

# OPONENTNÍ POSUDEK DIPLOMOVÉ PRÁCE

Autor: Adolf Valášek  
Název: Analýza vlivu dílčích chyb nosných dílců na celkovou dosažitelnou přesnost  
ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení  
Studijní obor: Výrobní stroje a zařízení  
Termín odevzdání diplomové práce: 20.07.2021  
Oponent: Ing. Otakar Šámal, Zkušebna VUOS, s.r.o.

Předložená diplomová práce je dosti rozsáhlá, obsahuje celkem 5 kapitol dále rozdělených na podkapitoly s celkovým rozsahem 104 stran s 85 obrázky a 19 tabulkami. V souladu se zadáním diplomové práce je zde nejprve provedena rešerše dané problematiky, dále postupy a výsledky praktických měření a výpočetní analýzy.

Úvodní část práce věnovaná rešerši dané problematiky nejprve shrnuje nejdůležitější faktory, které ovlivňují chyby koncové polohy a natočení nástroje vůči obrobku. Touto problematikou se práce dále zabývá prostřednictvím modelu tříosého frézovacího stroje s uspořádáním rámu typu „C“. Výsledný popis chyb je zde prováděn na schématu 21 „standardních geometrických chyb“. 3 z těchto chyb jsou však chybami nastavení polohy v souřadných osách, nejde tedy o chyby geometrické, do výčtu chyb stroje, se kterými je nutno při kompenzacích chyb stroje pracovat, však nepochybně patří. Pro zjednodušení je uvažován stroj v nezátíženém, teplotně ustáleném stavu.

Druhá, značně obsáhlá část práce se zaměřuje na problematiku geometrických chyb výrobních strojů (samozřejmě také na chyby nastavení polohy v osách, které však mohou vznikat i v důsledku jiných chyb geometrických).

V kap. 2.1.1 „Vlastnosti geometrických chyb“ (strana 15) se píše, že „chyba vzájemné kolmosti dvou os je v celém pracovním prostoru stroje konstantní“. To však není pravda. V praxi je nejprve nutné softwarově zkorigovat chyby přímocharostí lineárních os, teprve po této korekci je možné měřit a softwarově korigovat úchytky kolmosti. Větší geometrické chyby je nutné nejprve seřídit přiměřenými způsoby mechanicky, teprve pak se zbývající chyby korigují softwarově. Geometrické chyby nelze korigovat beze zbytku, záleží na počtu korekčních bodů. V praxi mívají tyto body na obráběcích strojích rozteč 20 až 300 mm, nižší hodnoty roztečí pak bývají u měřicích strojů. Zbytkové chyby přímocharosti pohybu mezi měřeními (korigovanými) body již nelze korigovat a na stroji zůstávají.

Konkrétní příklady zmíněných chyb jsou vysvětleny na příkladu modelu s jednou lineární osou, kde je vyhodnocováno celkem 6 chyb, 1 chyba se týká polohování osy, 2 chyby se týkají „přímosti“ pohybu. Podle ISO 230-1, „Geometrická přesnost obráběcích strojů...“, se však jedná o „přímocharost“ pohybu osy, „přímostí“ je dle této normy nazývána např. přímost vodicích ploch. Přesnost polohování popisuje norma ISO 230-2. Zbývající chyby se týkají rotací okolo vlastní osy pohybu a okolo příčné a svislé osy, u víceosých systémů jsou pak měřeny i vzájemné kolmosti pohybů lineárních os.

V kap. 2.1.1 „Vlastnosti geometrických chyb“ (strana 15) se píše, že „chyba vzájemné kolmosti dvou os je v celém pracovním prostoru stroje konstantní“. To však není pravda. V praxi je zpravidla nejprve nutné softwarově zkorigovat chyby přímocharostí obou os ve společné rovině, teprve po korekci obou přímocharostí je vyhodnocována a softwarově korigována úchytky kolmosti pohybů obou os. Větší chyby přímocharostí i kolmostí je nutné zejména na větších strojích nejprve seřídit mechanicky, teprve chyby, které již nelze přiměřenými metodami seřídit, se korigují softwarově. Přímocharost pohybu osy nelze korigovat beze zbytku. Záleží na počtu měřených korekčních bodů. V praxi mívají na obráběcích strojích měřené body rozteč 20 až 300 mm, nižší hodnoty roztečí bývají u měřicích strojů. Zbytkové chyby přímocharosti pohybu mezi měřeními (korigovanými) body již nelze korigovat a na stroji zůstávají.

Dále kap. 2 zmiňuje historii zkoušení přesnosti obráběcích strojů a zmiňuje i současné normy, které popisují postupy těchto zkoušek, případně i požadavky na jednotlivé měřené parametry. Ve stručnosti jsou zde popsány nejdůležitější normy řady ISO 230 (geometrická přesnost ISO 230-1, přesnost nastavení polohy ISO 230-2, přesnost kruhové interpolace ISO 230-4 a přesnost diagonálního přestavení ISO 230-6). Dále kap. 2 popisuje měřicí techniku, která je při měření chyb přesnosti využívána.

V úvodu podkapitoly 2.2.2 „Přímé měření“ (strana 19) se píše, že „v dnešní době se pro měření geometrických chyb používají především metody využívající laserový paprsek“, v dalším textu je pak zmínka o tom že elektronické vodováhy jsou nezbytné pouze při měření klopení vodorovných os (natáčení kolem vlastní osy). Každý stroj s vyššími nároky na přesnost je nutné v určitých intervalech mechanicky seřizovat a poté změřit a aplikovat nové softwarové korekce. Při tomto mechanickém seřizování je však širší použití elektronických vodováh v řadě případů nezbytností. Přímocíhlost pohybu lineárních os lze sice měřit i laserovým interferometrem, výsledkem vlastního měření je však zpravidla přímocíhlost pohybu jednoho bodu pohyblivé části stroje, na kterém je ve chvíli měření upevněna optika laseru. V některých případech, kdy je dráha pohybu měřené části stroje mnohem větší než délka stykové plochy pohybující se částí stroje, bývají výsledky takového měření v pořádku. Např. v případě portálových strojů s pevným portálem a s pohyblivým stolem, jehož dráha pohybu se přibližně rovná délce upinací plochy stolu, je však výsledek takového měření pro seřizování stroje zpravidla nepoužitelný. Demontáž pohyblivého stolu a seřizování přímocíhlosti vodicích ploch na základě měření na vodicích plochách nepřináší zpravidla dobré výsledky, protože po montáži mnohatunového stolu zpět na stroj dojde vždy k většímu či menšímu porušení původního seřizení. Mnohem lepších výsledků je dosahováno nepřímým měření (zpravidla právě pomocí elektronických vodováh) na kompletně smontovaném a funkčním stroji, třeba i se zatížením nejhmotnějším obrobkem.

Dále kap. 2. popisuje různé postupy měření chyb přesnosti stroje. Text je vždy doplněn řadou názorných obrázků a tabulek. Kapitola 2.2.3 „Nepřímé měření“ popisuje např. nepřímé měření vyhodnocující chyby kolmosti z měření kruhové interpolace. Vzhledem k omezené velikosti kružnice opisované při tomto měření je tato metoda vhodná jen pro menší stroje. Dále jsou zde zmíněny speciální zkušební obrobky, speciální měřicí 1D až 3D artefakty a dále měření pracovního prostoru stroje pomocí interferometru ve směru souřadných os a v diagonálách pracovního prostoru stroje.

Kap. 2.3 „Volumetrická chyba a její měření“ pojednává o způsobech přímého měření volumetrické chyby pomocí měřidel laser tracker nebo laser tracer, které pracují na principu, kdy paprsek laseru vykonává sférický pohyb, kterým sleduje kulový odrazeč upnutý ve vřetení stroje, přitom laserinterferometricky měří vzdálenost a vyhodnocuje prostorovou polohu vřeteně. Přestavení traceru do tří různých poloh sice sníží celkovou nejistotu měření, výsledek měření však, zejména u větších strojů, nebývá dobrý. Ve své praxi jsme se při seřizování větších přesných strojů s tímto zařízením několikrát setkali a došli jsme k závěru, že je vhodné pro hrubé ustavení stroje, nikoli pro ustavení, které by splňovalo nároky na vyšší přesnost. Při kontrole naší práce, kdy jsme např. provedli mechanické seřizení portálové frézky a poté jsme zavedli kompletní softwarové korekce, použil zákazník ke kontrole přímocíhlosti pohybu vřeteníku po příčnicku ve svislé rovině právě laser tracer. Výsledky měření tímto měřidlem ze dvou umístění byly natolik rozdílné (střed příčnicku prohnut nahoru – střed příčnicku prohnut dolů), že zákazník sám uznal jeho nedostatky. Podle našich zkušeností je nejspolehlivějším měřidlem pro podobný případ elektronická vodováha upevněná přímo na vřetení a diferenční vodováha upevněná na blízké pevné části stroje). Vyhodnocení změn sklonu vodováhy po vyhodnocení odpovídaly námi naměřeným parametrům měřeným jednopaprskovým laserinterferometrem. Navíc pořizovací ceny tracerů/trackerů jsou mnohem vyšší než ceny běžných laserinterferometru. Diplomová práce přitom zmiňuje použití hned 4 laser tracerů sledujících jeden odrazeč.

Kap. 2.4 se zabývá způsobem modelování volumetrických chyb, kde popisuje využití homogenní transformační matice, která dobře a jednoduše popisuje kinematiku daného stroje. Vlastní modelování začíná sestavením kinematického řetězce stroje a následně sestavením transformačních vztahů popisujících dosažení pracovního bodu v pracovním prostoru stroje. Práce dále popisuje další způsoby modelování volumetrické chyby.

Kap. 2.5 popisuje volumetrické chyby přenesené a vznikající při montáži lineární osy. Píše se zde např., dle praxe nezpochybnitelný fakt, že přímost kolejnice lineárního vedení nezajišťuje kolejnice samotná ale tuhost, přesnost a kvalita opracování stykových ploch součásti stroje, na níž je kolejnice upevněna. Z praxe mohu doplnit, že volně upevněné kolejnice lineárního vedení bez dostatečné fixace v příčném směru nemohou být nikdy rovné. K tomu, aby byly co nejrovnější je potřeba opřít je o tuhou přesně opracovanou boční plochu (osazení), proti které je kolejnice na protilehlé straně fixována buď pomocí podélných klínů přitažených do klínové drážky šrouby, nebo, v případě že kolejnice je upevněna na hraně nosného dílu stroje, pomocí masivních šroubovaných příložek. Přínos k tuhosti stroje při upevnění kolejnic popsáním způsobem, je oproti volně upevněným kolejnicím obrovský, nehledě na nestabilní parametry přímosti volně upevněné kolejnice. Každé vedení tvoří vždy nejméně 2 kolejnice, výrobci přesných a tuhých strojů takto fixují i obě kolejnice jednoho vedení. Další přínos k tuhosti je pak i v tomto případě velmi dobře měřitelný.

Kap. 2.6 se zabývá průměrováním chyb lineárních valivých vedení. Kapitola nejprve popisuje studii přenosu chyb přímosti kolejnic vedení na výslednou přímost pojezdu s 1 až 4 vozíky. Závěr je logický, čím více vozíků na pojezdu, tím lepší přímocí pohybu pojezdu. O něco zajímavější je druhá studie, kterou práce uvádí, kde jde vždy o pojezd na dvou lineárních kolejnicích a chyby přímosti jednotlivých kolejnic ve svislém nebo příčném směru jsou předem definovány. V závěru studie je konstatováno, že poloha bodu měření na vozících má vliv na výsledek testu, což není podle mé praxe žádným překvapením.

Kap. 2.7 se zabývá vlivem statického zatížení stolu na geometrické chyby.

Kap. 3, zřejmě stěžejní a také nejobsáhlejší kapitola, se zabývá matematickým modelováním geometrických chyb a jejich přepočtem na chybu volumetrickou. Vytvoření matematického modelu popisujícího předpoklady volumetrických a geometrických vlastností finálního stroje pouze na základě předepsaných výrobních tolerancí nosných dílců má být předpokladem pro předpověď volumetrické přesnosti stroje už ve fázi konstrukce a říct, na kterých předepsaných tolerancích má smysl se dožadovat zvýšené přesnosti. Tento matematický model bude dotčen pouze nepřesnostmi způsobenými zejména uvažováním absolutně tuhých těles nosných dílců.

Jako dílčí téma diplomové práce to беру, ale u špičkového výrobce obráběcích strojů je důležitější zkušený konstruktér, který má již výrobní tolerance a tuhá konstrukční řešení tzv. v malíku a zabývá se spíše zlepšováním technických parametrů nového stroje.

Jestliže výše uvedený matematický model pracuje s předpokladem, že nosné dílce stroje budou absolutně tuhé, pak tento předpoklad je v praxi prakticky nedosažitelný. Z mnohaletých zkušeností s měřením a rozbory tuhosti různých strojů a také ze studia konstrukce strojů právě s pohledu dosažení vysoké tuhosti vím, že řada výrobců vyráběla již třeba před 60 lety obráběcí stroje, které měly vysokou tuhost i vysokou přesnost bez toho, že by se zabývala matematickým modelováním. Jednu takto strou velmi přesnou vyvrtávačku, klíčový stroj ve výrobě vřeteníků předního výrobce brusek, již více než 10 let pomáhám udržovat v požadované vysoké přesnosti. Na některých starších (i více než 40 let), zpravidla velmi přesných a tuhých strojích osvědčených výrobců, není třeba z pohledu uživatele stroje nic měnit. Naproti tomu se velmi často setkávám s potřebou rekonstrukce strojů ne starších 15 let, jejichž konstrukce už na první pohled vzbuzuje obavy, zda stroj bude svými parametry plnit očekávání. Předpokladem vysoké tuhosti nejsou jen nosné části stroje s patřičným žebrováním a výztuhami, ale také velikost stykových ploch ve spojích těchto částí a způsob jejich spojení. V tomto směru vidím u některých současně vyráběných strojů velké rezervy.

Kap. 3.1 se zabývá modely přenosu chyb z podkladových ploch, na nichž jsou kolejnice upevňovány, na výslednou přímou, resp. přímočarost pohybu v dané ose. Model uvažuje uspořádání se dvěma kolejnicemi a čtyřmi vozíky. Vozíky jsou pak v modelu nahrazeny lineárními pružinami s tuhostí ekvivalentní použitému vozíku v daném směru. Do modelu jsou pak zavedeny svislá a boční zatěžující síla, které způsobí vychýlení vozíků. Pro zjednodušení je postup rozdělen na dva výpočty, které jsou ve výsledku superponovány. Dalším postupem se získají 3 lineární rovnice, protože jsou v systému 4 neznámé, je vytvořena ještě čtvrtá rovnice, která umožní výpočet. Vždy se zde pracuje s předpokladem absolutní tuhosti těles. Vizualně je vzniklý model účinků působení vertikální sály zobrazen na obr. 3.8 na straně 44. druhý obdobný výpočet je proveden i pro horizontální směr zatížení.

Kap. 3.2 se zabývá generováním náhodných chybových profilů podkladových kolejnic, které vznikají interpolováním směsi náhodných bodů podél kolejnice. Dále jsou do modelu přenosu chyb zavedeny náhodné chybové profily. Kapitola je doplněna obrázky výstupních vertikálních a horizontálních přímostí, které obsahují i původní přímosti jednotlivých kolejnic a dále obrázky výstupní rotační geometrické chyby (str. 55 a 56).

Kap. 3.3 se zabývá modelováním volumetrických vlastností stroje jako celku. Nejprve jsou popisována vstupní data modelu tříosého stroje. Na obr. 3.26 na str. 58 je znázorněno značení a umístění 21 geometrických chyb na stroji s „C“ rámem a křížovým stolem. Jde o ekvivalent stroje Kovosvit MAS MCV 754 Quick (viz obr. 3.27), kinematický diagram stroje je na obr. 3.28, vše na str. 59. Na obr. 3.29 na str. 60 je pak kompletní kinematické schéma tohoto stroje. Pro celý systém stroje jsou sestaveny transformační vztahy a pro všech 21 geometrických chyb jsou sestaveny transformační matice a dále jsou provedeny výpočty volumetrické chyby.

Kap. 3.3.5 pojednává o speciálně upraveném modelu sestaveném z naměřených dat skutečného stroje MCV 754 Quick. Jednalo se o sadu měřených volumetrických chyb celého prostoru stroje s krokem 50 mm ve všech osách a o kompletní sadu 21 geometrických chyb. Geometrické chyby stroje ale nebyly měřeny přímo – byly vypočteny aplikací Trac-cal od firmy Etalon products z naměřených volumetrických chyb. Při zavedení aplikací vypočtených geometrických chyb do modelu ale vypočtená volumetrická chyba a její průběhy s měřenou vůbec nesouhlasí (viz obr. 3.30). Po četných pokusech bylo zjištěno, že aplikace Trac-cal při výpočtu geometrických chyb z volumetrické chyby vůbec neuvažuje složení kinematické struktury stroje a jeho rozměry, což je určitě dosti podstatný nedostatek této, jistě ne levné aplikace.

Kap. 3.4 pojednává o generování chybově náhodných strojů složených z náhodně vyrobených nosných dílců s předepsanou tolerancí, Díky tomu bude možné sledovat, jak se jednotlivé dílčí chyby projevují v celkové chybě volumetrické a jak ovlivňují celkovou přesnost stroje.

Kap. 3.5 Pojednává o statistických vlastnostech modelů. U modelu simulace kompletní osy a modelu chybově náhodného stroje lze tak zkoumat jejich výstupy při velkém počtu vzorků výstupních dat. Vzniká tak statisticky významný vzorek dat, ze kterého lze vyhodnotit řadu statistických parametrů. Z jednotlivých statistických hodnot pak lze předvídat chování simulačního modelu chybově náhodného stroje. Na modelovaném stroji MCV 754 Quick s tolerancemi stykových ploch a dalšími vstupními parametry (Tab. 3.3 na str. 76) lze sledovat jeho maximální volumetrickou chybu z dlouhodobého výrobního hlediska a předvídat tím jeho přesnost. Zde je třeba si uvědomit, že geometrické (toleranční) chyby stykových ploch nejsou nejdůležitějším faktorem způsobujícím nepřesnosti stroje, mnohem větší vliv na přesnost má nedostatečné dimenzování a nedokonalé spojení zejména nepohyblivých stykových ploch stroje (způsobuje např. deformace, proměnlivé podle polohy hmotných částí stroje). S tímto konstrukčním nedostatkem se setkáváme dosti často. Např. ustavení stroje na základě je pak nutné mnohem častěji opravovat, protože ustavovací prvky (klínové podložky – „bačkory“), se do slabě dimenzovaných základových profilů stroje doslova „boří“.

Kap. 4 pojednává o analýze vlivu dílčích chyb nosných dílců na dosažitelnou přesnost. Postupy uplatňované v kap. 4 vycházejí z poznatků získaných z modelových analýz popsanych v kap. 4 přenesené do reálnější podoby pojezdu osy se dvěma kolejnicemi a celkem čtyřmi vozíky, inspirované konstrukcí stroje MCV 754 Quick. Jedná se např. o vliv změny rozměrů uspořádání pohybové osy na procento zlepšení přímosti, resp. přímočarosti pohybu. Jako hlavní rozměry jsou zde uvažovány rozteč kolejnic „a“, rozteč vozíků na kolejnici „b“ a zdvih osy. Zvětšení rozteče vozíků na kolejnici „b“ má efekt potlačení významu geometrických chyb přímosti podkladových ploch, naopak zmenšení rozteče kolejnic „a“ zvětší efekt klonění, tedy natáčení osy kolem osy pohybu. Zvětšení délky zdvihu osy má pochopitelně vliv na zhoršení přímočarosti pohybu osy. Dále kapitola pojednává o vlivu dílčích, zde vertikálních a horizontálních, chyb přímosti podkladových ploch na celkovou volumetrickou chybu stroje v jednotlivých pohybových osách.

V závěru kapitoly 4 je mj. konstatováno, že určující vliv na celkovou přesnost stroje mají většinou právě tyto tolerance vertikálních, tedy normálových podkladových ploch, na horizontálních (bočních) tolerancích přímosti tolik nezáleží. S touto znalostí lze provést např. optimalizace předepsaných tolerancí, kdy se tolerance s menším vlivem (tedy zřejmě horizontální) uvolní a tolerance s vyšším vlivem (vertikální) naopak o něco zpřesní. Zpřesnění vlivnějších tolerancí bude mít sice za následek o něco dražší výrobu příslušných nosných dílců, ale naopak uvolnění méně vlivných tolerancí přinese kompenzující úspory. Ve výsledku se mohou volumetrické vlastnosti takto optimalizovaného stroje dokonce zlepšit, což ukazuje právě Tab. 4.13, kde byla provedena simulace stroje při uplatnění výše popsanych poznatků.

Závěrečná kapitola (5) diplomové práce stručně rekapituluje teoretické i praktické poznatky, které byly v průběhu řešení získány.

K předložené práci mám následující připomínky:

Str. 13 odstavec 2: „Výsledný popis chyb bude proveden schématem 21 standardních geometrických chyb pro tříosý frézovací stroj“

Mezi 21 měřených chyb tříosého stroje patří 3 chyby přesnosti polohování, které není možno klasifikovat jako chyby geometrické, chyby polohování však mohou vznikat i v důsledku jiných chyb geometrických. Chyby geometrické přesnosti popisuje norma ISO 230-1, chyby polohování pak norma 230-2.

Str. 15 kap. 2.1.1 hned v první větě se píše, že „chyba vzájemné kolmosti dvou os je v celém pracovním prostoru stroje konstantní“.

To však není pravda. V praxi je nejprve nutné softwarově zkorigovat chyby přímočarostí lineárních os, teprve po této korekci je možné měřit a softwarově korigovat úchytky kolmosti, vždy však zůstávají větší nebo menší již nezkorigovatelné zbytky chyb přímočarostí, jejichž velikost je závislá na hustotě korekčních bodů v dané ose.

Kap. 2.1.1, řádek 4: „Například přímost osy X ve směru Y...“ podle ISO 230-1 nazýváme „přímostí“ např. „přímost“ povrchu vodící plochy osy X ve směru osy X, zde můžeme případně vyhodnotit i rovinnost vodící plochy. V citovaném případě však zjevně jde o „přímočarost pohybu“ osy X v rovině XY, může být též měřena „přímočarost pohybu“ osy X v rovině ZX, což je rovina kolmá na rovinu XY. Záměna výrazu „přímočarost“ (pohybu) za „přímost“ se v textu vícekrát opakuje.

Kromě výše uvedených částečně formálních chyb, nemám k předložené práci žádné připomínky.

### **Celkové hodnocení – závěr**

Z předložené diplomové práce je patrné, že jejímu vypracování byla věnována náležitá pozornost. Rozsah práce sice překračuje co do počtu stran navrhované limity, jednotlivé kapitoly však na sebe plynule navazují a byla by škoda něco vynechat nebo zestručnit. Autor v plné šíři splnil požadavky zadání, prokázal velmi dobrý přehled a znalosti v dané problematice a prokázal i velmi dobré schopnosti získat potřebné informace pro danou problematiku.

Grafická stránka práce a předložená výkresová dokumentace je na velmi dobré úrovni, text práce je uspořádán přehledně a srozumitelně. V práci jsem neshledal prakticky žádné vážnější nedostatky, hodnocení některých postupů měření, resp. měřidel, se trochu rozchází s mými praktickými zkušenostmi, což jsem na příslušných místech okomentoval. To však s kvalitou předložené práce nesouvisí. Uvedené připomínky se ve dvou případech týkají jen názvosloví, ve třetím případě mají spíše charakter upřesnění.

Na základě výše uvedeného hodnotím předloženou diplomovou práci kvalifikačním stupněm

**výborně**

Ing. Otakar Šámal  
Zkušebna VUOS, s.r.o.

V Praze dne 18.8.2021