metod obráběcích strojů je neustále řešené téma. Řešení těchto úloh se odlišuje vždy od typu zkoumaného stroje a cíle řešení. Jak bylo již na začátku konstatováno, nejvíce prací se zabývá kompenzačními metodami pro různé typy obráběcích strojů a CMM. Mnohem méně autorů se zabývá přístupem měření a zpracování získaných informací o strojích a téměř žádné publikace nebyly nalezeny z oblasti přesnosti měření, zpracování, vyhodnocení svislých soustruhů.

Autor Anand ve své práci [26] popsal metodiku pro modelování statické chyby v loži stroje a její vliv na geometrii při vodorovném soustružení. Výslednou chybu přepočítal přes již zmiňovanou HTM s následnou simulací. Výsledkem práce je konstatování, že nejvýznamnější složkou chyby u vodorovného soustružení jsou

chyby vzniklé při posuvu v ose Z. Závěr práce je věnován simulacím válcového obrobku při různých vstupních podmínkách, jako jsou chyba osy a frekvence otáček.

Druhý autor Weck v publikaci [27] popisuje principy měření rotačních os obráběcích strojů. Nastínění problematiky následně popisuje na příkladu s měřením pomocí laseru a fotodiod.

Další autoři Mayer at al. [28] se zabývali ve své publikaci predikováním rozměrů obrobku při soustružení, přičemž sledovali geometrické odchylky vyvolané při soustružení příslušnými silami od obrábění. Bylo zde bráno v úvahu, že stroj se chová jako tuhé těleso. V úvahu pro výpočet bral autor následující parametry: hloubkou záběru d , deformace obrobku a posun středu rotace ve směru X označená na následujícím obrázku jako δ_{mx} a δ_{wx} . Obdobě totéž pro osu Y složky δ_{my} a δ_{wy} . Sílové složky F_r a F_t způsobují odklon nástroje o hodnoty δ_{tx} a δ_{tx} , odchylku od síly F_a autoři zanedbávají. Dále je zanedbána odchylka vzniklá od úhlu natočení.

5.3.3 Lineární osy svislého soustruhu

Tato část práce se věnuje problematice translačních os a identifikaci chyb, které mohou ovlivnit výslednou přesnost obrobení výrobku.

Způsob identifikací chyb TCP, postup měření a vyhodnocení byl navržen pro dostupnou měřicí aparaturu nacházející se na VUT v Brně a TOSHULIN, a.s. Mezi hlavní měřicí přístroje lze zařadit Laserinterferometr od firmy Renishaw a Laser Tracker T3 od firmy API. Jako nastavitelné parametry byly zvoleny velikost kroků v osách X a Y, rychlost posuvů a rozsah pojezd v jednotlivých osách (příčnick, suport, smykadlo).

Zpracování naměřených dat

Ze získaných naměřených dat byl sestaven jeden datový soubor dále zpracovaný dle navržených algoritmů v softwaru Matlab. Výsledkem je soubor odchylek DX, DY, DZ, které jsou sledovány v závislosti na poloze TCP v pracovním prostoru. Separátně byly zpracované hodnoty pro výsuv smykadla v polohách suportu $x = 320$ mm, $x = 1\ 000$ mm, $x = 1\ 640$ mm a pro posuv suportu při vysunutí smykadla v $z = 80$ mm, $z = 360$ mm a $z = 760$ mm. Na jednotlivé posuvy byly aplikovány statistické metody pro predikování sledovaného chování.

Chyby způsobené pohybem nástroje

Z provedených simulací podloženými naměřenými hodnotami se identifikovali chyby vzniklé mezi ideální a skutečnou polohou TCP v souřadnicích X, Y a Z. Následně jsou popsány vlivy jednotlivých chyb na výslednou přesnost obrobení obrobku.

5.3.4 Návrh měření rotační osy

Postup aplikovaný při návrhu měření translačních os vycházel z dostupného technického zázemí převážně firmy TOSHULIN. Pro měření rotační desky musel být stanoven nový přístup, kterým lze určit definované parametry. Mezi tyto parametry byly zvoleny: posunutí v ose X, posunutí v ose Y, posunutí v ose Z, naklopení kolem osy X, naklopení kolem osy Y, posunutí středu otáčení rotační desky v ose X, posunutí středu otáčení rotační desky v ose Y a posunutí středu otáčení rotační desky v ose Z. Všechny hledané odchylky jsou závislé na poloze natočení okolo osy Z.

Vzhledem k proměnlivému zatěžování rotační desky, musely být brány v potaz i parametry jako: velikost otáček desky svislého soustruhu, druh a velikost zatížení. S těmito ovlivňujícími parametry muselo být počítáno pro predikování „geometrického“ chování svislého soustruhu. Z těchto požadavků vznikl dále přístup k měření rotační desky, který je dále popsán v následujícím odstavci.

Návrh měření rotační desky svislého soustruhu a volba měřicího vybavení

Předložený návrh měření rotační desky svislého soustruhu vychází z požadavků předchozího odstavce. V potaz musí být brán rozsah otáček celého výrobního spektra firmy TOSHULIN, tj. 0-600 1/min. Další podmínkou je zatížení rotační desky, které bylo definováno pro zkoušku třemi odlišnými zatíženími (bez zatížení, s definovanou zátěží a s excentrickým zatížením). Těmto požadavkům musela vyhovovat i měřicí aparatura. Na tuto aplikaci musela být vyvinuta celá měřicí aparatura včetně softwaru pro zpracování a vyhodnocení naměřených hodnot. Jako optimální řešení bylo vybráno zařízení obsahující pět bezkontaktních snímačů vzdálenosti s optickým senzorem pro měření otáček a natočení. Tato jednotka byla navržena jako jeden celek pro jednoduchou montáž do nožové hlavy svislého soustruhu. Výsledky byly zpracovány opět jako jeden soubor v softwaru LabVIEW a Matlab.

5.3.5 Celková chyba od translace a rotace

Výsledkem práce bylo stanovení výsledné odchylky mezi nástrojem a obrobkem, která byla porovnána s ideálním virtuálním obrobkem. Získané odchylky DX, DY a DZ byly převedeny na geometrické chyby obrobku, ze kterých se definovala výsledná přesnost budoucího výrobku obrobeneho na testovaném stroji.

5.3.6 Negativní faktory ovlivňující přesnost vyhodnocených dat

V průběhu řešení dizertační práce bylo provedeno velké množství měření, ze kterých bylo možné identifikovat negativní faktory ovlivňující výslednou přesnost predikovaných hodnot. Na základě těchto zkušeností se nadále zpracovává a

upravuje jednotka pro měření rotačních desek s předpokladem zvýšení její přesnosti a zpracovaných dat. Navrhované úpravy se netýkají pouze softwarové části, ale především částí měřicího trnu, uchycení snímačů, propojení softwaru s řídicím systémem stroje atd.

5.4 VYUŽITÍ NAVRŽENÉ METODIKY MĚŘENÍ

Cílem experimentu bylo ověřit navrženou metodiku měření a navrženou měřicí aparaturu na svislém soustruhu. Ze získaných naměřených hodnot byly následně predikovány vlastnosti obrobení budoucího obrobku. Navržená metodika měření svislého soustruhu se skládá ze dvou základních částí, a to měření translačních a rotačních os. Aplikace navržené metodiky měření pro translační osy je teoreticky použitelná na každý obráběcí stroj využívající pouze tři translační pohyby. Vzhledem k použitému přístrojovému vybavení v experimentu nebude navržená aplikace vhodná pro velmi přesné stroje. Velké omezení vzniklo při nasazení přístroje Laser Trackeru a s ním spojené přesnosti měření. Aby bylo možné provést měření, musel být stroj měřen ve speciální poloze, které není možné dosáhnout u zakrytovaného stroje, popř. u strojů menších rozměrů. Na trhu se již objevil přístroj Laser Tracer (fa. Etalon) s vyšší přesností, který ale není pro měření a ověření k dispozici.

Navržená metodika měření a měřicí jednotka rotačních os je vhodná pro jakýkoliv pracovní rozměr rotační osy. Omezení nastane pouze u malých rotačních os při měření během zatížení od obrobku. S dalšími vývojovými pracemi na měřicí jednotce se ukazuje její vysoký potenciál a to ne pouze pro kontrolní měření, ale také zabudování této jednotky do rotační desky. Výslednou aplikací by byla aktivní sledování chyb vzniklých od teploty, zatížení, řezných sil na rotační desce, přičemž by mohly být vybrané chyby ze získaných informací kompenzovány.

Při známém „geometrickém“ chování strojů a obrobení zkušebních obrobků je možné předpokládat závislost mezi „geometrickým“ chováním stroje, technologií obrábění a výslednou přesností obrobku. Navržená metodika měření odpovídá požadavkům na definování „geometrického“ chování stroje a získané výsledky jsou dále aplikovatelné pro predikování vlastností obrobení obrobku.

Získání závislosti mezi „geometrickým“ chováním obráběcího stroje a výslednou přesností obrobení patří mezi hlavní cíle této dizertační práce. Dlouhodobé sledování vybraných tolerancí tvaru na obrobku a simulací obráběcího stroje může vést právě k definování jisté závislosti mezi soustavou stroj-obrobek, z pohledu geometrického chování. Simulace provedená v práci definuje chování stroje v průběhu posuvu nástroje v ose X vůči obrobku. Z obrobení definovanou technologií (dokončovací operací) a následnou kontrolou na CMM. Přímost získaná simulací daného stroje je rovna 0,003mm a skutečná naměřená 0,03mm. Zde byl získán první parametr mezi „geometrickým“ chováním stroje a obrobenou součástí. Při zavedení koeficientu pro obrobení stroje K_o , který je dán podílem skutečné

hodnoty přímosti a teoretické (simulované hodnoty přímosti), získáme hodnotu, která vyjadřuje naše hledané „geometrické“ chování. V předloženém příkladu by tato hodnota K_0 byla rovna 10. Pokud by se těmto zkouškám podrobilo více strojů z produkce firmy TOSHULIN, a prokázalo by se takovéto chování, bylo by potom pro výrobce celkem jednoduché predikovat vlastnosti obrobení budoucích obrobků.

5.5 SYSTÉMOVÝ PŘÍSTUP NÁVRHU METODIKY MĚŘENÍ SVISLÝCH SOUSTRUHŮ

V průběhu řešení dizertační práce byl sestaven návrh metodiky měření svislých soustruhů včetně prvotního návrhu měřicí aparatury k predikování požadovaných vlastností výrobků. Návrh této metodiky je zobrazen v následujícím vývojovém diagramu (Obr. 2).

První část vývojového diagramu „*volba*“ specifikuje skupinu obráběcích strojů, pro které je metodika navržena. V našem případě se jedná o skupinu svislých soustruhů s různými technickými parametry.

Druhá část „*definování požadavků*“ zahrnuje stanovení požadavků ze strany zákazníků na budoucí obrobek, ze kterých se definují vybrané požadavky na svislé soustruhy. Zde je nutné uplatnit dlouholeté zkušenosti zaměstnanců výrobní firmy, od kterých jsou definovány požadavky na svislé soustruhy. Současně zde byl svislý soustruh (soustava) rozdělen na dva subsystémy (rotační osa, translační osy), se kterými se nadále pracuje zvlášť. Rozdělení jednotlivých úkolů je dáno složitostí soustavy a požadavky na obsluhu příslušných měřících aparatur poskytovaných ze strany výrobce.

Opět následuje bod vývojového diagramu „*volba*“, kde jsou z výrobního spektra vybrány rozměrově vhodné stroje definované např. průměrem rotační desky, velikostmi pojezdu, rozsahem otáček, nosností, atd. Volba rozměrů vychází opět z požadavků zákazníka.

Následující krok „*definování požadavků*“ musí respektovat dosahovanou pracovní a geometrickou přesnost svislých soustruhů z celého výrobního programu výrobce. Po identifikaci jednotlivých prvků sledované soustavy je možné definovat požadavky na měření z hlediska geometrické přesnosti jednotlivých subsoustav a hledaných parametrů.

„*Funkční vývojová etapa*“ obsahuje nejen rešerši různých přístupů k vyhodnocování geometrických, pracovních a kinematických chyb na stroji dle norem, vnitřních předpisů firmy a technik publikovaných v odborné literatuře, ale také potřebné přístrojové vybavení nacházející se na pracovišti VUT v Brně, TOSHULIN a především obecně na trhu. Výsledné řešení musí respektovat předchozí krok (dosahované přesnosti jednotlivých strojů). Koncové řešení aktuálního kroku jsou vhodně zvolené dostupné přístroje, popř. navržené vlastní

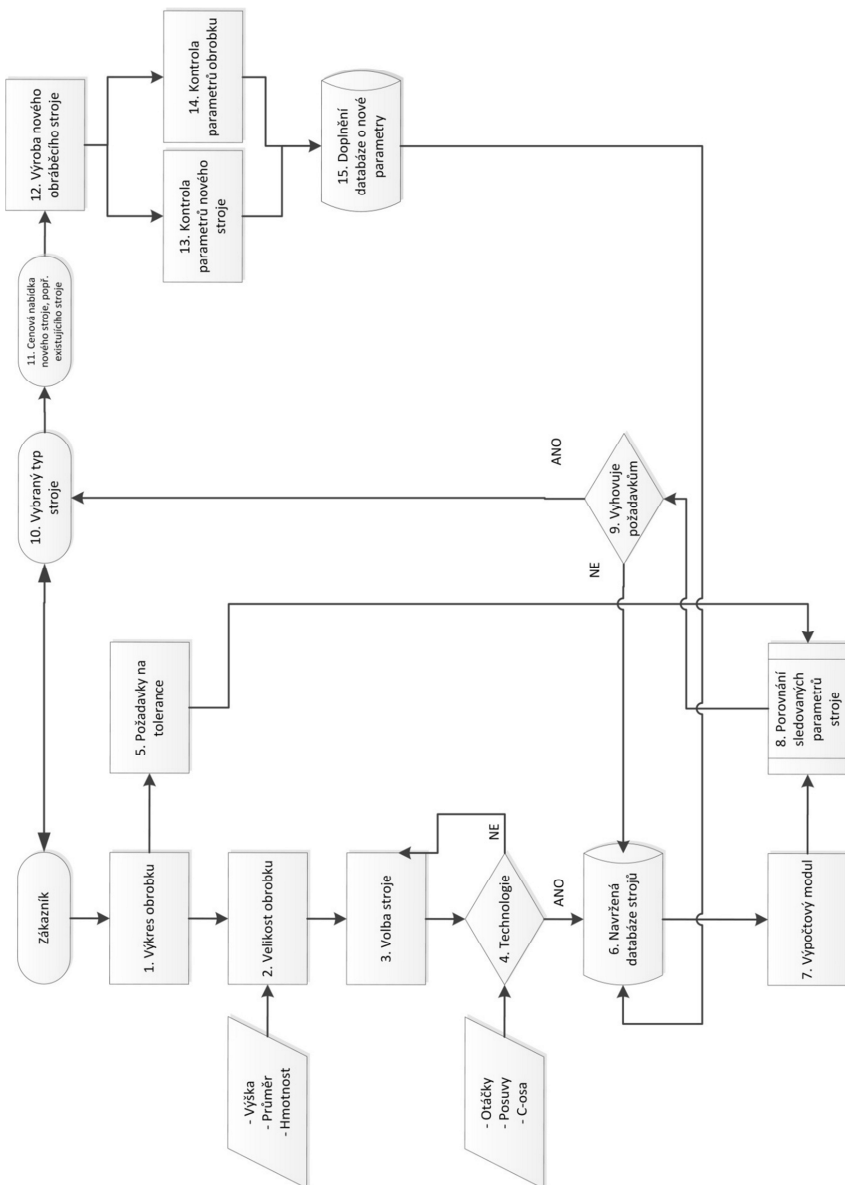
měřicí aparatury a vývoj potřebného softwaru pro vyhodnocení požadovaných vlastností stroje.

Po sestavení měřicí aparatury a přístupu k samotnému měření nastává opět blok „*rozhodování*“, ve kterém se vhodně zvolí nastavení parametrů pro měření. Zde hraje velkou roli zkušenost realizačního týmu. Při nevhodné volbě parametrů lze během jednoho měření získat velké množství naměřených dat, která jsou velmi náročná na další zpracování.

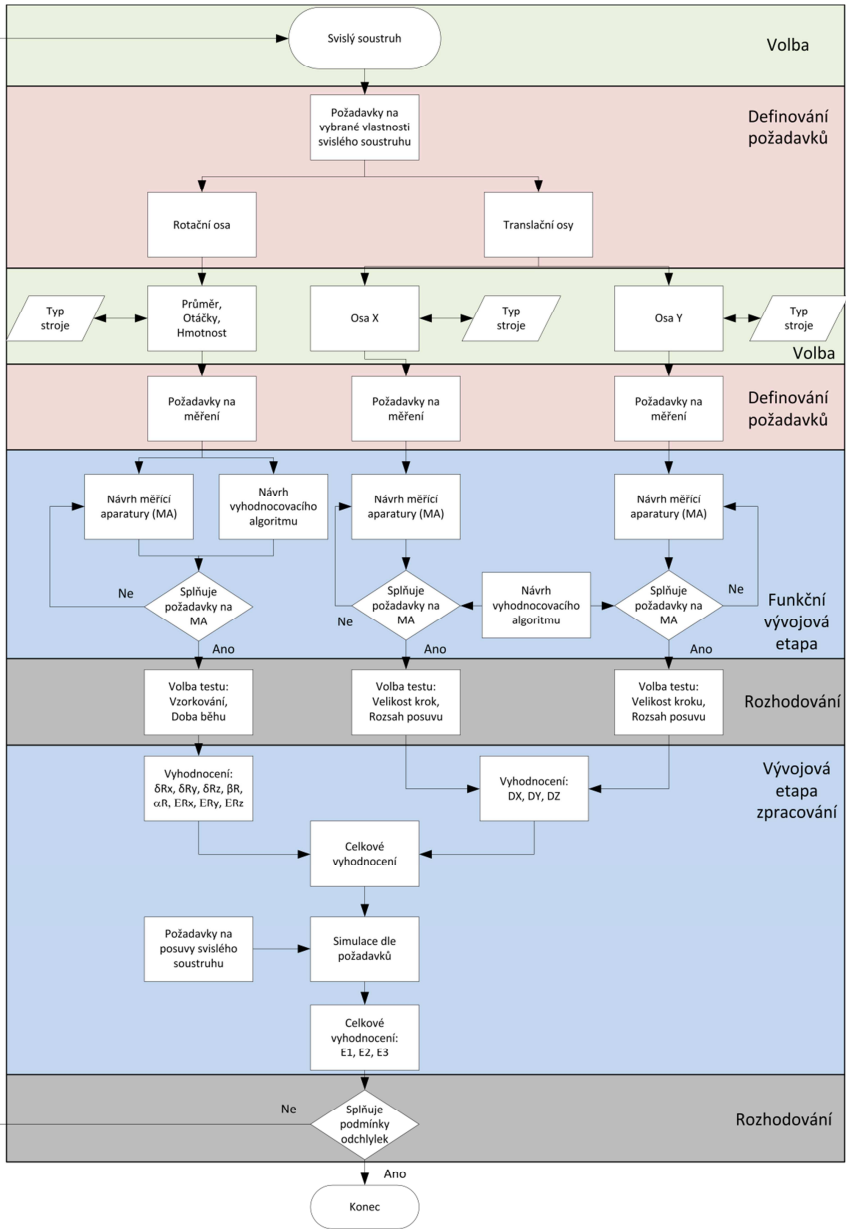
Další krok „*vývojová etapa zpracování*“ v sobě zahrnuje výpočtovou část již definované kinematiky svislého soustruhu translačních a rotačních os. Současně jsou do modelu zaneseny požadované pohyby nástroje vůči obrobku definovaného z požadavků zákazníka. Obdržené hodnoty výsledných odchylek vypovídají o budoucím chování zvoleného stroje a predikují vybrané vlastnosti obrobení obrobku.

V posledním kroku vývojového diagramu „*rozhodování*“ se určí, zda je stroj vhodný pro zvolenou aplikaci, či nikoli. V druhém případě se celý cyklus opakuje pro jiný typ stroje (již bez vývojových etap, jedná-li se o svislý soustruh). Lze předpokládat, že rozhodovací část ovlivní z velké části zkušenosti realizačního týmu.

Nasazení navržené metodiky do cyklu volby vhodného svislého soustruhu zákazníkovi je závislé od dostupných interních informací a stávajících strojů. Postup při realizaci může následovat dle vývojového diagramu (Obr. 1). Dá se tedy říct, že volba a postup výběru svislého soustruhu zákazníkovi bude hodně záviset na zkušenostech celého realizačního týmu.



Obr. 1 Vývojový diagram pro předběžný návrh volby obráběcího centra dle požadavků zákazníka.



Obr. 2 Vývojový diagram návrhu metodiky měření a měřicí aparatury.

6 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE

Mezi hlavní výsledky práce, kterých bylo v průběhu řešení dosaženo lze počítat navrženou metodiku měření pro svislé soustruhy s cílem predikovat vybrané vlastnosti budoucího výrobku. Např. geometrická tolerance přímosti byla stanovena pro kteroukoliv polohu výsuvu smykadla (osa Z) a pro celý pracovní posuv osy X.

Mezi další výsledky lze zařadit návrh měřící jednotky pro velké rotační desky obráběcích strojů. Ze zpracovaných naměřených hodnot bylo možné stanovit závěry o chování rotační desky při otáčkách v rozsahu 5-200 ot/min a při různém zatížení desky. Zde je nutné zdůraznit, že rozsah zatížení rotační desky závisí na velikosti rotační desky a možnosti implementace měřící jednotky současně se zkušební obrobkem. Testy prokázaly závislosti mezi otáčkami, zatížením a posunutími osy rotace. Dále byl stanoven předpoklad pro modifikaci jednotky, do které budou implementovány teplotní senzory, a tím možnost sledovat další důležitý parametr ovlivňující pracovní chod rotační desky.

Součástí práce je i stanovení negativně ovlivňujících parametrů, které je nutné brát v potaz při samotném měření a zpracování výsledků.

7 ZÁVĚRY A DOPORUČENÍ

V předložené dizertační práci byl představen vývoj nové metodiky měření geometrické přesnosti velkých CNC obráběcích strojů s cílem predikovat vybrané vlastnosti budoucího obrobku.

V kapitole 2 byl představen krátký přehled řešené problematiky v oblasti vědy a techniky. Z provedené analýzy je patrné, že velká část autorů se zabývá popisem chování obráběcích strojů malých rozměrů, a to z pohledu dimenzování a optimalizace vybraných konstrukčních uzlů, predikování dynamického chování a jeho vlivu na obrobek, popisu tepelného ovlivnění nosných struktur, atd. Jen nepatrné množství autorů se věnuje popisu pracovní přesnosti ovlivněné geometrickými chybami obráběcího stroje, přičemž u velkých CNC obráběcích strojů (svislého soustruhu) nebyla nalezena žádná publikace věnovaná řešenému tématu. Z provedených závěrů a požadavků z průmyslu byl dán podnět k návrhu metodiky měření, která popíše „geometrické“ chování svislého soustruhu a z výsledků budou predikovány vybrané vlastnosti obrobku.

Tato metoda měření byla vyvinuta a ověřena na svislém soustruhu SKIQ30, ve firmě TOSHULIN, a.s., který je blíže popsán v kapitole 4 .

V kapitole 5 byl proveden návrh metodiky měření, přičemž první část této kapitoly se věnuje rozboru dané problematiky. Je zde nastíněn přístup výrobce obráběcích strojů ke splnění požadavků zákazníka za použití navrhované metodiky. V kapitole 5.2 byla provedena analýza současné měřící techniky používané pro identifikaci a kompenzaci příslušných chyb nejen na víceosých CNC obráběcích

strojích. V průběhu řešení dizertační práce byly blíže řešeny dva přístupy k popisu chování svislého soustruhu. První přístup byl založen na principu dekompozice celého stroje a sledování přesnosti jednotlivých komponent, popř. konstrukčních celků. Jak bylo v práci uvedeno, tato metoda by byla finančně a časově velmi náročná a proto se od tohoto přístupu opustilo. K druhému řešení se přistupovalo obráceně, sledovat již funkční, plně osazený svislý soustruh s identifikací co možná nejvíce parametrů, popisujících „geometrické“ chování stroje. K vybranému řešení byla provedena v kapitole 5.3.2 rešerše současného stavu vědy a techniky, ze které byly stanoveny další závěry a následné řešení. Svislý soustruh byl rozdělen na dvě funkční části. První část se věnovala lineárním pohybům, tedy pohybům TCP v pracovním prostoru a druhá část byla zaměřena na popis rotační desky svislého soustruhu.

Kapitola 5.3.3 popisuje identifikaci chyb TCP v pracovním prostoru stroje, přičemž bylo využito měřící zařízení Laserinterferometr (Renishaw) a Laser Tracker (API). Při volbě přístupu k měření se již vycházelo z přístrojového vybavení dostupného na FSI, VUT v Brně a ve firmě TOSHULIN. Inovativním přístupem k měření svislých soustruhů bylo nasazení Laser Trackeru, o čemž vypovídá i řešená problematika na konferenci v Budapešti, CIRP2011, prezentovaná v pracovní skupině „Precision Engineering and Metrology“. V této pracovní skupině byly řešeny možnosti využití Trackerů a Tracerů pro sledování chyb na velkých CNC obráběcích strojích. Aplikací Laser Trackeru (API) na menších CNC obráběcích strojích s úkolem mapovat geometrické chyby v pracovním prostoru obráběcího stroje se zabýval diplomant Josef Knobloch. Výsledky z řešení jsou doloženy v příloze 16.8. Na měření svislého soustruhu byla použita strategie z normy VDI/DGQ 3441, která je běžně ve firmě TOSHULIN aplikována. Do strategie snímání dat byly zaneseny faktory „časová náročnost“ a „maximální počet bodů“. Zvolený cyklus měření byl po konzultacích v TOSHULIN shledán jako dostatečný v rámci vývoje metodiky měření a pro následné aplikace v průmyslových úlohách by musely proběhnout další potřebné zkoušky. Surové hodnoty ze systému Laser Trackeru byly zpracovány převážně manuálně a následně zpracovány v jiném softwaru. Opět pro jednoduchou aplikaci při komerčním nasazení by bylo nutné vyvinout software pro komunikaci mezi Spatial Analyzer (Tracker) a softwarem Matlab.

Pro predikování chyb svislého soustruhu od pohybu TCP je věnován zbytek kapitoly 5.3.3. Průběhy naměřených chyb, které jsou v práci zobrazeny, byly dále podrobeny statistické analýze k vyhodnocení chování těchto posuvů. Výsledné hodnoty pro vybrané polohy a posuvy TCP v pracovním prostoru byly zaneseny do výsledného vztahu pro stanovení celkové odchylky nástroje od obrobku.

V následující kapitole 5.3.4 byl sestaven návrh na měření druhé řešené části svislého soustruhu, rotační desky. V prvním bodě byly definovány požadavky na hledané parametry rotačních desek, které vychází z předchozích rešerší. Z pracovních podmínek svislých soustruhů byly společně s odbornými zaměstnanci

fy. TOSHULIN vyspecifikovány provozní podmínky svislého soustruhu pro testování. Sestavené schéma pro zkoušení přesnosti chodu rotační desky odpovídá požadavkům na budoucí obrobek a pro detailnější specifikaci testovacích podmínek je zapotřebí vycházet ze získaných zkušeností následných provedených zkoušek. Pro stanovené podmínky a způsob měření byly odvozeny algoritmy pro definování hledaných chyb rotační desky. Současně probíhala volba vhodné měřicí aparatury a návrh měřicí jednotky určené pro svislé soustruhy z produkce fy. TOSHULIN. Jednotka pro měření rotačních desek svislých soustruhů byla navržena pro vývoj metodiky měření a pro komerční použití by musela být podrobena zkouškám ČIA. Měřicí jednotka byla podrobena testování na frézovacím stroji, na kterém byly prováděny první reálné zkoušky. Následovalo zpracování algoritmů pro identifikaci jednotlivých hledaných parametrů v softwaru Matlab. Z provedených měření a získaných informací o chování rotačních desek byl předložen návrh na modifikaci měřicího zařízení za účelem získání detailnějších informací o jejich chování. Z výsledků byly identifikovány chyby ovlivňující výslednou vzájemnou polohu mezi obrobkem a TCP, přičemž chyba TCP zde nebyla uvažována. Výsledné průběhy vybraných posuvů byly zobrazeny v grafech pro různé zkušební podmínky. V následující kapitole 6.4.5 byla definována celková odchylka vzniklá mezi TCP a rotační deskou. Výsledné chyby byly vyneseny do příslušných grafů. Posledním krokem byla provedena predikce vybraných vlastností budoucího obrobku, který by byl obráběn za testovacích podmínek.

V poslední části kapitoly 5 byla řešena problematika modifikace metodiky měření, která vzešla ze získaných informací a zkušeností v průběhu řešení dizertační práce. Pro modifikaci měřicí jednotky byly představeny konkrétní body, které by měly pozitivní vliv na výslednou přesnost měření, minimalizaci časové náročnosti měření a možnosti podrobněji pospat průběhy chyb vzniklých na rotační desce. Z výsledného řešení je dán základ pro stavbu diagnostického zařízení pro rychlou kontrolu rotačních desek větších rozměrů. Dále se naskytlá myšlenka využít získaných informací o chování rotační desky pro aktivní kompenzaci odchylky mezi TCP a obrobkem.

Řešená problematika dizertační práce zabývající se geometrickou přesností a návrhem měření velkých CNC obráběcích strojů je v současné době velice aktuální téma, se kterým je počítáno, jako s jedním z důležitých bodů organizace CIRP plánovaných na následující roky. Prezentovaný dokument autorem Uriarte [29] na konferenci CIRP 2011, Budapešť v pracovní skupině „machines“ byl zaměřen právě na velké CNC obráběcí stroje (Keynote proposal), přičemž jedním z hlavních plánovaných řešených bodů je popis geometrické přesnosti těchto strojů a jejich kalibrace.

Současně na konferenci CIRP2011 v Budapešti byla založena pracovní skupina „Group of Laser Tracer User in STC-P: Collaboration, Technical exchanges, ...“ [30], do které by se rád autor v následujícím roce 2012 připojil.

8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1]. DU, Zhenchung; ZHANG, Shujie; HONG, Maisheng. Development of a multi-step measuring method for motion accuracy of NC machine tools based on cross grid encoder. *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*. 2010, 50, s. 270-280. ISSN 0890-6955.
- [2]. RAMESH, R; MANNAN, M; POO, A. Error compensation in machine tools : Part I: geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* . 2000, 40, s. 1235-1256. ISSN 0890-6955.
- [3]. OKAFOR, A; ERTEKIN, Yalcin . Derivation of machine tool error models and error compensation procedure for three axes vertical machining center using rigid body kinematics. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2000, 40, s. 1199-1213. ISSN 0890-6955.
- [4]. SRIVASTAVA, A; VELDHUIS, S; ELBESTAWLT, M. Modeling geometric and thermal errors in a five axis cnc machine tool. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 1995, 35, s. 1321-1337. ISSN 0890-6955.
- [5]. LEE, Jae Ha; LIU, Yu; YANG, Seung-Han. Accuracy improvement of miniaturized machine tool: Geometric error modeling and compensation. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2006, 46, s. 1508-1516. ISSN 0890-6955.
- [6]. LEI, W.T; HSU, Y.Y. Accuracy enhancement of five-axis CNC machines through realtime error compensation. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2003, 43, s. 871-877. ISSN 0890-6955.
- [7]. IBARAKI, Soichi, et al. Machining tests to identify kinematic errors on five-axis machine tools. *Precision Engineering*. 2010, 34, s. 387-398. ISSN 0141-6359.
- [8]. UDDIN, M, et al. Prediction and compensation of machining geometric errors of five-axis machining centers with kinematic errors. *Precision Engineering*. 2009, 33, s. 194-201. ISSN 0141-6359.
- [9]. BARAKAT, N.A; ELBESTAWI, M.A; SPENCE, A.D. Kinematic and geometric error compensation of a coordinate measuring machine. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2000, 40, s. 833-850. ISSN 0890-6955.
- [10]. KONG, L.B, et al. A kinematics and experimental analysis of form error compensation in ultra-precision machining. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2008, 48, s. 1408-1419. ISSN 0890-6955.

- [11]. JANÍČEK, Přemysl . *Systémové pojetí vybraných oborů pro techniky hledání souvislostí : Učební texty I.* Brno : CERM Brno, 2007. 682 s. ISBN 978-80-7204-555-6.
- [12]. MEHRABI, M.G, et al. Improving machinig accuracy in precision line boring. *Journal of Intelligent Manufacturing.* 2002, 13, s. 379-389. ISSN 0956-5515.
- [13]. SUH, Suk-Hwan; LEE, Eung-Suk; JUNG, Se-Yong. Error Modelling and Measurement for the Rotary Table of Five-axis Machine Tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 1998, 14, s. 656-663. ISSN 1433-3015.
- [14]. AHN, Kyoung Gee; CHO, Dong Woo. Proposition for a Volumetric Error Model Considering Backlash in Machine Tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 1999, 15, s. 554-561. ISSN 1433-3015.
- [15]. DE AQUINO SILVA, Joao Bosco, et al. Approach for uncertainty analysis and error evaluation of four-axis co-ordinate measuring machines. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 2008, 17, s. 1552. ISSN 0141-6359.
- [16]. YANG, S.H, et al. Error analysis and compensation for the volumetric errors of a vertical machining centre using a hemispherical helix ball bar test. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 2004, 23, s. 495-500. ISSN 1433-3015.
- [17]. RAKSIRI, Chana; PARNICKUN, Manukid. Geometric and force errors compensation in a 3-axis CNC milling machine. *International Journal of Machine Tools & Manufacture.* 2004, 44, s. 1283-1291. ISSN 0890-6955.
- [18]. LEI, W.T; SUNG, M.P. NURBS-based fast geometric error compensation for CNC machine tools. *International Journal of Machine Tools & Manufacture.* 2008, 48, s. 307-319. ISSN 0890-6955.
- [19]. AHN, Kyoung-Gee; MIN, Byung-Kwon; PASEK, Zbigniew J. Modeling and compensation of geometric errors in simultaneous cutting using a multi-spindle machine tool. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 2006, 29, s. 929-939. ISSN 1433-3015.
- [20]. MAREK, Jiří. *Systémový přístup při návrhu nové 3D jednotky.* VUT v Brně, 1996. 128 s. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Zdeněk Kolíbal, Csc.
- [21]. JANÍČEK, P. *Systémové pojetí vybraných oborů pro techniky hledání souvislostí.* Vysoké učení technické v Brně : VUTIUUM, 2007. 1230 s. ISBN 978-80-7204-55-6.
- [22]. BLECHA, Petr. *Využití moderních metod řízení a zabezpečování jakosti při konstrukci obráběcích center.* Brno, 1999. 129 s. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Ivan Vavřík, Csc.

- [23]. JANÍČEK, P; ONDRÁČEK, E. *Řešení problémů modelováním : Téměř nic o téměř všem*. 1. Brno : PC-DIR Real, 1998. 335 s. ISBN 80-214-1233-X.
- [24]. HOSNEDL, S. Systémové navrhování technických produktů KKS/ZKM . In *Podklady k přednáškám*. ZČU Plzeň : Katedra konstruování strojů, 2001.
- [25]. HUBKA, V. *Konstrukční nauka : Obecný model postupu při konstruování* . Hosnedl. 2. přepracované. Zurich : Heurista, 1995. 118 s. ISBN 80-90-1135-0-8.
- [26]. ANAND, Raj B. *Static error modeling in turning operation and its effect on form errors*. Cincinnati, US, 2008. 74 s. Dizertační práce. University of Cincinnati..
- [27]. WECK, Manfred; BRECHER, Christian. *Werkzeugmaschinen 5 : Messtechnische Untersuchung und Beurteilung, dynamische Stabilität*. Vyd. 7. Berlin : Springer-Verlag, 2006. 469 s. ISBN 978-3-540-22505-8.
- [28]. MAYER, Rene; PHAN, Anh-Vu; CLOUTIER, Guy. Prediction of diameter errors in a bar turning: a computationally effective model. *Applied Mathematical Modelling* [online]. 2000, 24, [cit. 2011-07-27]. Dostupný z WWW: <<http://www.sciencedirect.com/>>.
- [29]. URIARTE, L, et al. Machine Tools for Large Parts : On the concepts, design and construction of special purpose machine tools to support processing of large components. *61st CIRP General Assembly* [online]. 2011, 61, [cit. 2011-10-24]. Dostupný z WWW: <http://www.cirp.net/images/cirpfichiers/privatefiles/STC/STCM/2011/Aug11/stc_m_annex05_aug.11.pdf>.
- [30]. LINARES, J.M. Group of Laser Tracer Using in STC-P : Collaboration, Technica exchanges, *61st CIRP General Assembly* [online]. 2011, 61, [cit. 2011-10-24]. Dostupný z WWW: <http://www.cirp.net/images/cirpfichiers/privatefiles/STC/STCP/2011/Aug11/stc_p_annex_5.9_aug.11.pdf>.

9 VLASTNÍ PUBLIKACE

- [1]. HOLUB, M; SÝKORA, J. Experimental model for measurement of linear axes of machine tools. In KATALINIC, Branko. *21st International DAAAM Symposium : článek ve sborníku akce: The 21st DAAAM World Symposium 2010*. Vienna, Austria : DAAAM International Vienna, 2010. s. 923-925. ISBN 978-3-901509-73-5.
- [2]. MICHALÍČEK, M; HOLUB, M. Compensation of Geometric Accuracy and Working Uncertainty of Vertical lathes. In *Recent advances in Mechatronics 2008 - 2009 : článek ve sborníku akce: Mechatronics 2009*. Berlin : Springer-Verlag, 2009. s. 383-388. ISBN 978-3-642-05021-3.

- [3]. HOLUB, M; MICHALÍČEK, M. Metodické stanovení parametrů ovlivňující výrobní přesnost obráběcích strojů. In 2nd Ph.D. Students Workshop. VUT v Brně : ÚVSSR, 2008. s. 3.
- [4]. HOLUB, Michal. Analýza geometrické přesnosti a přesnosti polohování karuselu. In 3rd Ph.D. Students Workshop. VUT v Brně : UVSSR, 2009. s. 5.
- [5]. HOLUB, Michal, et al. Identification of geometric errors of rotatory axes in machine tools. In JABLONSKI, Ryszard; BŘEZINA, Tomas. *Mechatronics : Recent technological and scientific advances*. Berlin : Springer-Verlag, 2011. s. 213-217. ISBN 978-3-642-23243-5.
- [6]. OPL, Miroslav, et al. DELTA - Robot with parallel kinematics. In JABLONSKI, Ryszard; BŘEZINA, Tomas. *Mechatronics : Recent technological and scientific advances*. Berlin : Springer-Verlag, 2011. s. 445-452. ISBN 978-3-642-23243-5.
- [7]. HOLUB, Michal, et al. DELTA - Robot with parallel kinematics. In KOLÍBAL, Zdeněk. *MM Science Journal : 20th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD)*. Brno : MM publishing, 2011. s. 186-189. ISSN 1803-1269.

10 TVŮRČÍ AKTIVITY A PROJEKTY

- [1]. VAVŘÍK, I.; HOLUB, M.; BLECHA, P.; BRADÁČ, F.; KARPÍŠEK, Z.: Technologie zpracování dat CMM; *Vývoj metodiky a etalonů na zkoušení přesnosti souřadnicových měřicích strojů s optickým snímacím systémem a optických souřadnicových měřicích strojů. Projekt číslo 4.2 PT 01/ 013*. ÚVSSR. (ověřená technologie).
- [2]. HOLUB, M.; BRADÁČ, F.; OPL, M.; PAVLÍK, J.: GeomM; *Sběr a zpracování dat z měření geometrických odchylek*. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Technická 2, 61669 BRNO. (software).
- [3]. HOLUB, M.; PAVLÍK, J.; OPL, M.; BRADÁČ, F.: GeomRot; *Zařízení pro měření geometrických chyb rotačních stolů*. VUT v Brně, FSI, Technická 2, 61669, Brno, Místnost A1/ 1224. (funkční vzorek) http://www.uvssr.fme.vutbr.cz/?page_id=1022.
- [4]. BRADÁČ, F.; HOLUB, M.; PAVLÍK, J.; OPL, M.; NOVOTNÝ, T.; TŮMA, Z.: DeltaRobot; *Manipulátor na bázi paralelní kinematiky - delta robot s třemi osami*. VUT FSI, Technická 2, B1/ 305. (funkční vzorek). http://www.uvssr.fme.vutbr.cz/?page_id=991.
- [5]. Návrh modulárního experimentálního standu pro analýzu přesnosti polohování posuvových os výrobních strojů, zahájení: 01.01.2010, ukončení: 31. 12. 2010. *Projekt číslo FSI-J-10-39*.

- [6]. Návrh experimentálního standu pro analýzu energetické náročnosti posuvových os výrobních strojů, zahájení: 01. 01. 2011, ukončení: 31. 12. 2011. *Projekt číslo FSI-J-11-16.*
- [7]. Měření obráběcích strojů. Zprávy neveřejné (02/13350/13, 04/13350/11, 02/13350/11, 05/13350/11, 03/13350/11, 8/13350/10, 16/13350/10).

11 ŽIVOTOPIS

Osobní informace

Jméno / Příjmení	Ing., Michal Holub
Adresa	Čejkovická 13, 628 00, Brno
Telefon	+420 725 506 119
E-mail	holub@fme.vutbr.cz
Státní příslušnost	Česká Republika
Datum narození	31. 7. 1982

Vzdělání a odborná příprava

Období	1. 3. 2009 - 30. 6. 2009
Název a typ organizace	Technische Universität Graz, Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften, Institut für Fertigungstechnik, Kopernikusgasse 24, A-8010 Graz, Österreich
Úroveň vzdělání	Studijně – pracovní stáž, přesnost obráběcích strojů
Období	2007 - doposud
Název a typ organizace	Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně, obor Stavba výrobních strojů a zařízení
Úroveň vzdělání	Doktorské studium
Období	2001 - 2007
Název a typ organizace	Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Obor Stavba výrobních strojů a zařízení, Technická 2896/2, 616 69 Brno, Česká Republika.

Úroveň vzdělání Diplomová práce: Entwicklung einer Technologie und einer Anlage zum kontinuierlichen Abtragschleifen von Draht

Období 2005 - 2007

Název a typ organizace Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau, Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse, Professur für Werkzeugmaschinenkonstruktion und Umformtechnik, Reichenhainer Straße 70, D-09126 Chemnitz, Germany

Úroveň vzdělání Diplomová práce: Entwicklung einer Technologie und einer Anlage zum kontinuierlichen Abtragschleifen von Draht

Pracovní zkušenosti

Období 31. 08. 2011 - doposud

Vykonávaná funkce Asistent

Název zaměstnavatele Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně, ÚVSSR-odbor výrobních strojů, Technická 2896/2, Královo Pole, 61600, Brno, Česká republika

Pracovní poměr Práce na plný úvazek

Období 15. 12. 2007 – 31. 08. 2011 (doposud)

Vykonávaná funkce Živnostenský list – Příprava a vypracování technických návrhů

Název zaměstnavatele -

Pracovní poměr Hlavní pracovní činnost (vedlejší pracovní činnost)

Období 1. 6. 2006 – 30. 5. 2007

Vykonávaná funkce Konstrukce - řešení diplomové práce

Název zaměstnavatele KIESELSTEIN GmbH, Erzbergerstraße 3, 09116 Chemnitz, Německo

Pracovní poměr Praxe

12 ABSTRAKT

Předmětem zkoumání této dizertační práce je vliv geometrické přesnosti velkých CNC obráběcích strojů na požadované vlastnosti obrobků. V globalizovaném tržním prostředí a udržení konkurenceschopnosti postupně změnili výrobci obráběcích strojů strategii pro dodávky „zboží“ zákazníkům. Nejedná se pouze o dodání výrobního stroje jako konstrukčního celku, ale se strojem jsou dodávány i předepsané technologie pro zpracování (obrábění). Při přejímce výrobního stroje vidí zákazník nový obráběcí stroj, který obrobí jím specifikovaný obrobek s požadovanou přesností.

V předložené dizertační práci je představen vývoj nové metodiky měření svislých soustruhů pro predikování vybraných geometrických vlastností obrobků. Cílem práce bylo zjistit vliv geometrické přesnosti vybraných konstrukčních částí svislého soustruhu na budoucí geometrickou přesnost obrobku. Jako testovaný stroj byl zvolen svislý soustruh SKIQ30 z produkce firmy TOSHULIN, a.s., na kterém byla navržená metodika měření zpracována a ověřena. Pro identifikaci vybraných parametrů svislého soustruhu byla nasazena měřicí aparatura využívající nejnovější technologie z oblasti metrologie. Základním nástrojem pro zpracování výsledků byly statistické metody pro predikování chování měřených konstrukčních celků stroje. Podkladem ke statistickému zpracování byly výpočty geometrických odchylek získané z algoritmů pro navrženou metodiku měření.

Navržená metodika měření pro svislé soustruhy byla rozdělena do dvou částí. V první části byla řešena metodika měření a vyhodnocení lineárních os, přičemž bylo využito měřicího zařízení Laser Trackeru. Zde bylo zjištěno, že princip měření pomocí Laser Trackeru je ideální pro navrženou metodiku měření. Z hlediska přesnosti přístroje byly v práci učiněny příslušné závěry. Druhá část navržené metodiky měření bylo sledování a popsání chování rotační desky, kde jako hlavními měřicími přístroji byly zvoleny bezkontaktní snímače vzdálenosti.

V průběhu řešení dizertační práce bylo zjištěno, že sledované (geometrické) chování stroje je z velké části ovlivněno podmínkami pro obrábění. Mezi tyto podmínky, které byly sledovány, patří zatížení rotační desky hmotností obrobku, otáčky rotační desky a doba chodu stroje. Na základě těchto poznatků lze konstatovat, že pro predikování vlastností obrobků je nezbytné znát chování stroje, které odpovídá celému rozsahu pracovních otáček a zatížení rotační desky.

Část navržené metodiky měření svislých soustruhů se jeví, jako velice vhodná pro vytvoření diagnostického systému aplikovatelného na velké rotační desky. Dále je uvažováno zabývat se rozšířením dizertační práce (navržené metodiky měření) za účelem návrhu jednotky pro kompenzaci chyb vzniklých na rotačních deskách svislých soustruhů.

ABSTRACT

The main subject of this doctoral thesis is the influence of the geometrical accuracy of large CNC machine tools on desired features of produced work pieces. Due to globalized market environment and competition producers of machine tools have changed their strategy for delivery of their products to customers. The main issue is not only to deliver a machine tool as such; supporting instructions related to the technology of the cutting process on the machine tool are of great importance. When taking delivery, the customer can see a new machine tool that will produce by him specified work piece with a desired accuracy.

In the proposed thesis, a development of a novel methodology of measuring vertical lathes for prediction of chosen geometrical parameters of work pieces is introduced. The main goal of this work has been to determine the influence of the geometrical accuracy of selected design groups of a vertical lath on the future geometric accuracy of the work piece. The proposed methodology has been developed and verified on a selected vertical lath SKIQ30 produced by TOSHULIN, a.s. For identification of chosen parameters of the vertical lath a measuring system using latest measuring technologies has been applied. The basic tool for measured data processing has been a set of statistic methods for prediction of behaviour of measured design groups of the machine. The foundation for statistical processing has been calculation of geometrical deviations obtained from algorithms designed for proposed measurement methodology.

The proposed measurement methodology for vertical lathes has been divided into two parts. In the first part, the methodology of measurement and evaluation of linear axes is solved, where a measuring system Laser Track has been used. The employment of the system Laser Track turned out to be very suitable. Conclusions related to the accuracy of the measuring device have been drawn in the thesis. The second part of the proposed methodology is represented by observation and description of the rotating disk, where non-contact position transducers have been used.

In the course of the doctoral dissertation it has been observed that the studied (with respect to the geometry) behaviour of the machine is significantly affected by the cutting conditions. To these belong the loading of the rotating disc by the mass of the work piece, angular velocity of the rotating disc and the operating time of the machine. Based on these observations it can be stated that for prediction of work piece features it is essential to know the behaviour of the machine tool in the whole range of the operating speeds and loading of the rotating disc.

A part of the proposed methodology for measuring vertical lathes seems to be very suitable for a design of a diagnostic system that could be applied on large rotating disc. Furthermore, it is recommended to extend the doctoral thesis in order to develop a unit for compensation of geometrical errors on rotating discs of vertical lathes.