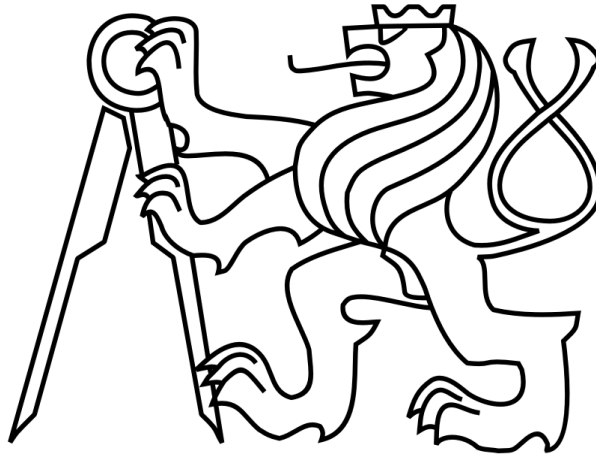


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Diplomová práce

**Analýza vlivu dílčích chyb nosných dílců na celkovou dosažitelnou
přesnost**

2021

Bc. Adolf Valášek

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Valášek** Jméno: **Adolf** Osobní číslo: **465532**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav výrobních strojů a zařízení**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní stroje a zařízení**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Analýza vlivu dílčích chyb nosných dílců na celkovou dosažitelnou přesnost.

Název diplomové práce anglicky:

Influence of partial errors of machine tool parts on the overall achievable accuracy.

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je provést výpočtovou analýzu vlivu dílčích rozměrových a tvarových chyb nosných dílců obráběcího stroje na dosažitelnou přesnost pohybových os po jejich kompletaci s využitím vlastního zjednodušeného modelu mechaniky stroje.; Navrhnete simulační model, který umožňuje studovat vliv dílčích rozměrových a tvarových chyb nosných dílců na celkové výsledné geometrické chyby skupiny představující lože a suport s pohyblivým uložením pomocí dvou lineárních vedení se dvěma kolejnicemi a čtyřmi vozíky valivého vedení. Popis výsledných chyb proveďte schématem 21 standardních geometrických chyb pro kinematiku 3 osého frézovacího stroje s rámem typu „C“ a integrujte do modelu přepoččet na volumetrický popis chyb. Proveďte návrh popisu chyb na straně kolejnic vedení i na straně vozíků. Model ať předpokládá absolutně tuhá tělesa nosných dílců a poddajnou vazbu vozíku a kolejnice valivého lineárního vedení. Na statisticky reprezentativní množině vstupních chyb proveďte analýzu dopadů na výsledné chyby celé pohybové skupiny. Formulujte otevřené otázky vyplývající z analýzy a možnost praktického uplatnění výsledků analýzy. V rámci možností využijte experimentální data, pro verifikaci modelu.; Rozsah textové části: 60-80 stran

Seznam doporučené literatury:

Soubor norem ČSN ISO 230; MORÁVEK, M. Výzkum přesnosti pětiosých frézovacích center. Praha, 2018. Disertační práce. ČVUT v Praze; TONG, Van-Canh. Modeling of Moving Table with Linear Roller Guides Subjected to Geometric Errors In Guide Rails. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2020, 21(10) ISSN 2234-7593.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jan Smolík, Ph.D., ústav výrobních strojů a zařízení FS

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

Datum zadání diplomové práce: **29.04.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **25.07.2021**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2021**

Ing. Jan Smolík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Matěj Sulitka, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 20.7.2021

.....

podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce, Ing. Janu Smolíkovi, PhD. za vedení práce a za velmi plodné a inspirující konzultace. Dále bych chtěl poděkovat konzultantovi Ing. Eduardu Stachovi, PhD. za čas věnovaný dalším konzultacím.

Mé díky patří i rodině za podporu během studia a přítelkyni za trpělivost během večerů strávených při psaní práce.

Toto téma diplomové/disertační práce je podpořené projektem "Strojírenská výrobní technika a přesné strojírenství" CZ.02.1.01./0.0/0.0/16_026/0008404 prostřednictvím Operačního programu Výzkum, vývoj, vzdělávání (poskytovatel MŠMT ČR) a spolufinancován Evropskou unií.

Anotace

Autor:	Bc. Adolf Valášek
Název DP:	Analýza vlivu dílčích chyb nosných dílců na celkovou dosažitelnou přesnost
Rozsah práce:	104 stran, 85 obrázků, 19 tabulek
Akademický rok:	2020/2021
Škola:	ČVUT v Praze – Fakulta strojní
Ústav:	Ú12135 – Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí DP:	Ing. Jan Smolík, Ph.D.
Zadavatel:	ČVUT FS
Využití:	Optimalizace předepisovaných tolerancí na výrobních výkresech strojů a předvídání jejich geometrické a volumetrické přesnosti
Klíčová slova:	geometrické chyby, volumetrická chyba, přesnost, modelování chyb, předvídání volumetrických vlastností stroje
Anotace:	Tato práce se zabývá výzkumem určujících vlivů volumetrické chyby obráběcího stroje. V rešeršní části ukazuje, jaké jsou jednotlivé geometrické chyby strojních os a jakým způsobem se modeluje chyba volumetrická. Dále představuje dosavadní výzkum v oblasti chyb vznikajících při montáži stroje, nebo způsob přenášení chyb z podkladových ploch kolejnic na sestavenou strojní osu. Ve vlastní práci je pak představen model výpočtu volumetrických chyb tříosého stroje vycházející ze znalosti jednotlivých geometrických chyb, model výpočtu výsledných geometrických vlastností strojní osy na základě znalosti vlastností podkladových ploch a spojení obou modelů, které ve výsledku dokáží statisticky vyhodnotit volumetrické vlastnosti zadaného stroje pouze na základě předepsaných geometrických tolerancí.

Anotation

Author:	Bc. Adolf Valášek
Title of diploma thesis:	Influence of partial errors of machine tool parts on the overall achievable accuracy
Extent:	104 pages, 85 figures, 19 tables
Academic year:	2020/2021
University:	CTU in Prague – Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú12135 – Department of Production Machines and Equipment
Supervisor:	Ing. Jan Smolík, Ph.D.
Submitter:	CTU FME
Application:	Geometrical tolerance optimization of machine tool structural parts, prediction of overall volumetric accuracy
Key words:	Geometric errors, volumetric error, accuracy, geometric error modeling, volumetric accuracy prediction
Annotation:	<p>This thesis researches the determining influences of volumetric error in a machine tool. In the research part, individual geometric errors are shown and volumetric error models are introduced. Further research shows errors created in the assembly process or the error averaging effect in a single axis assembly. After that, a volumetric error model for a three axis machine tool is proposed, using all of the individual geometrical errors of the machine. Single axis geometric errors are modeled too, using geometric tolerances of mounting surfaces. The two models are then combined into a single machine tool model, which is able to statistically determine the overall volumetric accuracy of a given machine tool using only the geometrical tolerances in manufacturing.</p>

Seznam použitých zkratek

CNC	Computerized numerical control
GPS	Global positioning systém
TCP	Tool center point
LASER	Light amplification by stimulated emission of radiation

Seznam použitých veličin a symbolů

a	[mm]	Rozestup kolejnic
b	[mm]	Rozteč vozíků na kolejnici
d_{yi}	[mm]	Vodorovná odchylka geometrie kolejnice v místě i
d_{zi}	[mm]	Svislá odchylka geometrie kolejnice v místě i
E_A	[rad]	Rotační volumetrická chyba okolo osy X
EAX	[rad]	Roll osy X
EAY	[rad]	Pitch osy Y
EAZ	[rad]	Pitch osy Z
E_B	[rad]	Rotační volumetrická chyba okolo osy Y
EBX	[rad]	Pitch osy X
EBY	[rad]	Roll osy Y
EBZ	[rad]	Yaw osy Z
E_C	[rad]	Rotační volumetrická chyba okolo osy Z
ECX	[rad]	Yaw osy X
ECY	[rad]	Yaw osy Y
ECZ	[rad]	Roll osy Z
E_{vol}	[-]	Vektor všech složek volumetrické chyby
E_{volR}	[rad]	Vektor rotačních složek volumetrické chyby
E_{volT}	[mm]	Vektor translačních složek volumetrické chyby
E_{volT}^0	[mm]	Vektor translačních složek volumetrické chyby v počátku
E_X	[mm]	Translační volumetrická chyba v ose X
EXOY	[rad]	Chyba kolmosti os X a Y
EXOZ	[rad]	Chyba kolmosti os X a Z
EXX	[mm]	Chyba polohování osy X
EXY	[mm]	Chyba přímosti osy Y ve směru osy X
EXZ	[mm]	Chyba přímosti osy Z ve směru osy X
E_Y	[mm]	Translační volumetrická chyba v ose Y
EYOZ	[rad]	Chyba kolmosti os Y a Z
EYX	[mm]	Chyba přímosti osy X ve směru osy Y
EYY	[mm]	Chyba polohování osy Y

EYZ	[mm]	Chyba přímosti osy Z ve směru osy Y
E_z	[mm]	Translační volumetrická chyba v ose Z
EZX	[mm]	Chyba přímosti osy X ve směru osy Z
EZY	[mm]	Chyba přímosti osy Y ve směru osy Z
EZZ	[mm]	Chyba polohování osy Z
F_y	[N]	Vektor silových zatížení v horizontálním směru
F_{yi}	[N]	Silový účinek ve vodorovném směru i-tého vozíku
F_z	[N]	Vektor silových zatížení ve vertikálním směru
F_{zi}	[N]	Silový účinek ve svislém směru i-tého vozíku
F_{ZY}	[N]	Vodorovná zátěžná síla
F_{ZZ}	[N]	Svislá zátěžná síla
K_y	[-]	Matice zastoupení sil a tuhostí horizontálního směru
k_{yi}	[N/mm]	Vodorovná tuhost i-tého vozíku
K_z	[-]	Matice zastoupení sil a tuhostí vertikálního směru
k_{zi}	[N/mm]	Svislá tuhost i-tého vozíku
m	[-]	Násobitel geometrické chyby
$P_{90\%}$	[μm]	Percentil 90 maximální volumetrické chyby
pitch	[rad]	Klopení
Q_y	[-]	Vektor vnějších sil a deformací horizontálního směru
Q_z	[-]	Vektor vnějších sil a deformací vertikálního směru
r_{OTTCP}	[mm]	Radiusvektor z rámu do TCP, nástrojová větev
r_{OTTCP}^*	[mm]	Chybový radiusvektor z rámu do TCP, nástrojová větev
r_{OWTCP}	[mm]	Radiusvektor z rámu do TCP, obrobková větev
r_{OWTCP}^*	[mm]	Chybový radiusvektor z rámu do TCP, obrobková větev
r_1	[mm]	Nulový radiusvektor
roll	[rad]	Klonění
r_{TTCP}	[mm]	Radiusvektor ze suportu Z do TCP
r_{WTCP}	[mm]	Radiusvektor ze suportu X do TCP
r_x	[mm]	Radiusvektor polohy v ose X
r_x^*	[mm]	Radiusvektor chybové polohy v ose X
r_y	[mm]	Radiusvektor polohy v ose Y
r_y^*	[mm]	Radiusvektor chybové polohy v ose Y
r_z	[mm]	Radiusvektor polohy v ose Z
r_z^*	[mm]	Radiusvektor chybové polohy v ose Z
sgn()	[-]	Funkce signum
sqtol	[rad]	Maximální odchylka kolmosti os
T_{OT}	[-]	Transformační matice z rámu na suport Z
T_{OT}^*	[-]	Transformační matice z rámu na suport Z s chybami
T_{OW}	[-]	Transformační matice z rámu na suport X

T_{OW}^*	[-]	Transformační matice z rámu na suport X s chybami
T_{EX}	[-]	Transformační matice chyb osy X
T_{EXOY}	[-]	Transformační matice chyby kolmosti os X a Y
T_{EXOZ}	[-]	Transformační matice chyby kolmosti os X a Z
T_{EY}	[-]	Transformační matice chyb osy Y
T_{EYOZ}	[-]	Transformační matice chyby kolmosti os Y a Z
T_{EZ}	[-]	Transformační matice chyb osy Z
tol	[mm]	Tolerance přímosti
$T_x(x)$	[-]	Transformační matice podél osy X
$T_y(y)$	[-]	Transformační matice podél osy Y
$T_z(z)$	[-]	Transformační matice podél osy Z
$U()$	[-]	Funkce rovnoměrného pravděpodobnostního rozdělení
$X(t)$	[mm]	Poloha v ose X
X_{\uparrow}	[mm]	Vertikální přímost osy X
X_{\rightarrow}	[mm]	Horizontální přímost osy X
$Y(t)$	[mm]	Poloha v ose Y
Y_{\uparrow}	[mm]	Vertikální přímost osy Y
Y_{\rightarrow}	[mm]	Horizontální přímost osy Y
y_1	[mm]	Rozměr kinematické struktury
y_2	[mm]	Rozměr kinematické struktury
yaw	[rad]	Vybočení
y_i	[mm]	Celková vodorovná odchylna geometrie v místě i
y_t	[mm]	Rozměr kinematické struktury
y_z	[mm]	Rozměr kinematické struktury
$Z(t)$	[mm]	Poloha v ose Z
Z_{\uparrow}	[mm]	Vertikální přímost osy Z
Z_{\rightarrow}	[mm]	Horizontální přímost osy Z
z_1	[mm]	Rozměr kinematické struktury
z_2	[mm]	Rozměr kinematické struktury
z_3	[mm]	Rozměr kinematické struktury
z_4	[mm]	Rozměr kinematické struktury
z_i	[mm]	Celková svislá odchylna geometrie v místě i
z_t	[mm]	Rozměr kinematické struktury
Δy_i	[mm]	Vodorovná deformace i-tého vozíku
Δz_i	[mm]	Svislá deformace i-tého vozíku
α	[rad]	Obecný úhel
β	[-]	Vektor regresních koeficientů
γ	[-]	Matice vstupních tolerancí
δ	[μm]	Vektor odpovídajících devadesátých percentilů

Obsah

1	Úvod	12
2	Teoretický a praktický úvod do řešené problematiky	14
2.1	Geometrické chyby obráběcích strojů	14
2.1.1	Vlastnosti geometrických chyb	15
2.2	Měření geometrických chyb obráběcích strojů	16
2.2.1	Normy	16
2.2.2	Přímé měření	19
2.2.3	Nepřímé měření.....	24
2.3	Volumetrická chyba a její měření	27
2.4	Způsob modelování chyb	29
2.5	Volumetrické chyby přenesené a vznikající při montáži osy	31
2.6	Průměrování chyb lineárním valivým vedením	33
2.7	Vliv statického zatížení stolu na geometrické chyby	36
3	Návrh matematických modelů chyb	37
3.1	Model přenosu chyb z podkladových ploch kolejnic na výslednou osu	38
3.1.1	Předpoklady	38
3.1.2	Schématický popis modelu.....	39
3.1.3	Výpočet silových účinků ve vertikálním směru	41
3.1.4	Výpočet silových účinků v horizontálním směru	45
3.2	Generování náhodných chybových profilů podkladových ploch kolejnic.....	48
3.2.1	Výběr měřených přímostí podkladových ploch	49
3.2.2	Modelování náhodného chybového profilu podkladové plochy	51
3.2.3	Zavedení náhodných chybových profilů do modelu přenosu chyb.....	54
3.3	Modelování volumetrické chyby	57
3.3.1	Vstupní data modelu	57
3.3.2	Kinematický model modelovaného stroje	58
3.3.3	Sestavení transformačních vztahů.....	61
3.3.4	Výpočet volumetrické chyby	63
3.3.5	Speciálně upravený model aplikovaný na měřená data	64

3.4	Spojení předchozích modelů, generování chybově náhodných strojů	68
3.4.1	Vstupní data	68
3.4.2	Výstup modelu	70
3.5	Statistické vlastnosti modelů	75
3.5.1	Statistika modelu složené osy	75
3.5.2	Statistika modelu chybově náhodného stroje	78
4	Analýza vlivu dílčích chyb nosných dílců na dosažitelnou přesnost ..	80
4.1	Vliv rozměrů pohybové osy na procento zlepšení přímosti	80
4.2	Vliv dílčích chyb přímosti na celkovou volumetrickou chybu stroje	83
4.2.1	Vliv vertikální přímosti podkladu osy X	85
4.2.2	Vliv horizontální přímosti podkladu osy X	86
4.2.3	Vliv vertikální přímosti podkladu osy Y	87
4.2.4	Vliv horizontální přímosti podkladu osy Y	88
4.2.5	Vliv vertikální přímosti podkladu osy Z	89
4.2.6	Vliv horizontální přímosti podkladu osy Z	90
4.2.7	Úprava tolerancí přímosti všech os	91
4.2.8	Analýza citlivosti jednotlivých tolerancí přímosti	92
5	Závěr	94
	Použitá literatura a zdroje	98
	Seznam obrázků	101
	Seznam tabulek	104
	Seznam příloh	104
	Elektronické přílohy	104

1 Úvod

Pod pojmem „přesnost obráběcího stroje“ se schovává velké spektrum jeho vlastností. Dlouhou praxí a četnými výzkumy bylo zjištěno, že následující pochody mají největší vliv na chybu koncové polohy a natočení nástroje vůči obrobku [3]:

- Geometrické chyby jednotlivých strojních os
- Chyby způsobené teplotní deformací
- Statické zatížení
- Dynamické zatížení
- Chyby řízení

Následkem rostoucích nároků na přesnost strojů je vývoj v této oblasti velmi aktivní. Zkoumá se vliv jednotlivých členů chybového řetězce, zkoumají se možnosti kompenzace za využití matematických modelů, zkoumá se původ chyb, zkoumají se možnosti jejich měření.

Tato práce se bude věnovat základním tříosým obráběcím strojům, na kterých je přesnost a geometrie dobře představitelná, ale zároveň ne úplně triviální. Existuje mnoho kinematických konfigurací pro tříosý obráběcí stroj. Rozlišují se hlavně rozdělením jednotlivých strojních os do obrobkové a nástrojové větve, dále pak jejich sériovým uspořádáním a relativním pohybem. Při uvážení pouze translačních pohybových os existuje celkem 108 různých kinematických konfigurací [1]. Ne všechny konfigurace jsou v praxi používané, ale i tak lze pozorovat velkou rozmanitost v jejich konstrukci.

Díky pokročilým řídicím systémům CNC obráběcích strojů se dají do strojů zavádět kompenzace – při znalosti chyby v určitém bodě se poloha stroje upraví o hodnotu této chyby a dosáhne se tím zlepšení přesnosti. Některé chyby je však obtížné kompenzovat – hlavně chyby úhlového charakteru. U strojů se třemi lineárními osami neexistuje jednoduchý způsob, jak opravit chybu natočení nástroje vůči obrobku.

Má proto smysl věnovat se detailnímu studiu geometrických chyb a jejich modelování, aby existoval jejich nejlepší a nejdetailnější popis pro využití v kompenzaci. Zároveň má smysl studovat původ geometrických chyb pro pochopení jejich vzniku a snažit jim předcházet, ať už během výroby dílčích nosných dílců, či při jejich kompletaci. Kombinací těchto dvou disciplín pak může být doporučení pro konstruktéry, jak přísné tolerance má smysl předepisovat na dílčích nosných dílcích při výrobě a montáži.

V této práci bude provedena rešerše aktuálních poznatků z oboru geometrické a volumetrické přesnosti strojů, na základě které budou sestavovány matematické modely. Bude sestaven simulační model, který

umožní studovat vliv dílčích odchylek tvaru nosných dílců na celkových odchylkách skupiny sestavené lineární osy zahrnující dvě kolejnice lineárního vedení a čtyři vozíky rozmístěné do obdélníku. Pro tento model bude dále sestaven generátor náhodných chybových profilů, aby bylo možné studovat efekty přenášení chyb na co největší množině vstupních dat.

Výsledný popis chyb bude proveden schématem 21 standardních geometrických chyb pro tříosý frézovací stroj s rámem typu „C“ dle příslušných norem a tyto geometrické chyby pak budou s využitím kinematické struktury stroje přepočteny na volumetrickou chybu. Pro dostupnou sadu měřených dat pak bude provedeno ověření modelu.

Dále budou zkoumány statistické vlastnosti modelů se zavedenými náhodnými průběhy geometrických chyb – efekt tlumení geometrických chyb a volumetrické vlastnosti stroje z dlouhodobého výrobního hlediska. Pro tyto dlouhodobé atributy pak bude provedena citlivostní analýza na vstupní data, zejména citlivost na různé hodnoty předepsaných tolerancí přímosti usazovacích ploch pro kolejnice na nosných dílcích. Výsledkem je interpretace výsledků citlivostní analýzy pro použití při návrhu tolerancí pro nosné dílce či jejich optimalizaci.

V celé této práci se uvažuje, že měření, vliv a kompenzace geometrických chyb jsou platné pouze pro stroj v teplotně ustáleném stavu a bez dalších silových zatížení. Zjištění a případná zlepšení jsou tedy jedním z příspěvků ke zvýšení celkové přesnosti stroje a zlepšení jeho práce.

2 Teoretický a praktický úvod do řešené problematiky

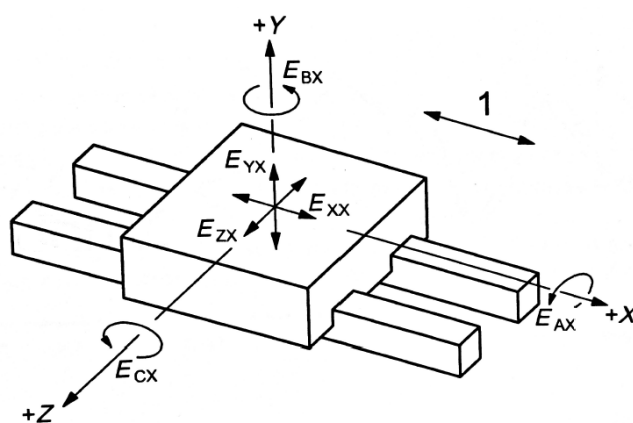
Následuje seznámení s problematikou geometrických chyb výrobních strojů, jejich druhů, rozdělení, názvosloví a měření.

2.1 Geometrické chyby obráběcích strojů

Uvolněný objekt v třírozměrném prostoru má šest stupňů volnosti [28]. Uvažujme lineární pohybovou osu jako pohyblivé spojení dvou částí – kolejnice a vozíku. I když je v tomto systému vozík ochuzen o 5° volnosti, s uvažováním polohovacího mechanismu dokonce o všech 6°, nemůžeme hovořit o naprosto přesném pohybu v jedné ose. Kvůli výrobním nepřesnostem a deformacím musíme uvažovat chybu pohybu v každém možném směru. Pro samostatnou lineární osu tedy dostáváme stejný počet geometrických chyb jako počet stupňů volnosti tělesa v prostoru – 6 chyb. Jsou to tři chyby translačního charakteru a tři chyby rotačního charakteru:

- Chyba polohování
- Přímost v jednom příčném směru
- Přímost v druhém příčném směru
- Rotace okolo vlastní osy (klopení)
- Rotace okolo jedné příčné osy (klonění)
- Rotace okolo druhé příčné osy (vybočení)

Příklad označení takových chyb na vozíku pohybujícím se ve směru osy X je na Obr. 2.1.



Obr. 2.1: Geometrické chyby vozíku v ose X [2]

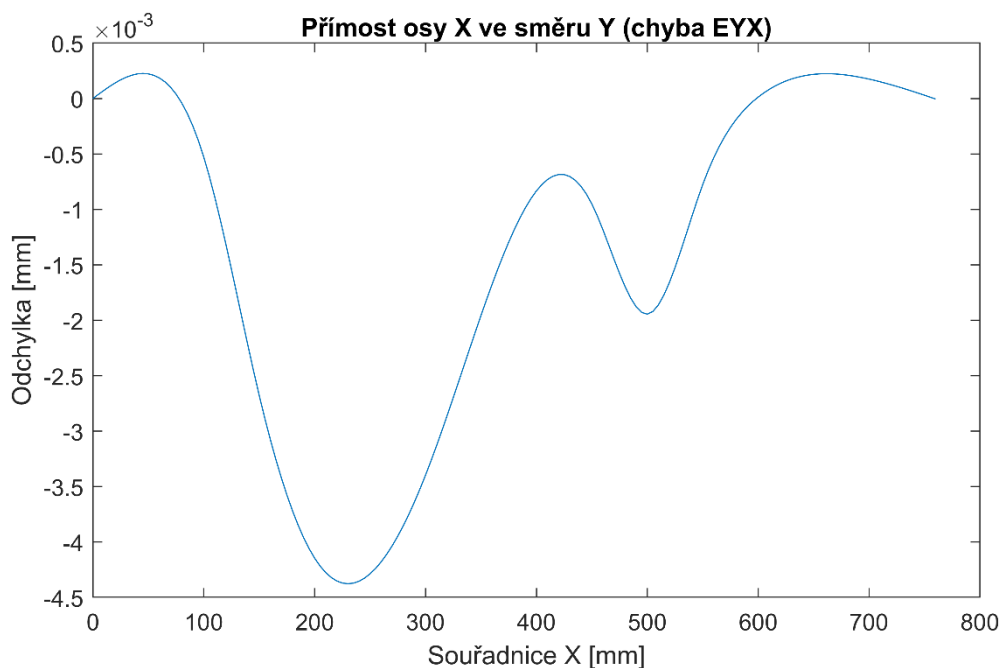
Mimo základních šesti chyb každé lineární osy obsahují víceosé výrobní stroje také chyby vzájemné kolmosti strojních os. Každá dvojice strojních os tedy vnáší do celkové přesnosti stroje vzájemnou úhlovou chybu kolmosti.

Pro tříosý výrobní stroj s klasickou kartézskou kinematikou dostáváme celkem 21 geometrických chyb – 18 chyb pocházejících z jednotlivých strojních os [X, Y, Z] a tři chyby kolmosti mezi osami XY, XZ a YZ.

2.1.1 Vlastnosti geometrických chyb

Nejlépe popsatelnou chybou je právě chyba vzájemné kolmosti os. Je totiž v celém prostoru konstantní, není tedy polohově závislá. Ostatní chyby jsou polohově závislé. Většinou se uvažuje polohová závislost pouze na měřené souřadnici. Například, přímota osy X ve směru Y se uvažuje polohově závislá právě a pouze na poloze osy X. Vliv polohy os Y a Z se zanedbává, i když v reálném světě se bude chyba díky poddajnosti nosných struktur a v závislosti na kinematické konfiguraci ostatních os měnit.

Průběh závislosti chyby na poloze může být velmi různorodý, v těch nejjednodušších případech může nabývat i lineární závislosti. Běžnějším průběhem je pak křivka připomínající tvar funkce sinus (podobně jako dále na Obr. 3.15). Nejčastějším úkazem však bývá to, že má chyba obecný průběh. Přímota osy X ve směru Y (tedy chyba EYX) ze skutečného stroje je na Obr. 2.2.



Obr. 2.2: Přímota osy X ve směru osy Y

2.2 Měření geometrických chyb obráběcích strojů

Měření chyb se věnuje mnoho prací, výzkumů i firem. Za otce zkoušení přesnosti obráběcích strojů je považován Dr. Schlesinger, který v roce 1932 knižně vydal prvotní doporučení pro měření přesnosti obráběcích strojů. Na základě jeho poznatků jsou obráběcí stroje zkoušeny dodnes a vydávané normy stále čerpají z jeho metod. Při měření geometrických chyb se musí stále uvažovat teplotní chování stroje, teplotní dilatace nosné struktury stroje ovlivňují přesnost stroje z veliké části. Veškeré měření geometrie stroje by tedy mělo probíhat za teplotně ustáleného stavu, odpovídající běžnému provozu stroje. Většina dnes používaných a ověřených postupů je popsána normou ISO 230 a jejími částmi, včetně popisu teplotního chování. Pro měření geometrických chyb existují metody přímé a nepřímé, jak bude později ukázáno.

2.2.1 Normy

Standard nejlépe popisující testování obráběcích strojů je soubor mezinárodních norem ISO 230. Existují i ostatní normy zabývající se testováním obráběcích strojů, např [4]:

- VDI/DGQ 3441, 3442, 3443, 3444, 3445
- ANSI B5.54(2005) [ISO 230-2(1997) ekvivalent]
- JIS B 6330-1980
- ČSN ISO 10791

Při přejímání stroje, resp. při vytváření kontraktu, je důležité stanovit normu a způsob, podle kterého bude stroj zkoušen a předán. Soubor norem ISO 230 není pro výrobce nijak svazující. Sama norma uvádí, že k měření lze použít i jiných metod než v normě uvedených, pokud tyto poskytnou srovnatelné nebo lepší výsledky měření. Výrobci strojů mají tedy povětšinou vlastní testovací protokol, který je často přísnější než normy.

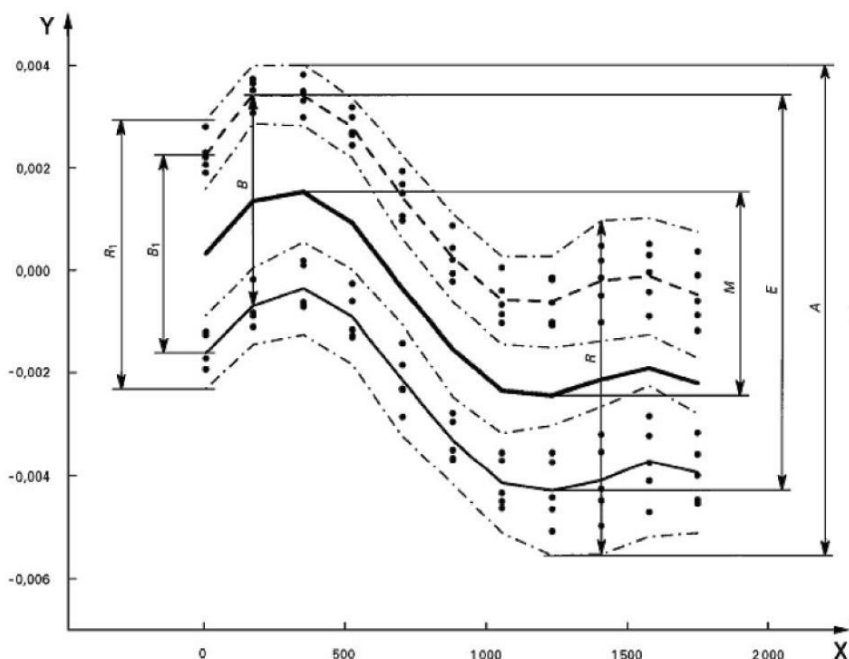
Dále bude využívána pouze norma ISO 230 a její části, které jsou důležité pro téma měření geometrických chyb. Pro úplnost ale budou uvedeny všechny části, které norma ISO 230 obsahuje, viz Tab. 2.1 [2].

Tab. 2.1: Části normy ISO 230 [2]

ISO 230-1	Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za kvazistatických podmínek
ISO 230-2	Stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách obráběcích strojů
ISO 230-3	Určení tepelných vlivů
ISO 230-4	Zkoušky kruhové interpolace u číslicově řízených obráběcích strojů
ISO 230-5	Určení emise hluku
ISO 230-6	Určení přesnosti nastavení polohy na diagonálách tělesa a stěn (Zkouška diagonálního přestavení)
ISO 230-7	Geometrická přesnost os rotace
ISO 230-8	Určení úrovně vibrací
ISO 230-9	Odhad nejistoty měření pro zkoušky obráběcích strojů podle série ISO 230, základní rovnice
ISO 230-10	Určení měřících vlastností snímacích systémů číslicově řízených obráběcích strojů
ISO 230-11	Měřicí přístroje a jejich aplikace pro zkoušky geometrie obráběcího stroje

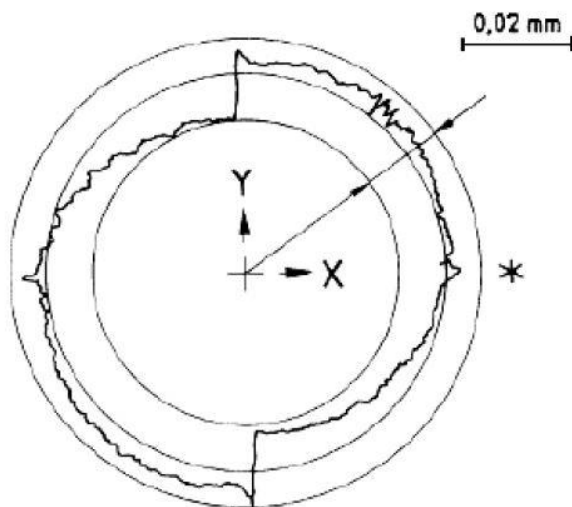
Norma ISO 230-1 je základním stavebním kamenem pro měření geometrických chyb obráběcích strojů a je velmi obsáhlá. Definuje názvosloví, druhy chyb, podmínky a přípravu měření a vypisuje některé metody pro měření, které budou podrobněji rozepsány v následujících kapitolách.

Jednou z měřených chyb je chyba polohování, což je chyba nastavení polohy způsobená převážně způsobem odměřování polohovacího mechanismu a řízením osy. Typickou vlastností této chyby je hystereze, neboli rozdílné chování této chyby v závislosti na směru pohybu. Spolu s opakovatelností nastavení polohy je měření této chyby detailněji popsáno v méně obsáhlé normě ISO 230-2. Výstupem tohoto měření je graf obousměrné chyby a opakovatelnosti nastavení polohy (Obr. 2.3), kde se pod písmenem R schovává velikost obousměrné chyby opakovatelnosti a písmeno A popisuje velikost obousměrné chyby polohování.



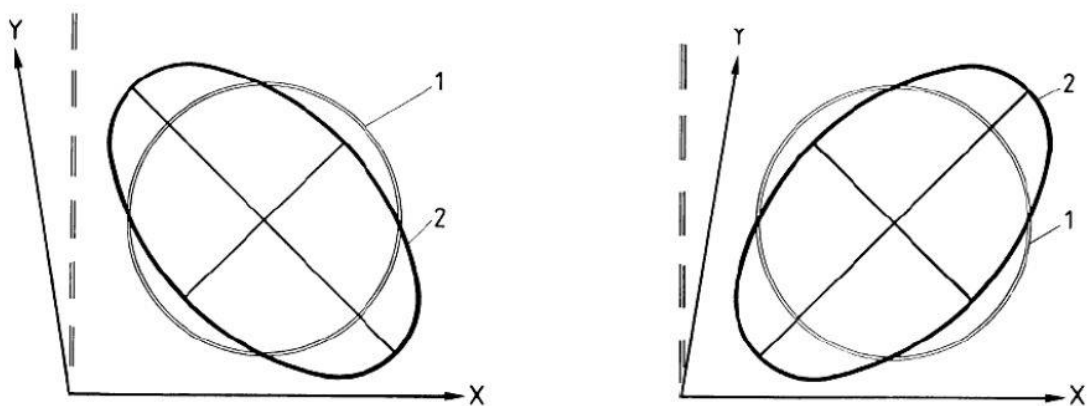
Obr. 2.3: Obousměrná chyba a opakovatelnost nastavení polohy v ose X [5]

Další normou popisující geometrické chování stroje a schopnost interpolovat složené pohyby je část ISO 230-4. Vyhodnocuje tyto vlastnosti na základě provedeního testu kruhové interpolace. Výstupní hodnota dosažitelné kruhovitosti pohybu bývá velmi častým indikátorem přesnosti stroje a nejběžnější součástí předávacího protokolu. Z naměřeného interpolačního grafu se však dají odečíst i hodnoty vypovídající o přesnosti mechanické struktury stroje – vůle pohybových mechanismů a vzájemná kolmost os. Vůle v jednom z pohybových mechanismů se projeví významným skokem odchylky na krajích kružnice, viz zjevná vůle pohybového mechanismu osy Y na výsledku kruhové interpolace na Obr. 2.4.



Obr. 2.4: Výstup testu kruhové interpolace stroje s vůlí v pohybovém mechanismu osy [6]

Vzájemná kolmost dvojice strojních os v interpolované rovině se projevívá tak, že se z interpolované kružnice stane elipsa s natočenou hlavní osou o $\pm 45^\circ$ (Obr. 2.5). Z odečtených délek hlavní a vedlejší osy se pak dá jejich poměrem dopočítat přímo chyba vzájemné kolmosti dle vzorců uvedených v normě ISO 230-1 [2].

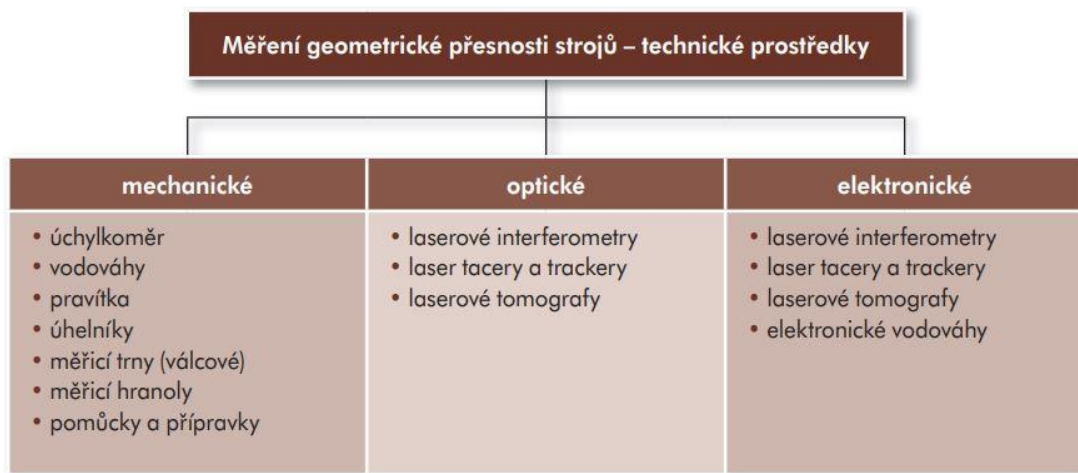


Obr. 2.5: Chyba vzájemné kolmosti os X a Y a její vliv na výsledek testu kruhové interpolace [6]

Další normou, která se zabývá testováním přesnosti obráběcích strojů a která by zde měla být uvedena je norma ISO 230-6. Jedná se o zkoušku přesnosti nastavení polohy na diagonálách pracovního prostoru s podobnou metodikou jako v případě normy ISO 230-2, nicméně výsledky zkoušky podle této normy dokáží ukázat základní volumetrické vlastnosti celého pracovního prostoru zkoumaného stroje. Zkoušení přesnosti na diagonálách stroje dokáže posloužit i k sofistikovanějším výpočtům, jak bude ukázáno později.

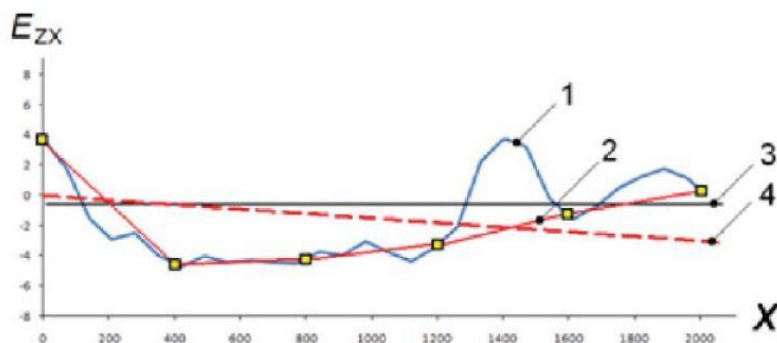
2.2.2 Přímé měření

Prvním způsobem měření jednotlivých geometrických chyb je jejich přímé zjištění pomocí jedné z několika dostupných metod. K měření existuje celá řada pomůcek a přístrojů, od klasických mechanických po moderní optoelektrické, viz. Obr. 2.6. V dnešní době se pro měření geometrických chyb používají především metody využívající laserový paprsek. V práci [8] provedli autoři měření 19 z celkových 21 chyb pomocí laser interferometru a příslušných přípravků, pouze měření klopení os X a Y bylo provedeno elektronickou vodováhou. Práce [3] a [10] dále uvádějí různé metody přímého měření chyb laserovými i klasickými metodami.



Obr. 2.6: Přehled technických prostředků pro měření geometrické přesnosti strojů [4]

Při měření geometrických chyb je obecná snaha mít co největší frekvenci vzorků a tedy co nejmenší interval měření, aby byly zachyceny i složky vysokofrekvenčních chyb podle Nyquist–Shannonova vzorkovacího teorému. Při nedostatečné vzorkovací frekvenci pak mohou některé chyby zůstat skryté, viz. Obr. 2.7. Čára 1 představuje skutečný profil přímosti, zatímco čára 2 propojuje naměřené body s nízkou vzorkovací frekvencí. Je vidět, že některé složky průběhu chyby zůstávají skryty a není tak získána úplná informace o geometrii osy.

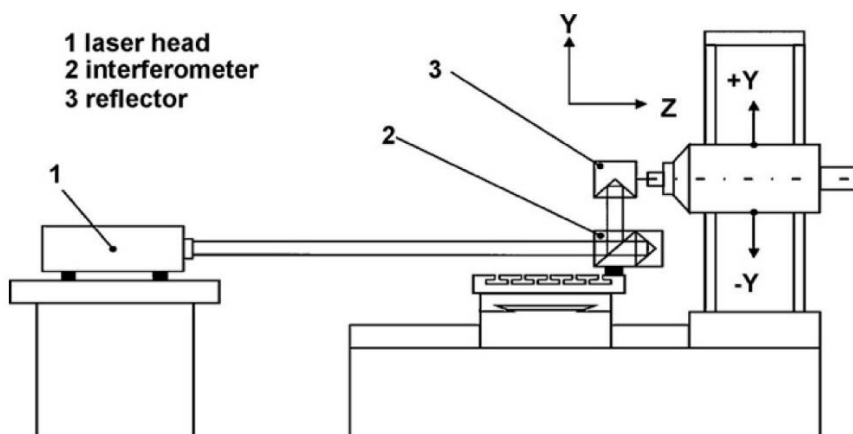


Obr. 2.7: Měření přímosti osy X ve směru Z a vliv vzorkovací frekvence [2]

V následujících podkapitolách bude sestaven stručný přehled metod pro přímé měření jednotlivých chyb osy a pro přímé měření chyb vzájemné kolmosti os.

Chyba polohování

Pro měření chyby polohování strojní osy je nejlepší využít laser interferometr, který může poskytnout takřka kontinuální měření. Lze také využít přesných etalonů či stupňovitých etalonů v kombinaci s úchylkoměrem. Příkladová konfigurace měření chyby polohování pomocí laser interferometru je na Obr. 2.8



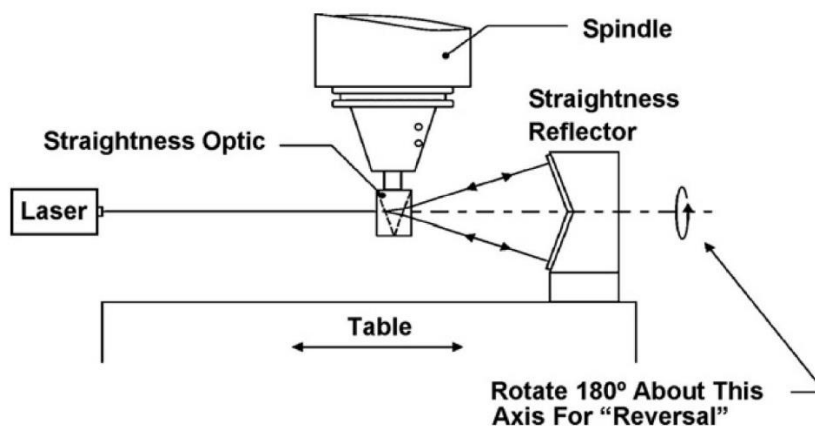
Obr. 2.8: Měření chyby polohování pomocí laser interferometru [3]

Přímost osy

Při měření přímosti osy je potřeba reference přímosti – přesný etalon. Tím může být přesné pravítko např. z granitu nebo litiny (Obr. 2.9), nebo pro velmi dlouhé osy lze použít tenký napnutý ocelový drát. Jako reference přímosti optických metod slouží laserový paprsek. Pak je měřena laterální chyba v jednom ze dvou směrů. K měření odchylky lze použít různá zařízení – klasický úchylkoměr, indukční/kapacitní snímače či opět laser interferometr. Měření přímosti pomocí sestavy s laser interferometrem je na Obr. 2.10.



Obr. 2.9: Litinové pravítko mostové [11]



Obr. 2.10: Měření přímosti osy pomocí laser interferometru [3]

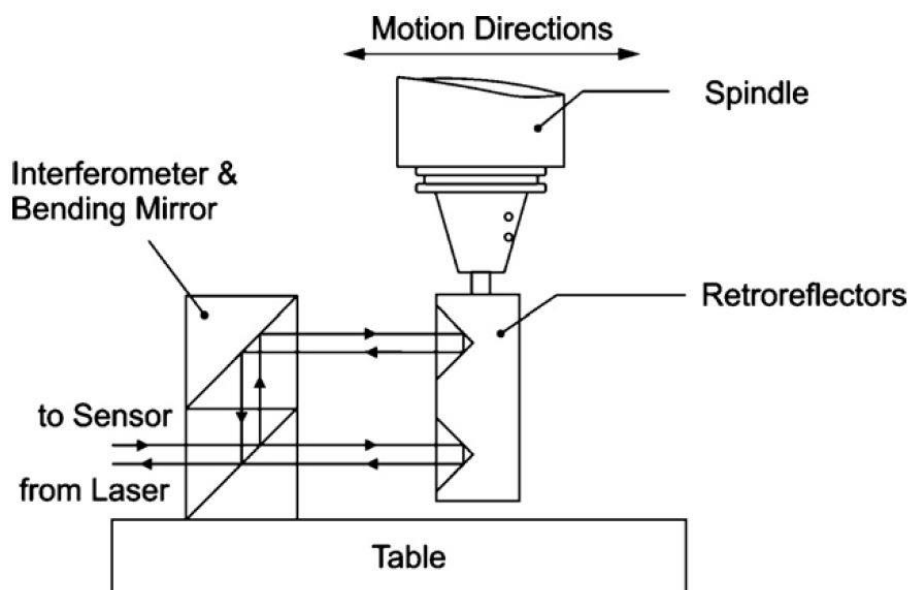
Klonění a vybočení

Tyto úhlové chyby se mohou měřit pomocí elektronických inklinometrů a vodovah (Obr. 2.11). Pomocí těchto přístrojů lze ale měřit pouze úhly okolo horizontálních os, jejich reference je totiž směr gravitačního zrychlení.



Obr. 2.11: Elektronická strojní vodováha SCHUT [12]

Dále můžeme použít laser interferometr s optikou uzpůsobenou pro měření úhlových chyb, jako na Obr. 2.12. Lze použít i klasické měření pomocí úchylkoměrů stejnou metodikou jako interferometrem – dvě měření odchylky v různé vzdálenosti od osy a dopočítání úhlu.



Obr. 2.12: Laser interferometr s úhlovou optikou [3]

Klopení

Podle [3] je klopení speciální případ, který nelze změřit interferometrem ani autokolimátorem. Jedinou známou metodou přímého měření úhlu klopení je proto použití inklinometru či elektronické vodováhy. Práce [10] však říká, že k měření všech úhlových chyb lze využít interferometr.

Chyby kolmosti

Pro měření kolmosti jsou používány etalony – keramické, granitové nebo litinové úhelníky. Lze využít také laserové metody v kombinaci s optickým čtvercem (speciální optický hranol)

Tabulka shrnující měřicí metody

Práce [10] shrnuje všechna možná měřicí zařízení a geometrické reference pro měření jednotlivých dílčích geometrických chyb do přehledné tabulky (Obr. 2.13).

Type of geometrical error	References and devices
Positioning errors ($\delta_i(j)$ when $i=j$; 3 error functions)	<ul style="list-style-type: none"> • Laser interferometers • Set of gauge blocks / end bars • Step gauges • Ball arrays
Straightness error motions ($\delta_i(j)$ when $i \neq j$; 6 error functions)	<p>Straightness references:</p> <ul style="list-style-type: none"> • taut wire • mechanical and optical straightedge • wing reflector • laser beam <p>Displacement indicator:</p> <ul style="list-style-type: none"> • capacitance gage • electronic gage and LVDT • plane mirror laser interferometer • photodiode
Angular error motions ($\varepsilon_i(j)$; 3 roll components when $i=j$; 3 yaw components and 3 pitch components when $i \neq j$)	<ul style="list-style-type: none"> • Autocollimator • Angular laser interferometer • Mechanical level • Electronic level • Straightness measuring devices separated at certain distance
Squareness	<ul style="list-style-type: none"> • Mechanical square with collimator • Diagonal measurements
Parallelism	<ul style="list-style-type: none"> • Collimator with optical square • Laser interferometer with optical square

Obr. 2.13: Přehled metod a zařízení, které lze použít pro měření geometrických chyb stroje [10]

2.2.3 Nepřímé měření

Přímé měření geometrických chyb stroje je velmi zdouhavé, měření každé z chyb vyžaduje dlouhou přípravu a průběh měření také není nikterak rychlý. Při celkovém počtu 21 chyb pro tříosý obráběcí stroj se pak může proměření všech dílčích chyb protáhnout i na několik pracovních dní. To není ideální hlavně z důvodu teplotních změn stroje – za tuto dobu nelze stroj udržet v konstantním teplotním zatížení, pokud není umístěn v klimatizované místnosti a pokud nedokážeme stroj neustále temperovat na jeho provozní teplotu.

Proto existují metody nepřímého měření, kdy je měřeno pomocí jedné měřicí aparatury a jednoho experimentu hned několik geometrických vlastností stroje najednou.

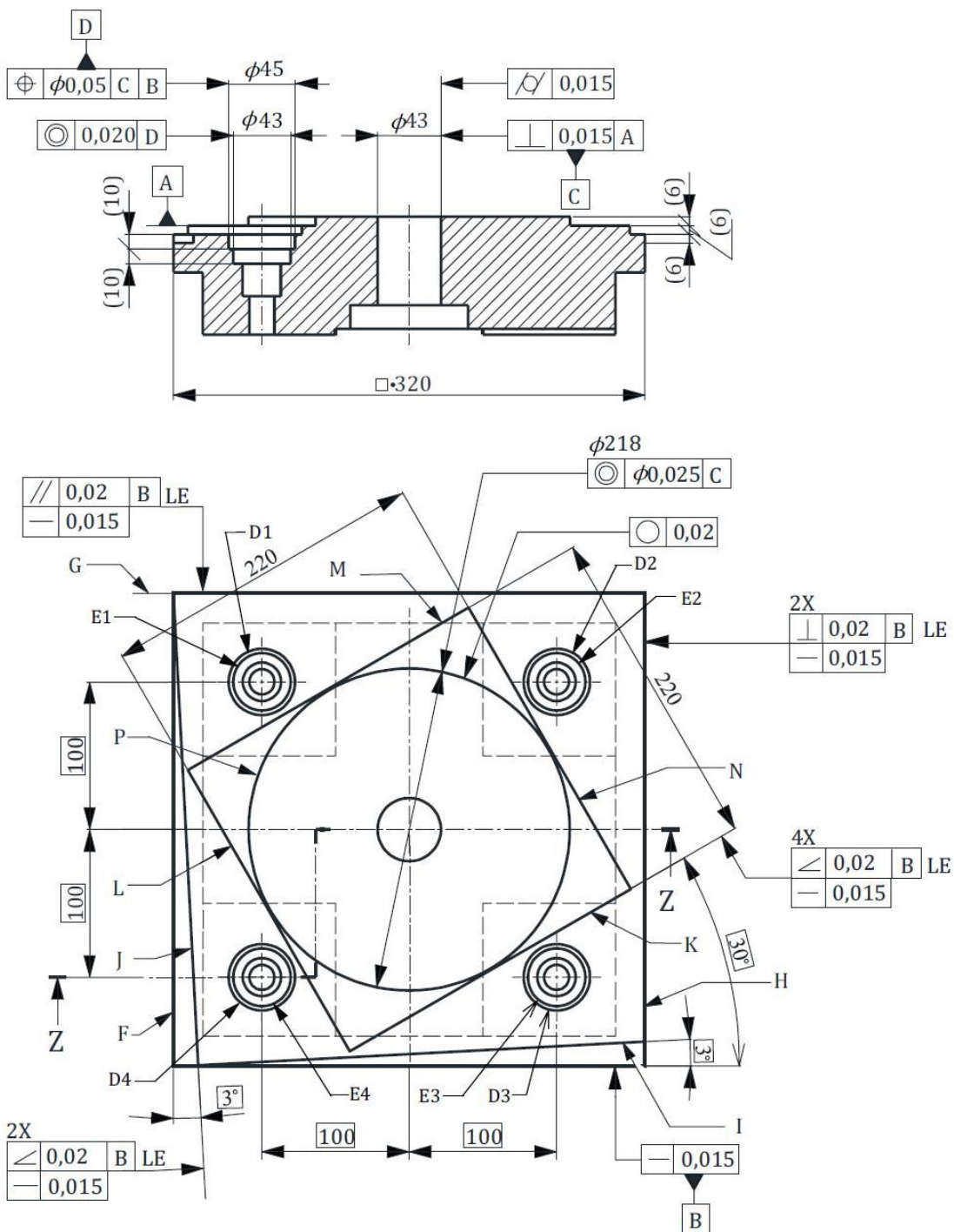
Prvním příkladem může být zjištění kolmosti os z testu kruhové interpolace, jak je popsáno na str. 19. Při měření schopnosti stroje pohybovat se po přesné kružnici interpolací dvou strojních os se do výsledku testu podepíše chyba jejich vzájemné kolmosti, kterou lze z výsledku testu dopočítat.

Dalším hojně používaným způsobem nepřímého měření geometrických vlastností stroje je výroba zkušebního obrobku s dokončovací operací. Zkušební obrobek by měl mít co nejjednodušší tvar, ale zároveň takové geometrické elementy, které prověří geometrické vlastnosti stroje. Norma ČSN ISO 10791-7 ukazuje několik druhů zkušebních obrobků i pro víceosé obráběcí stroje, příklad takového je na Obr. 2.14. Zkušební obrobky mohou být ale různorodé, každý výrobce obráběcích strojů si může navrhnout svůj vlastní tak, aby prověřil své konkrétní požadavky na přesnost stroje. Po obrobení se zkušební kus umístí na souřadnicový měřicí stroj a proměří se kontrolní plochy obrobku. Některé výstupy z tohoto měření mohou být například:

- Přímost dvou os
- Kolmost jedné dvojice os
- Přesnost kruhové interpolace
- Přesnost interpolace šikmé čáry
- Přesnost polohování

Výhodou tohoto měření je bezprostřední návaznost na konkrétní výrobky, všechna naměřená data budou platit i při reálné výrobě na stroji. Naopak nevýhodou je proměření vlastností pouze v prostoru obrobku a vliv použitého nástroje pro obrobení, včetně silových účinků působících při obrábění.

Z - Z



Obr. 2.14: Zkušební obrobek pro zkoušku přesnosti [13]

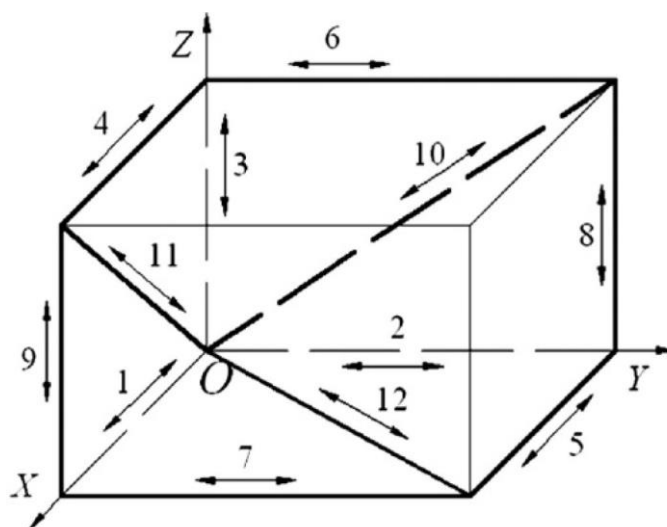
K nepřímému měření se dále používají speciální kalibrované 1D až 3D artefakty s přesnými referenčními elementy v kombinaci se samocentrovatelnou hlavou. 1D příklad takového artefaktu s přesnými kulovými elementy je na Obr. 2.15. Při tomto měření samocentrovatelná hlava snímá středy referenčních koulí a při znalosti jejich přesné polohy pak odečtem jejich měřené polohy jsou získány chybové vektory. Kombinací

výsledků několika měření v různých orientacích a pozicích je pak získán dostatek dat pro vyhodnocení průběhu jednotlivých geometrických chyb. Průběh geometrické chyby v celém rozsahu osy je získán při pokrytí prostoru vhodným umístěním měřícího artefaktu. [3]



Obr. 2.15: Měřící artefakt a samocentrovatelná hlava [14]

Jak již bylo uvedeno na konci kapitoly 2.2.1, norma ISO 230-6 využívá k identifikaci geometrických chyb chyby pozicování na diagonálách pracovního prostoru. V práci [9] autoři navrhli metodu dvanácti čar v prostou stroje dle Obr. 2.16. Na těchto čarách se interferometricky proměří přesnost pozicování a s využitím příslušných algoritmů se z tohoto měření získá všech 21 geometrických chyb tříosého stroje. Toto měření je velmi rychlé a oproti přímému měření všech dílčích chyb je možné stroj při tomto měření udržet v konstantním teplotním stavu.



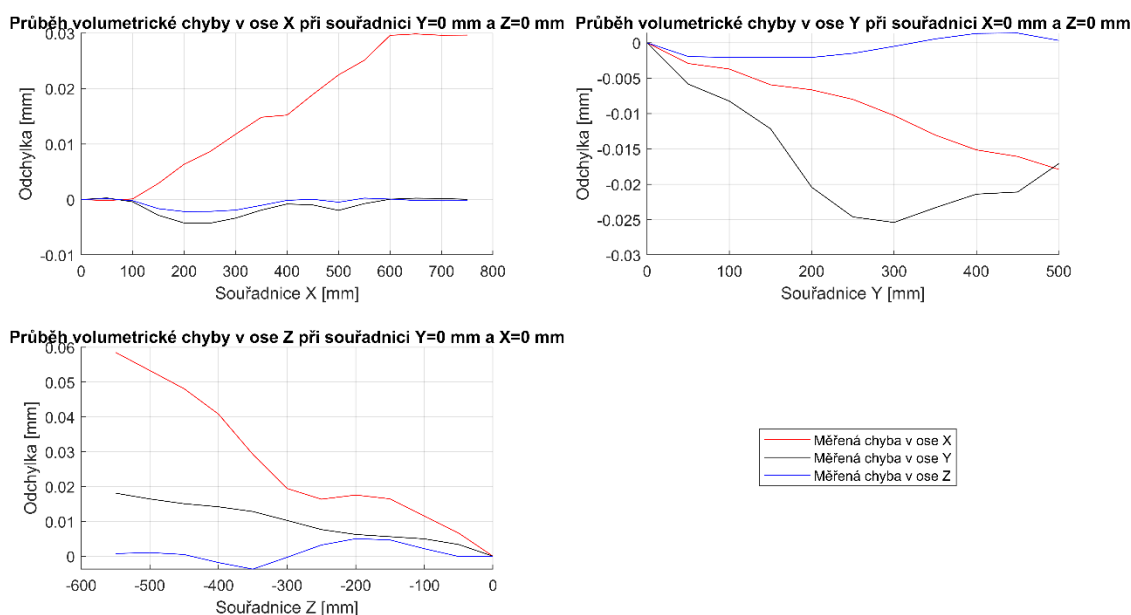
Obr. 2.16: 12 čar potřebných k proměření pracovního prostoru stroje [9]

2.3 Volumetrická chyba a její měření

Volumetrická chyba je složeninou všech dílčích geometrických chyb a geometrie kinematické struktury stroje. Jedná se o celkovou chybu polohy a natočení nástroje vůči obrobku. Jako taková má pro každý bod pracovního prostoru stroje celkem šest složek:

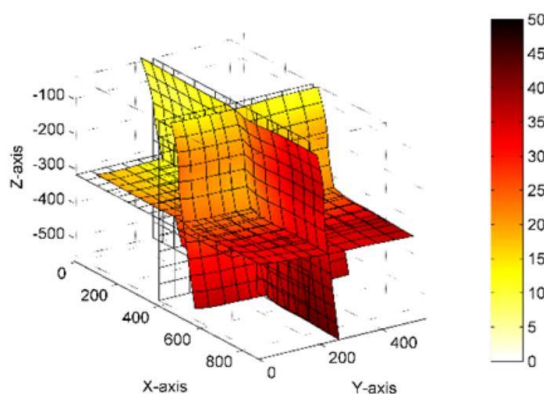
- Odchylka polohy v ose X
- Odchylka polohy v ose Y
- Odchylka polohy v ose Z
- Odchylka natočení v ose A
- Odchylka natočení v ose B
- Odchylka natočení v ose C

Volumetrická chyba nejlépe vyjadřuje skutečnou přesnost polohování stroje. Z proměřených hodnot volumetrické chyby celého pracovního prostoru se pomocí výpočtových algoritmů dá určit všech 21 dílčích geometrických chyb (např. aplikace TRAC-CAL [15]). Tyto informace se dají použít pro systémovou kompenzaci stroje a tím zvýšení přesnosti polohování. Vyobrazení translačních volumetrických chyb skutečného stroje je na Obr. 2.17 a na Obr. 2.18.



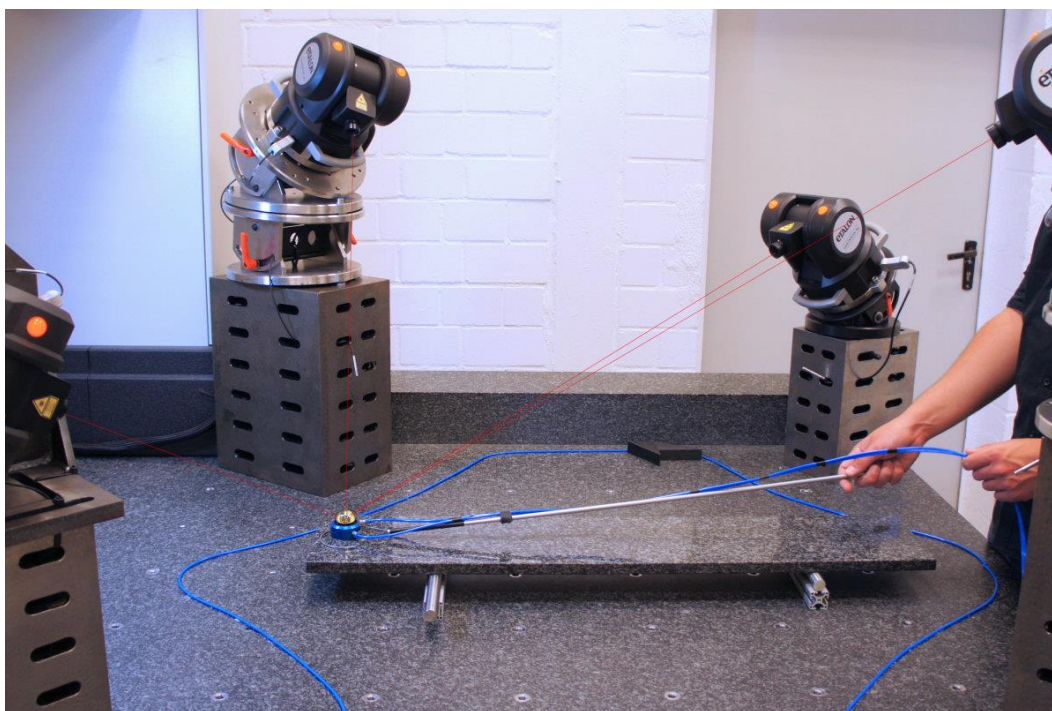
Obr. 2.17: Měřené volumetrické vlastnosti stroje

K měření volumetrické chyby se používají tzv. laser trackery nebo laser tracery, což jsou speciální zařízení sledující odražeč upnutý ve vřetení. Tracker vykonává sférický pohyb, kterým sleduje odražeč a počítá odchylku vzdálenosti interferometrickým způsobem. Takové měření se pak provede celkem při třech různých umístění trackeru, při dalších měřeních se snižuje nejistota měření.



Obr. 2.18: Volumetrické chyby pracovního prostoru stroje [16]

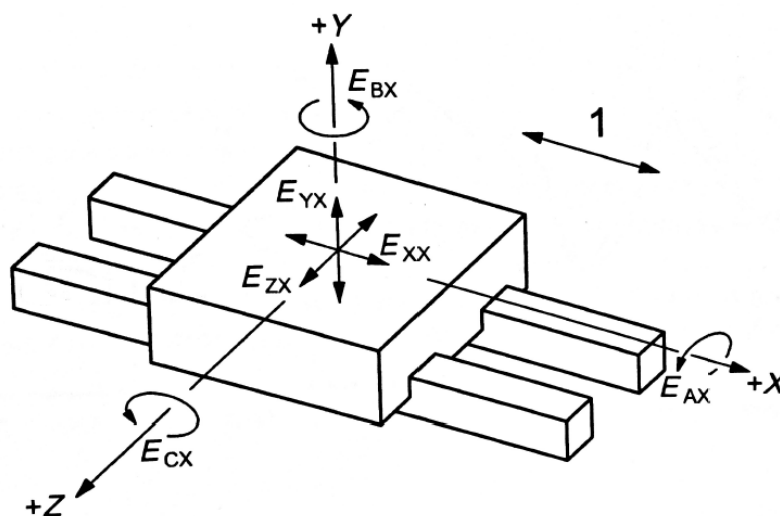
Před samotným odečtením polohy v měřeném bodě se musí stroj nejprve stabilizovat, nesmí dokmitávat. Čas měření v jednom bodě se proto pohybuje v jednotkách sekund. Se čtyřmi laser tracery/trackery lze provádět i kontinuální měření v reálném čase, které funguje na podobném principu jako určování polohy GPS [4]. Čtyři družice (tracery) sledují odražeč a výpočtem z měřených vzdáleností získají jeho skutečnou polohu, díky čemuž lze se zvolenou frekvencí záznamu získat i desítky tisíc proměřených bodů. K dalšímu zpřesnění měření lze použít i více tracerů. Sestava laser tracerů v takové konfiguraci je na Obr. 2.19.



Obr. 2.19: Sestava laser tracerů pro kontinuální měření [15]

2.4 Způsob modelování chyb

Obráběcí stroje jsou obecně sestaveny z pevných členů, posuvných uložení a rotačních uložení. Mezi nástrojem a obrobkem tak vzniká kinematický řetězec, jehož ideální podobu lze zapsat pomocí homogenních transformačních matic o rozměru 4x4. Zavedením všech 21 geometrických chyb v příslušných částech kinematické struktury se pak získává skutečná podoba kinematického řetězce. Rozdílem radiusvektoru ideálního a chybového kinematického řetězce se pak získají tři translační složky volumetrické chyby. Chyby pro osu X jsou uvedeny na Obr. 2.20.



Obr. 2.20: Jednotlivé geometrické chyby vozíku na ose X [2]

Homogenní transformační matice volí drtivá většina autorů jako nejvhodnější způsob modelování chyb, jelikož jimi lze velmi dobře a jednoduše popsat kinematiku daného stroje. Protože se u transformací kinematickou strukturou nepoužívá úhlových transformací a úhly chyb jsou velmi malé, mohou se trigonometrické funkce sinus a cosinus v tradičních transformačních maticích nahradit jejich lineárními aproximacemi okolo počátku, tedy $\sin(\alpha) = \alpha$ a $\cos(\alpha) = 1$. Transformační matice geometrických chyb osy X, která zahrnuje tři natočení a tři posunutí, je popsána vztahem (82).

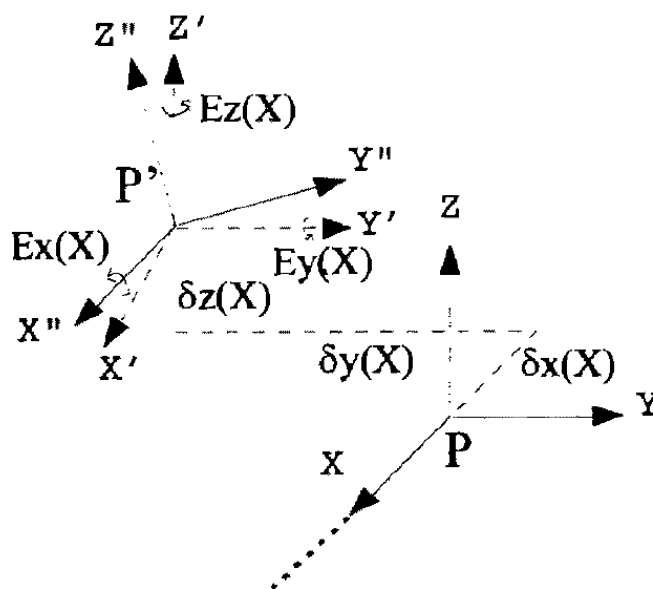
$$T_{EX} = \begin{bmatrix} 1 & -ECX & EBX & EXX \\ ECX & 1 & -EAX & EYX \\ -EBX & EAX & 1 & EZX \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

U víceosých strojů se pak různí autoři rozcházejí v počtu jednotlivých geometrických chyb. Toto ve své práci rozebírá Morávek [7]. Někteří autoři uvádějí počet geometrických chyb pětiosého stroje 33, jiní zahrnují i chybu

kolmosti mezi rotačními osami a uvádějí 37 chyb. Opačným příkladem je snaha jiných autorů počet geometrických chyb redukovat. Existují způsoby modelování pětiosých strojů využívající např. jen 20 nebo dokonce jen 11 geometrických chyb.

Postup vlastního modelování je pak ve většině prací stejný – pomocí sestavení kinematického řetězce stroje sestavit transformační vztahy popisující dosažení pracovního bodu v pracovním prostoru stroje, pak do klíčových uzlů vložit transformace geometrických chyb a tyto dva vzniklé radiusvektory (ideální a zatížený chybou) od sebe odečíst.

Vizualizace chybové transformace T_{ex} je znázorněna na Obr. 2.21.



Obr. 2.21: Vizualizace chybové transformace [8]

Další způsob modelování volumetrické chyby je použití teorie šroubů (angl. screw theory), způsob algebraického výpočtu vektorových párů (např. lineární a úhlové rychlosti nebo polohy) v kinematice. Teorie šroubů spočívá v tom, že každý prostorový pohyb popisuje jako pohyb po šroubovici. Tuto metodu využívá např. Zhong [21] a dále se jí tato práce pro její okrajovost nebude zabývat.

2.5 Volumetrické chyby přenesené a vznikající při montáži osy

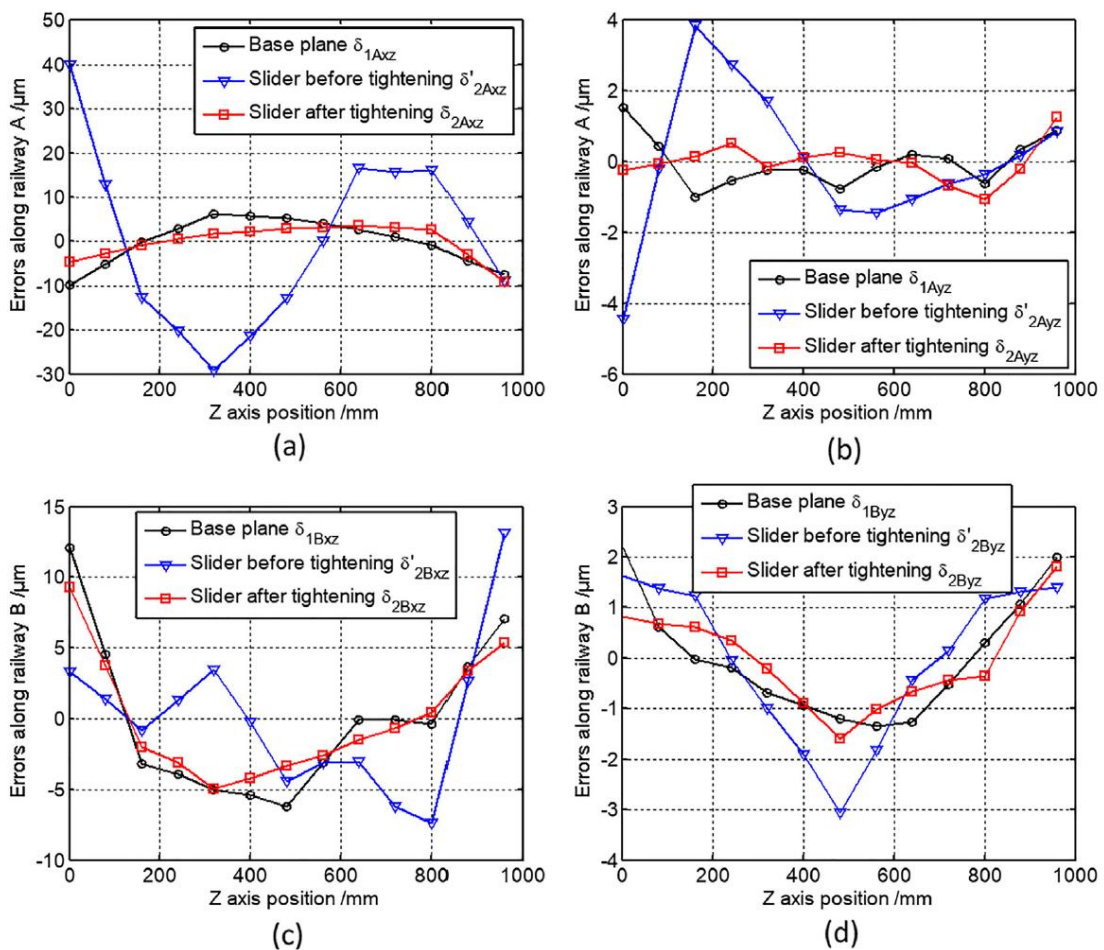
Přímota a další geometrické chyby lineární osy po montáži v závislosti na geometrických chybách podkladové plochy zkoumal Zhong [21]. Tento výzkum a zpracování jeho myšlenky je dalším důležitým klíčem pro tuto práci – pokud by například kolejnice naprosto perfektně držela výrobní přímota i po montáži, nemuseli bychom se vůbec soustředit na předepisování vlastností podkladových ploch.

Zhong [21] říká, že podkladové plochy obecně disponují řádově větší tuhostí než instalované kolejnice, a lze je tedy v modelování přenosu chyb považovat za absolutně tuhé. Naopak kolejnice jsou utahovány šrouby a ohýbají se při utažení podél podkladové plochy. Dále předpokládá, že geometrické chyby samotné kolejnice jsou minimální ($<1 \mu\text{m}/300 \text{ mm}$).

Před samotným experimentem provedl výpočet maximálního průhybu kolejnice v jedné šroubové rozteči při utažení šroubu na 70 % jeho pevnosti, neboli maximální rozdíl výšky roviny v jedné šroubové rozteči tak, aby kolejnice po utažení na plochu dosedla. Pro kolejnici o rozměrech 53x44 mm a šroubovou rozteč 25 mm je maximální dosažitelná deformace kolejnice 1,3 μm , což může být uvažováno jako výchozí parametr pro předepsání přímosti podkladové plochy (1,3 $\mu\text{m}/50 \text{ mm}$), pokud nebude brán ohled na rady výrobce.

Při experimentu byla nejprve interferometrem změřena přímota podkladové plochy (obrobena, broušena, škrabána). Následně byla na plochu položena kolejnice, šrouby utaženy pouze s minimálním momentem a proměřena přímota kolejnice. Po utažení všech šroubů na jejich jmenovitý moment byla změřena finální přímota kolejnice s jedním vozíkem. Všechny průběhy měření jsou na Obr. 2.22.

Zhong tak zjistil, že po montáži kolejnic lineárního vedení přebírá sestavená osa přímota podkladové plochy, a to téměř dokonale. Díky tomuto zjištění můžeme tvrdit, že geometrická chyba přímosti lineární osy je přímo chybou přímosti podkladové plochy a tuto přímota následně předepisovat na výkresech klíčových prvků kinematické struktury obráběcího stroje.



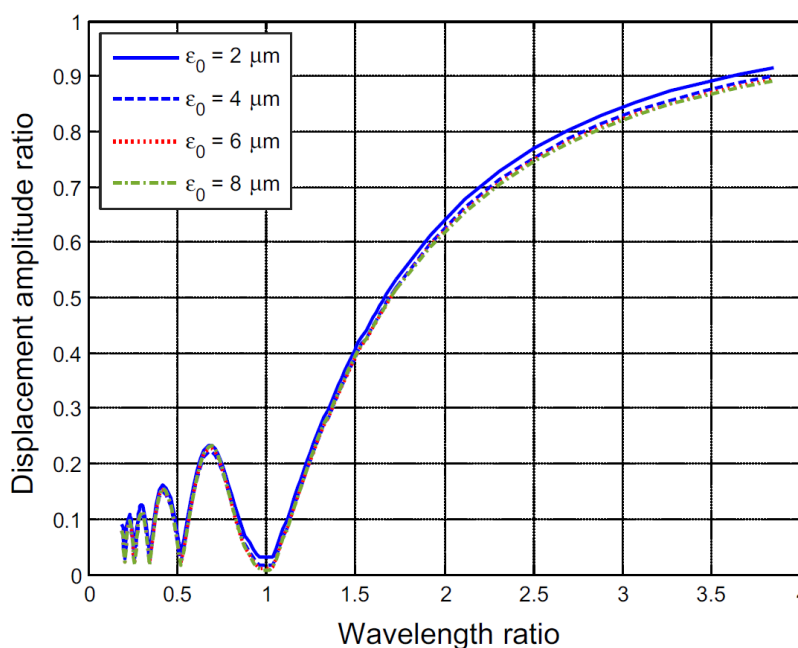
Obr. 2.22: Průběhy přímostí experimentálního měření [21]

Zároveň je v práci provedeno modelování celkové volumetrické chyby pomocí teorie šroubů a porovnání se skutečnými, naměřenými hodnotami. Zhong konstatuje, že naměřená a vypočtená data se ve velké míře shodují a díky tomu můžeme ovlivňovat volumetrickou přesnost stroje už při tvorbě výkresové dokumentace.

2.6 Průměrování chyb lineárním valivým vedením

Vozík pohybující se na kolejnici lineárního vedení přebírá její geometrické vlastnosti. Pokud je ale vozík ve dvojici nebo ve čtveřici na saních, už nelze tak jednoduše říct, jaké geometrické vlastnosti kolejnice se přenesou a jaký bude jejich výsledný efekt.

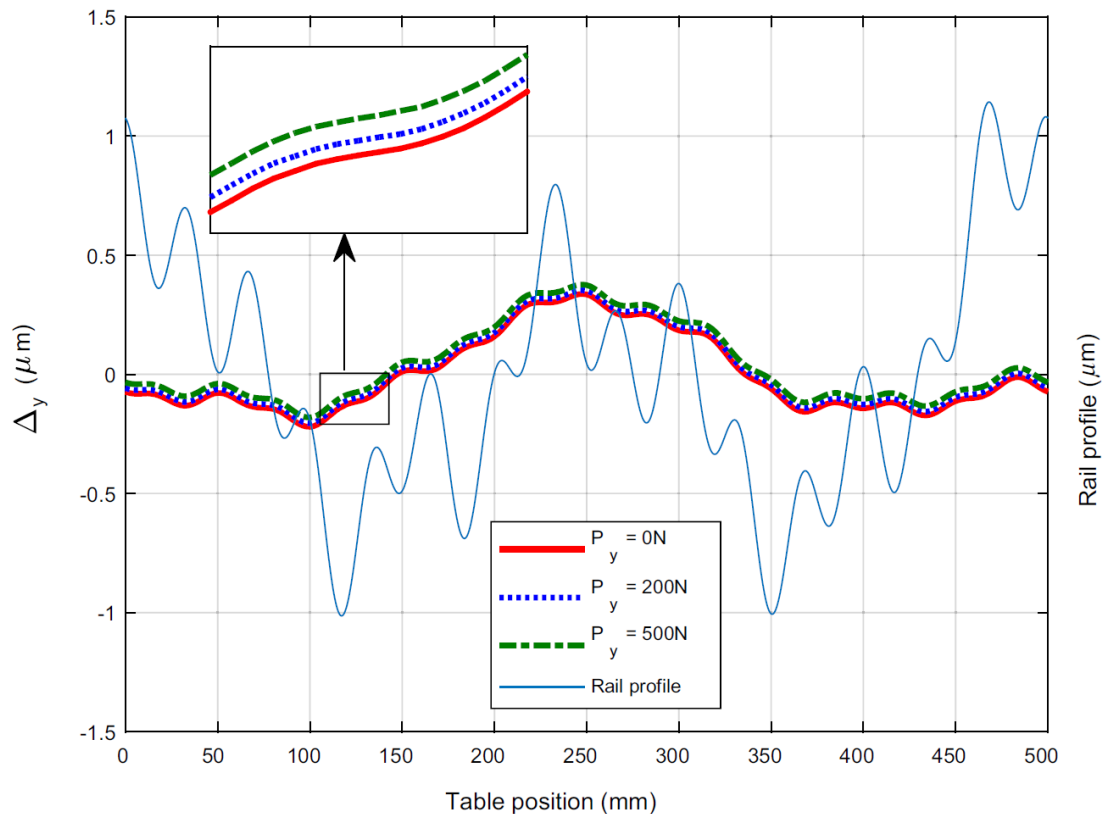
Tong, Kwon a Hong [22] zkoumali průměrování chyb valivým vedením jak pro jeden vozík na kolejnici, tak pro čtveřici vozíků na pojezdu. Pro zkoumání průměrování pro jeden vozík si nejprve stanovili chybový profil kolejnice s chybovou přímostí ve vertikální rovině kolejnice. Ten popsali pomocí Fourierovy řady. Pomocí jimi popsané metody a pomocí již zavedené metody přenosových funkcí pak ukázali, jak se přenáší přímost kolejnice na výslednou přímost pojezdu s jedním vozíkem. Při tom ukázali kritický parametr tohoto přenosu – poměr vlnové délky chyby na kolejnici a nosné délky vozíku. Vliv tohoto poměru je na Obr. 2.23. Z tohoto grafu lze vyčíst, že čím je vozík vůči vlnové délce chyby kolejnice delší, tím se chyba více utlumuje a pro některé hodnoty jí dokonce zatlumí úplně.



Obr. 2.23: Poměr vlnové délky chyby a délky vozíku na amplitudu přenesené chyby [22]

Dále autoři prováděli podobné modelování, ale pro celý saňový pojezd se čtyřmi vozíky, včetně několika scénářů vertikálního zatížení (Obr. 2.24). Důležité je zmínit, že při tomto výpočtu uvažovali stejný chybový profil pro obě kolejnice vedení. Ze simulace opět vyplývá, že chyby s vyšší frekvencí jsou tlumeny.

Podobný výzkum na průměrování chyb a jeho modelování vedli i Ni, Zhou, Shao a Li [25].

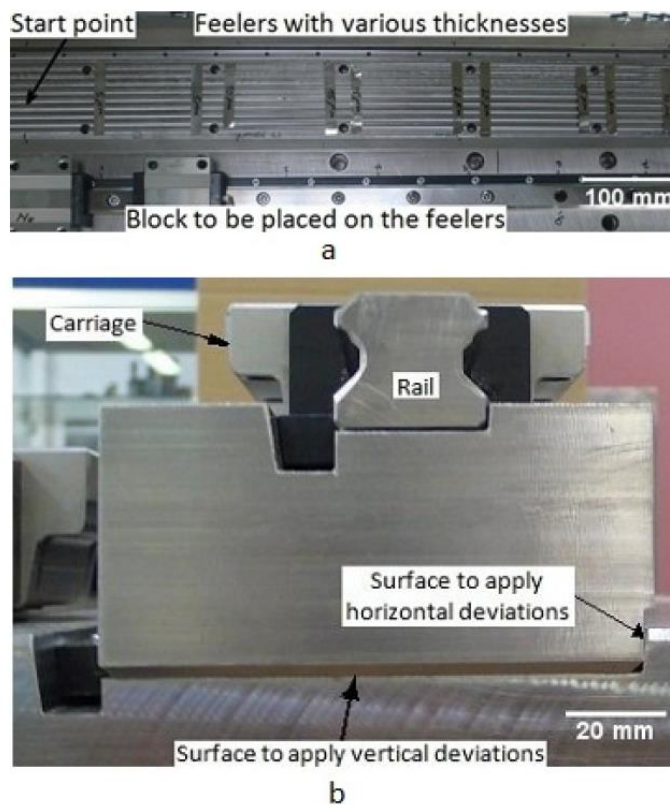


Obr. 2.24: Simulace výsledné přímosti pro lineární pojezd [22]

Ve dvou dále studovaných pracích se zabývali Rahmani a Bleicher [23] a Majda [24] přenášením geometrických chyb z kolejnic na pojezd, pokud mají kolejnice různé geometrické chyby. V jednom případě uvažují vždy jednu z kolejnic za absolutně přesnou a na druhou zavádějí lineární chybu přímosti v horizontálním, nebo vertikálním směru. V dalším případě pak zavádějí chyby přímosti na obě kolejnice, na jedné v horizontálním směru a na druhé ve směru vertikálním. Obě práce zároveň provádějí simulaci/měření v pěti bodech saní – v rozích a ve středu desky. Ukazují tak, že i poloha měření má vliv na výsledek.

Způsob experimentálního zavedení lineárního průběhu vertikální odchylky přímosti na jednu z kolejnic, který použili Rahmani a Bleicher je na Obr. 2.25. Na přesnou podkladovou plochu v intervalu 100 mm pokládali tenké plíšky s lineárně rostoucí tloušťkou. Celkově tak vytvořili chybu vertikální přímosti o velikosti 30 μm na 500 mm délky.

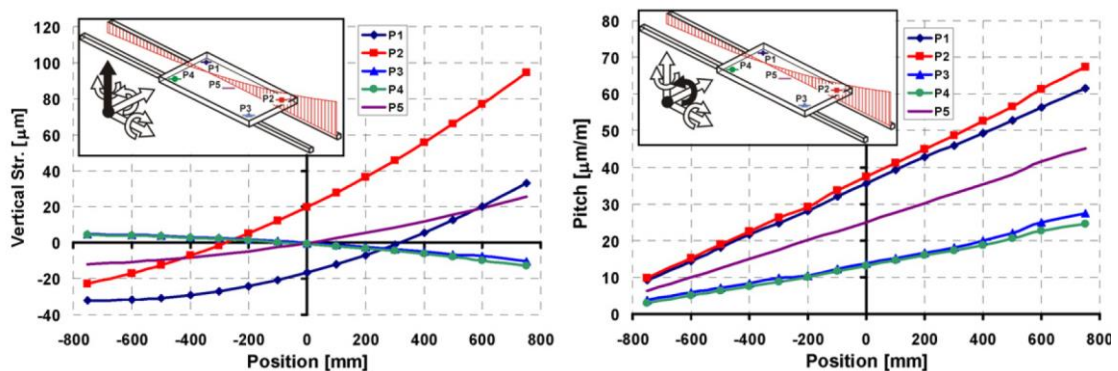
Z jejich měření vyplynulo, že výsledná vertikální přímost měla velikost asi poloviny zavedené chyby přímosti – sestavená osa tedy snížila velikost chyby přímosti celkem značně. Podobný výsledek zaznamenali i v ostatních případech umístění chybové přímosti.



Obr. 2.25: Způsob zavedení odchylky přímosti ve vertikálním směru [23]

Zatímco výzkum Rahmaniho a Bleichera [23] byl více zaměřený na experimentální měření a konečněprvková simulace byla pouze okrajově provedena na konci, Majda [24] provedl MKP simulace pro všechny popsané varianty zavedení chyby přímosti, které ale v práci přímo neporovnal se skutečným měřením.

Vybrané simulované průběhy jsou na Obr. 2.26.

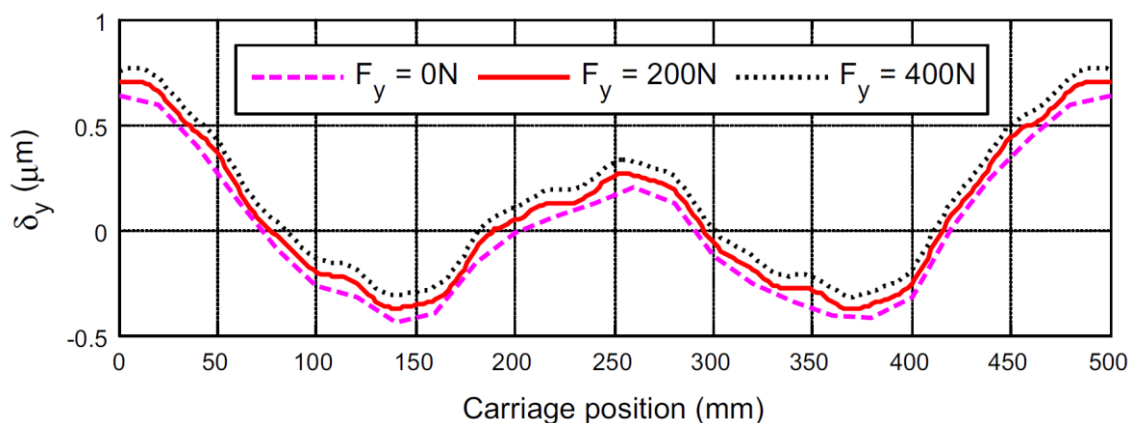


Obr. 2.26: Vybrané simulované průběhy přenesené přímosti [24]

2.7 Vliv statického zatížení stolu na geometrické chyby

Vliv zatížení má smysl zkoumat pouze na pohybových osách křížového nebo jinak pohybujiícího se stolu – jak bylo popsáno v úvodu, tato práce se hlavně zajímá o vlastnosti stroje nezatíženého silami pracovního cyklu. Zatížení nástrojové větve od váhy nástroje je zanedbáno, váha běžného nástroje nezpůsobí žádnou významnou změnu geometrie.

Zkoumání tohoto vlivu bylo zahrnuto v práci Tonga a spol. [22]. Na Obr. 2.24 je v detailu vidět změna odchylky přímosti při různých hodnotách zatížení, ale v kontextu celkové vznikající chyby je rozdíl jednotlivých zatížení minimální. Autoři zkoumali vliv zatížení i pro pohyb pouze jednoho vozíku, viz. Obr. 2.27.



Obr. 2.27: Vliv zatížení na průběh přímosti [22]

3 Návrh matematických modelů chyb

V následujících kapitolách se bude práce zabývat matematickým modelováním geometrických chyb a jejich přepočtem na chybu volumetrickou. Nejprve bude sestaven model simulující stavbu pohybové osy a přenesení geometrických chyb z nosných dílců struktury stroje na výsledné geometrické chyby osy. S modelem pohybové osy bude propojen generátor náhodných chybových profilů kolejnic s předepsanou tolerancí, který dále umožní sledovat statistické vlastnosti přenosu chyb. Dále bude představeno modelování volumetrické chyby, ke kterému budou uvedena příslušná vstupní data, sestaven kinematický model stroje a ukázán způsob výpočtu volumetrické chyby. Speciálně upravený druh tohoto modelu bude pak sloužit k porovnání měřených volumetrických chyb s měřenými geometrickými chybami.

Dalším krokem bude implementace modelu simulujícího geometrické chyby jednotlivých strojních os do modelu volumetrické chyby, čímž vznikne model generující stroje s náhodnými geometrickými chybami podkladových ploch lineárního vedení a kolmosti stanovující jeho výsledné volumetrické vlastnosti. Při cyklickém spouštění tohoto modelu bude možné sledovat statistiku jeho volumetrických vlastností a při změně vstupních parametrů i citlivost volumetrické chyby na tuto změnu.

Takto bude vytvořen matematický model, popisující předpoklady volumetrických a geometrických vlastností finálního stroje pouze na základě předepsaných výrobních tolerancí nosných dílců. Díky tomu bude možno předpovědět volumetrickou přesnost obráběcího stroje už ve fázi konstrukce a říct, na kterých předepsaných tolerancích má smysl se dožadovat zvýšené přesnosti. Tento matematický model bude dotčen nepřesnostmi způsobenými zejména uvažováním absolutně tuhých těles nosných dílců.

Modelování používá řadu předpokladů, které jsou před každým výpočtem uvedeny a vysvětleny. Pro úplnost je uveden jejich výčet:

- Kolejnice přebírají přímost podkladové usazovací plochy [21]
- Absolutně tuhé dílce nosné struktury
- Pouze lineární deformace vozíků, klopné momenty zanedbány
- Malé deformace a úhly
- Lineární chování poddajnosti vozíků
- Tepelně ustálený stroj

Některé vlastní obrázky v této kapitole mají anglické popisky kvůli použití v odborných příspěvcích na konferencích.

3.1 Model přenosu chyb z podkladových ploch kolejnic na výslednou osu

Zkoumáním přenosu chyb při montáži osy se zabývalo mnoho studovaných prací [21][22][23][24][25]. V této části práce bude sestaven matematický model, který umožní vypočítat výsledné odchylky míst pro valivá hnízda a středů suportu, jakožto i jeho úhlové chyby na základě znalosti jednotlivých odchylek přímosti kolejnice v místech styku kolejnic a hnízd. Tento model bude uvažovat uspořádání se dvěma kolejnicemi a celkem čtyřmi hnízdy vedení, vždy po dvou na jedné kolejnici. To je nejběžnější varianta lineární osy a v pozdějších modelech se bude v této konfiguraci vyskytovat na všech osách modelovaného stroje. Nejprve je ale důležité si uvést předpoklady, se kterými model bude pracovat.

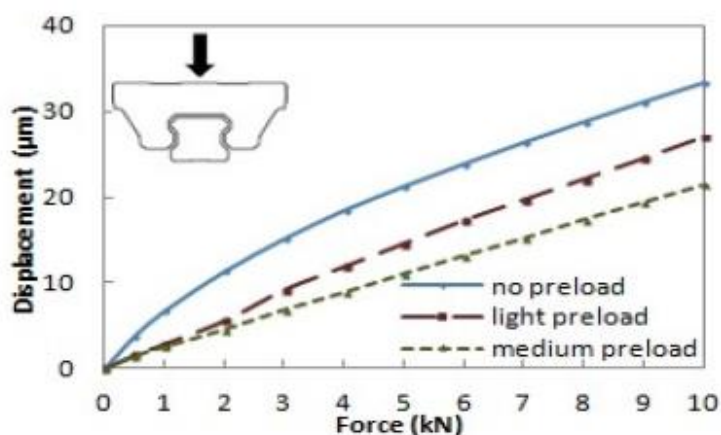
3.1.1 Předpoklady

Nejdůležitějším poznatkem a základním předpokladem pro sestavení tohoto modelu jsou závěry Zhonga [21], který uvádí, že kolejnice dotažená na podkladovou plochu nominálním momentem přebírá jeho průběh přímosti, a to téměř dokonale. Stejněho předpokladu bude užito i v horizontálním směru kolejnice, kde jsou pro dotažení používány přítlačné lišty nebo šrouby. V praxi se kolejnice v tomto směru nedotahují na nominální kroutící moment, ale seřizuje se přímo přímost dotahováním/povolováním jednotlivých šroubů podél kolejnice.

Další důležitý předpoklad je absolutní tuhost jak podkladového lože, tak pojízdného suportu – v praxi samozřejmě dochází k deformacím obou dílců, ale tento efekt bude v modelu zanedbán kvůli značné náročnosti výpočtu takových deformací.

Dále se předpokládají malé deformace a malé úhly. Lineární deformace se pohybují v řádu mikrometrů a chybové úhly v mikroradiánech, díky čemuž se dají linearizovat všechny trigonometrické funkce.

Posledním, ale neméně důležitým předpokladem je lineární závislost deformace valivých hnízd na zatěžující síle. Rahmani a Bleicher [26] se ve své práci zabývali právě studiem této závislosti. Linearita této závislosti podle jejich zjištění závisí na předpětí mechanismu, viz. Obr. 3.1.

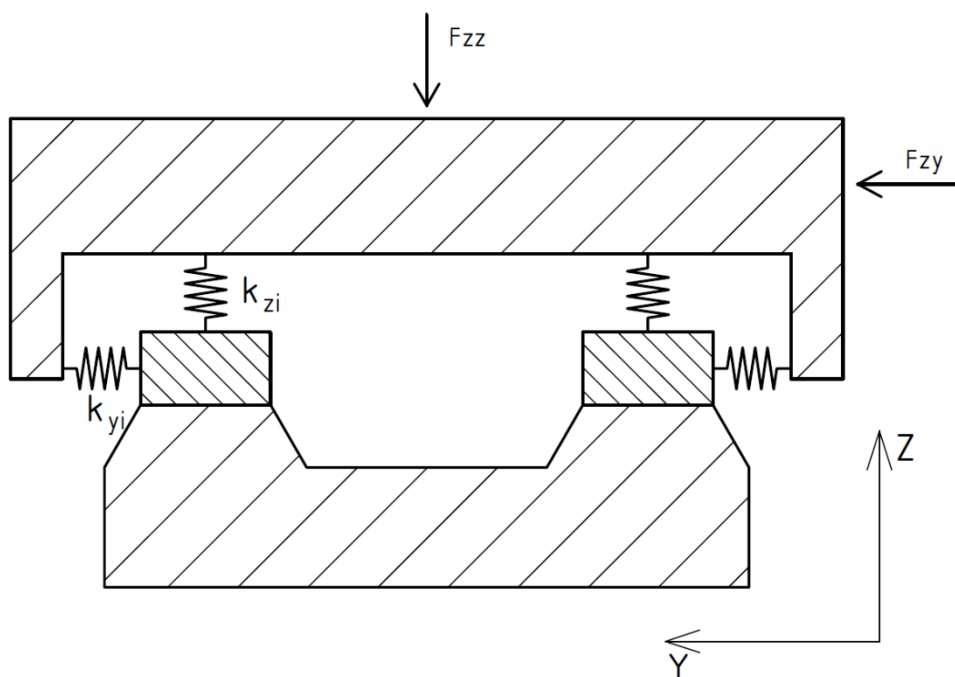


Obr. 3.1: Závislost deformace hnízd valivého vedení na zatěžující síle [26]

Obecně se považuje tuhost těchto hnízd za nelineární, nicméně předpokladem její konstantní hodnoty nevzniká velká chyba. Lineární chování tohoto systému je důležité kvůli pozdějšímu maticovému zápisu a výpočtu rovnic (lineární algebra požaduje lineární chování vstupních rovnic). U vozíků byly zároveň zanedbány klopné tuhosti.

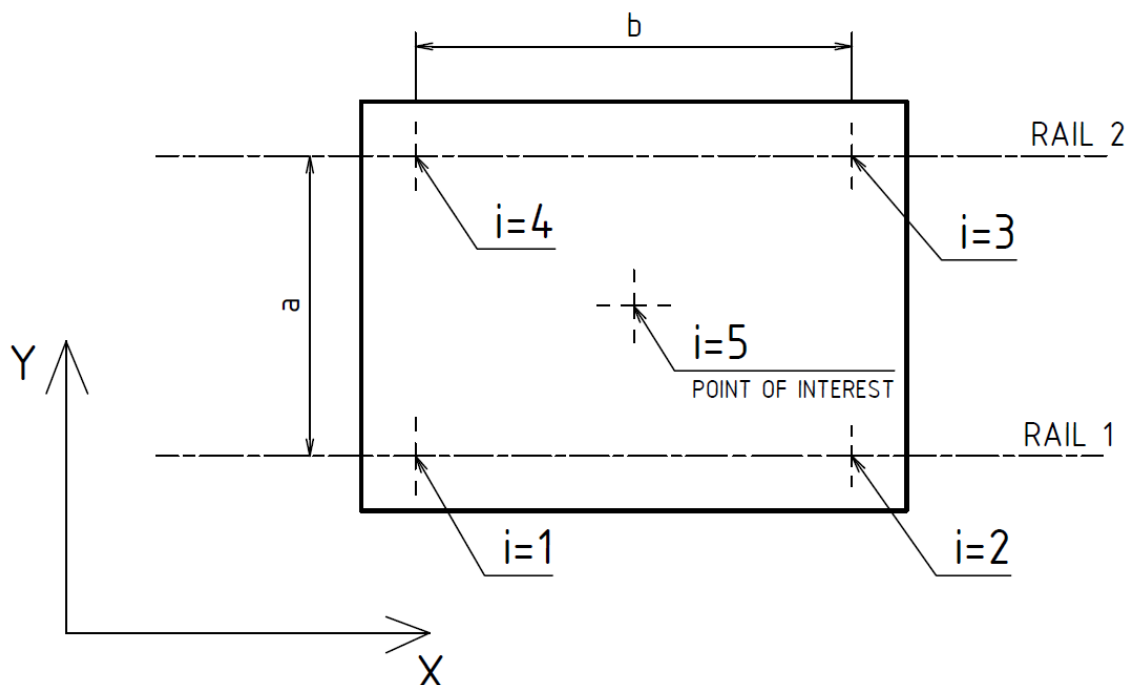
3.1.2 Schématický popis modelu

Je sestaven zjednodušený mechanický model suportu, lože, kolejnic a vozíků vedení. V modelu jsou vozíky nahrazeny lineárními pružinami s tuhostí ekvivalentní použitému vozíku v daném směru (horizontální a vertikální) a je zavedena vnější zatěžující síla v obou směrech. Nahrazení pružin a znázornění zatěžujících sil je na Obr. 3.2.



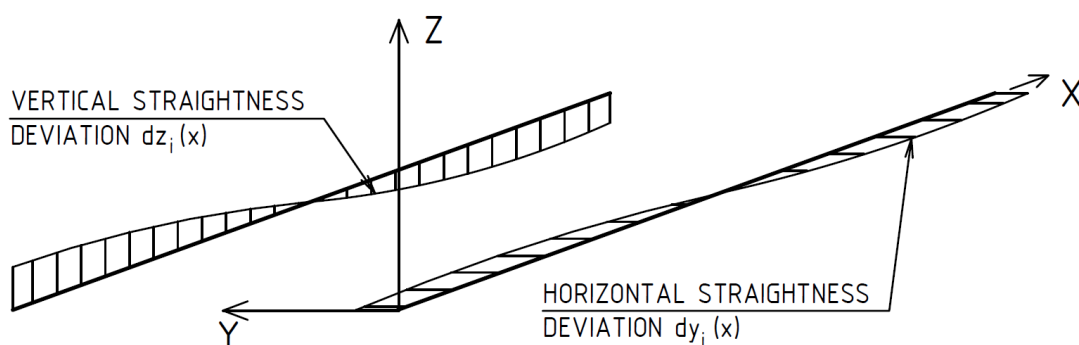
Obr. 3.2: Schéma znázorňující nahrazení vozíků pružinami + zavedení zatěžujících sil

Indexace jednotlivých vozíků (bodů na suptu), indexace kolejnic a označení klíčových rozměrů (rozestup kolejnic a rozteč vozíků na ose) je na Obr. 3.3 a bude dále v práci takto dále používáno.



Obr. 3.3: Indexace bodů hnízd valivého vedení, kolejnic a značení důležitých rozměrů

Každý vozík je pak v obecné chybové poloze vychýlen ve dvou směrech, ve vertikálním a v horizontálním směru kolejnice. Vertikálním směrem se rozumí odchylka ve směru osy Z a horizontálním směrem se rozumí odchylka ve směru osy Y, viz. Obr. 3.4.

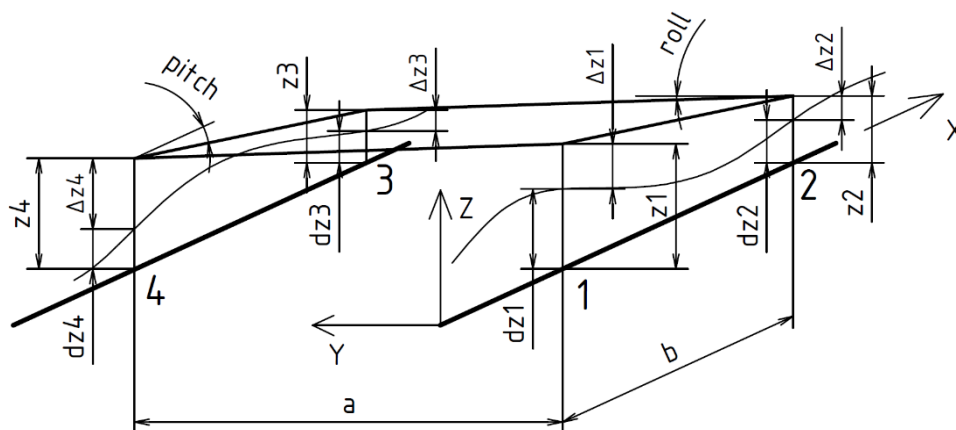


Obr. 3.4: Značení vertikální a horizontální odchylky

Pro další postup v odvozování tohoto matematického modelu je nutné si nakreslit suptu v obecné chybové poloze na ose X. V této poloze vzniká mezi suptem a kolejnicí odchylka polohy jednotlivých vozíků, která je součtem odchylky kolejnice a deformace vzniklé ve vozíku. Pro zjednodušení je postup rozdělen na dva výpočty, které jsou ve výsledku superponovány.

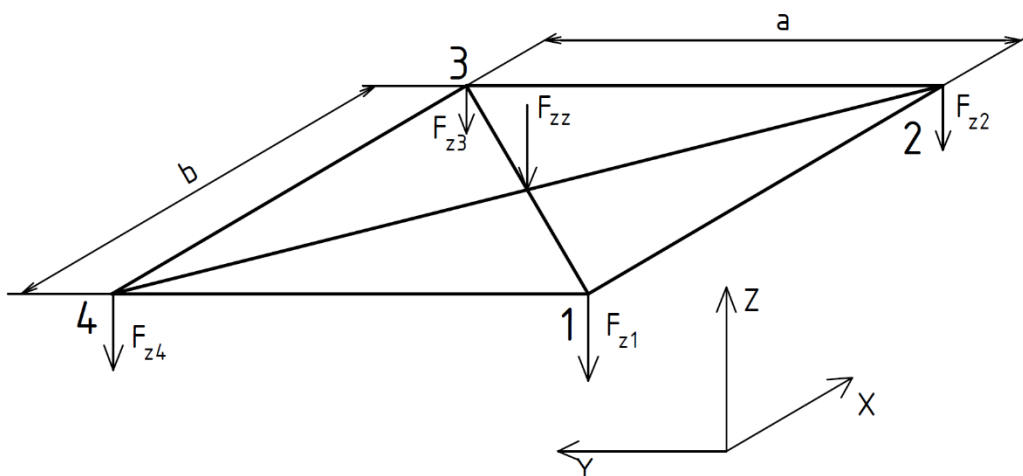
3.1.3 Výpočet silových účinků ve vertikálním směru

První výpočet se bude týkat pouze odchylek kolejnic ve vertikálním směru a souvisejících silových účinků. Sestava s těmito odchylkami (dz_i) a deformacemi (Δz_i) v obecné poloze je na Obr. 3.5.



Obr. 3.5: Náhradní mechanická soustava v obecné poloze, se zavedením odchylek kolejnic a deformací vozíků ve vertikálním směru

Dalším krokem je uvolnění suptu, ze kterého následně budou sestaveny rovnice silové rovnováhy. Uvolnění soustavy z Obr. 3.5 je na Obr. 3.6.



Obr. 3.6: Uvolnění náhradní soustavy, vertikální síly

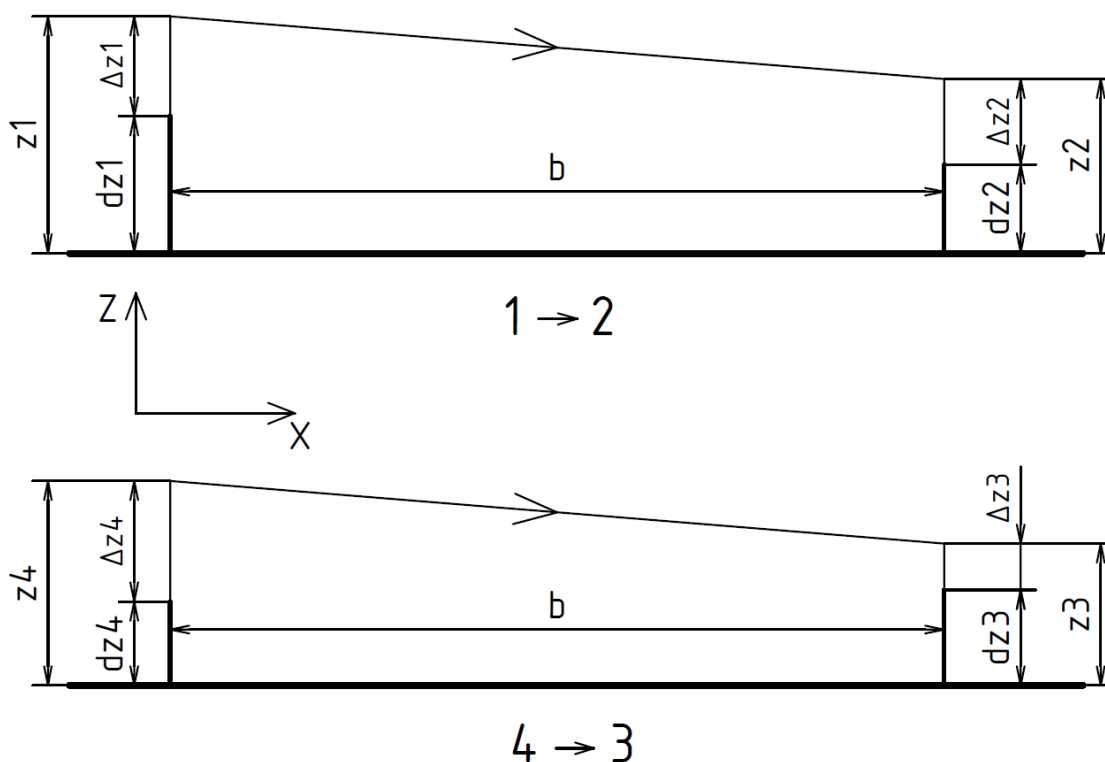
Pro toto uvolnění se sestaví rovnice rovnováhy sil ve směru osy Z (2) a rovnice momentové rovnováhy okolo osy X (3) a Y (4):

$$Z: F_{z1} + F_{z2} + F_{z3} + F_{z4} = -F_{zz} \quad (2)$$

$$M_X: a \cdot (F_{z1} + F_{z2}) = \frac{-F_{zz}}{2} \cdot a \quad (3)$$

$$M_Y: b \cdot (F_{z2} + F_{z3}) = \frac{-F_{zz}}{2} \cdot b \quad (4)$$

Tímto způsobem se získají tři lineární rovnice. Protože jsou ale v systému čtyři neznámé síly, je zapotřebí získat ještě jednu rovnici. Kvůli celkem čtyřem vozíčkům lineárního vedení se jedná o staticky neurčitý systém, hledaná rovnice bude zároveň deformační podmínkou. Ta je celkem jednoduchá na určení a vychází z předpokladu absolutní tuhosti těles – protože je suport absolutně tuhý, musí všechny hledané body ležet na jedné rovině, představující suport. Deformační podmínka je tedy podmínka koplanarity bodů představující hnízda valivého vedení. Její realizace bude provedena pomocí odchylkových vektorů – úhel sklonu hrany suportu jdoucí z rohu 1 do rohu 2 musí být stejný jako úhel sklonu hrany jdoucí z rohu 4 do rohu 3, případně stejná podmínka na kolmých hranách – úhel sklonu hrany suportu jdoucí z rohu 1 do rohu 4 musí být stejný, jako úhel sklonu hrany jdoucí z rohu 2 do rohu 3. Pro sestavení deformační podmínky byla vybrána první varianta, jejíž znázornění je na Obr. 3.7.



Obr. 3.7: Znázornění deformační podmínky vertikálního směru

Tato deformační podmínka se dá dále zjednodušit, díky stejné vzdálenosti bodů 1,2 a 2,3 na prostou podmínku stejného poklesu (5)

$$z_1 - z_2 = z_4 - z_3 \quad (5)$$

Díky Obr. 3.7 lze dále tyto souřadnice rozepsat na jejich komponenty odchylek a deformací (6).

$$d_{z1} + \Delta_{z1} - d_{z2} - \Delta_{z2} = d_{z4} + \Delta_{z4} - d_{z3} - \Delta_{z3} \quad (6)$$

Složky deformace jednotlivých vozíků se dále musí rozepsat pomocí jednotlivých silových účinků a tuhostí, podle základního vztahu (7).

$$\Delta_{zi} = \frac{F_{zi}}{k_{zi}}; \quad i = \{1,2,3,4\} \quad (7)$$

Získáváme tak kompletní rovnici se silovými účinky, která je hledanou deformační podmínkou a čtvrtou statickou rovnicí (8).

$$d_{z1} + \frac{F_{z1}}{k_{z1}} - d_{z2} - \frac{F_{z2}}{k_{z2}} = d_{z4} + \frac{F_{z4}}{k_{z4}} - d_{z3} - \frac{F_{z3}}{k_{z3}} \quad (8)$$

Nyní jsou všechny rovnice kompletní. Po jednoduché úpravě a uspořádání rovnic vyháží finální lineární sestava rovnic následovně (9)(10)(11)(12).

$$F_{z1} + F_{z2} + F_{z3} + F_{z4} = -F_{zz} \quad (9)$$

$$F_{z1} + F_{z2} = \frac{-F_{zz}}{2} \quad (10)$$

$$F_{z2} + F_{z3} = \frac{-F_{zz}}{2} \quad (11)$$

$$\frac{F_{z1}}{k_{z1}} - \frac{F_{z2}}{k_{z2}} + \frac{F_{z3}}{k_{z3}} - \frac{F_{z4}}{k_{z4}} = -d_{z1} + d_{z2} - d_{z3} + d_{z4} \quad (12)$$

Pro zjednodušení zápisu lze rovnice zapsat v maticovém tvaru (13), který je vhodnější pro zápis do matematických řešičů, např. Matlab.

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ \frac{1}{k_{z1}} & -\frac{1}{k_{z2}} & \frac{1}{k_{z3}} & -\frac{1}{k_{z4}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{z1} \\ F_{z2} \\ F_{z3} \\ F_{z4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -F_{zz} \\ -F_{zz} \\ \frac{F_{zz}}{2} \\ -\frac{F_{zz}}{2} \\ -d_{z1} + d_{z2} - d_{z3} + d_{z4} \end{bmatrix} \quad (13)$$

V maticovém zápisu se pojmenují jednotlivé matice a vektory \underline{K} , \underline{E} a \underline{Q}_z čímž se získá jednoduchá maticová rovnice (14), jejíž úpravou se získá vztah pro výpočet silových účinků v sestavě při zadaných odchylkách (15).

$$\underline{K}_z \cdot \underline{F}_z = \underline{Q}_z \quad (14)$$

$$\underline{F}_z = \underline{K}_z^{-1} \cdot \underline{Q}_z \quad (15)$$

Ze získaných silových účinků lze dopočítat celkové odchylky rohů suportu (16) a odchylku středu suportu, který je brán jako porovnávací a charakteristický bod (17).

$$z_i = d_{zi} + \frac{F_{zi}}{k_{zi}}; \quad i = \{1,2,3,4\} \quad (16)$$

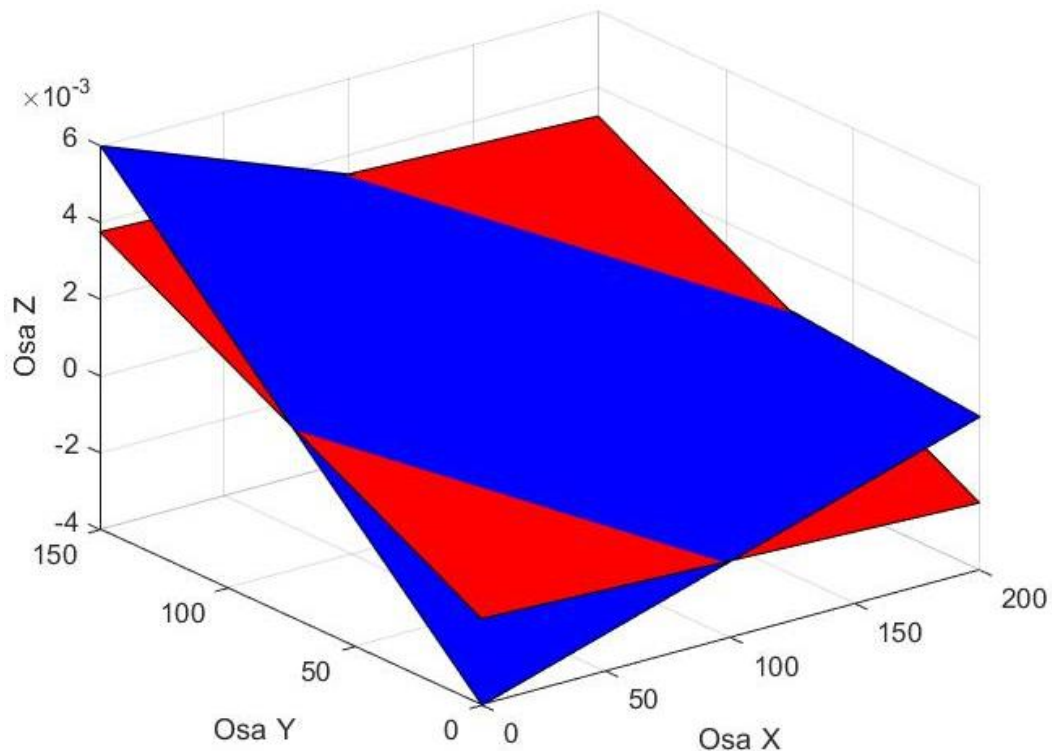
$$z_5 = \frac{z_1 + z_2 + z_3 + z_4}{4} \quad (17)$$

Ze získaných odchylek rohů suportu se dají spočítat i dvě úhlové geometrické chyby, klopení a klonění, angl. roll a pitch. K určení jejich velikosti by se za normálních okolností použila funkce tangens, ale vzhledem k malým chybovým úhlům je tato funkce linearizována a tyto chyby lze tak zjednodušeně zapsat takto (18)(19).

$$roll = \frac{z_4 - z_1}{a} \quad (18)$$

$$pitch = \frac{z_2 - z_1}{b} \quad (19)$$

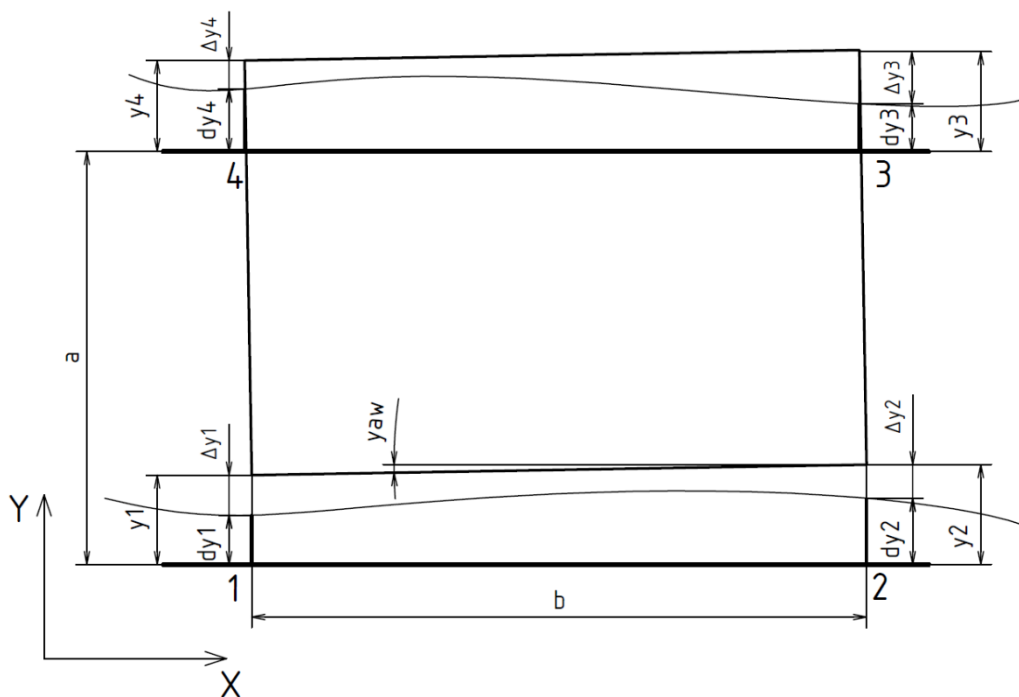
Vizuálně lze tento model ověřit jeho zobrazením pro příkladové odchylky. Pro suport o rozměrech $a = 150$ mm, $b = 200$ mm, vstupní odchylky $d_{z1} = 0,006$ mm, $d_{z2} = 0,001$ mm, $d_{z3} = 0$ mm a $d_{z4} = -0,004$ mm a tuhost $100\,000$ N/mm všech vozíků je vizualizace na Obr. 3.8. Modrá plocha je spojnicí vstupních odchylek a červená plocha spojuje body výsledné polohy suportu. Na tomto obrázku je důležité sledovat, jestli je červená plocha rovinná.



Obr. 3.8: Vizualizace výsledné roviny pro vertikální odchylky

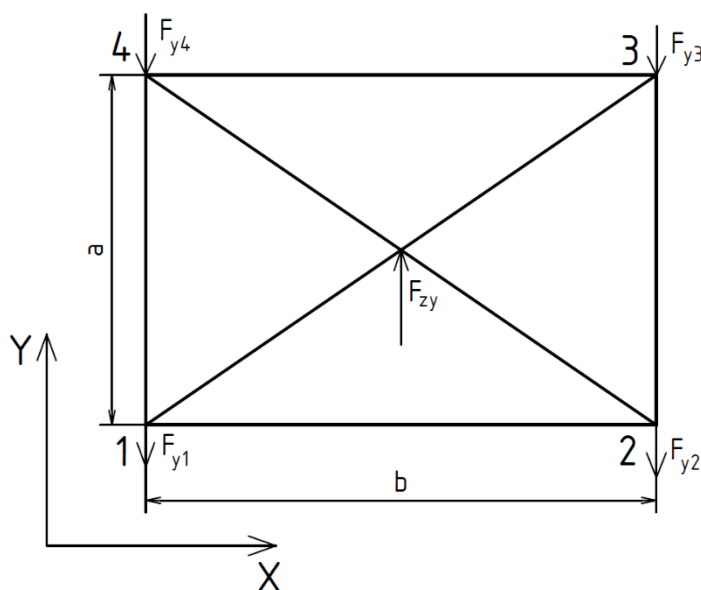
3.1.4 Výpočet silových účinků v horizontálním směru

Druhý, obdobný výpočet se provede pro silové účinky v horizontálním směru kolejnic. Sestava s těmito odchylkami (dy_i) a deformacemi (Δy_i) v obecné poloze je na Obr. 3.9.



Obr. 3.9: Náhradní mechanická soustava v obecné poloze, se zavedením odchylek kolejnic a deformací vozíků v horizontálním směru

Dalším krokem je opět uvolnění sestavy z Obr. 3.9, které je na Obr. 3.10. V tomto případě se dají získat pouze dvě rovnice rovnováhy – silová rovnice ve směru osy Y (20) a momentová rovnice k bodu 1 (21).



Obr. 3.10: Uvolnění náhradní soustavy, horizontální síly

$$Y: F_{y1} + F_{y2} + F_{y3} + F_{y4} = F_{zy} \quad (20)$$

$$M_1: b \cdot (F_{y2} + F_{y3}) = \frac{F_{zy}}{2} \cdot b \quad (21)$$

Uvolněním vznikly pouze dvě rovnice, ale opět jsou celkem čtyři neznámé. Je potřeba najít ještě další dvě rovnice, které budou opět deformačními podmínkami. Deformační podmínky opět vychází z předpokladu absolutně tuhých těles. Protože jsou protější body (1 a 4, 2 a 3) na suportu pevně spojeny absolutně tuhým tělesem a kolejnice s odchytkou jsou také absolutně tuhé, musí pro tyto protilehlé body platit podmínka stejné deformace, tedy vyjádřeno rovnicemi musí platit (22) a (23):

$$y_1 = y_4 \quad (22)$$

$$y_2 = y_3 \quad (23)$$

Tyto podmínky se dále rozepíší podle Obr. 3.9 na složky odchytky kolejnice a deformace vozíku (24)(25):

$$d_{y1} + \Delta_{y1} = d_{y4} + \Delta_{y4} \quad (24)$$

$$d_{y2} + \Delta_{y2} = d_{y3} + \Delta_{y4} \quad (25)$$

Složky deformace se poté musí rozepsat vzhledem k příslušným silovým účinkům a tuhostem podle vztahu (26)

$$\Delta_{yi} = \frac{F_{yi}}{k_{yi}}; \quad i = \{1,2,3,4\} \quad (26)$$

Rozepsáním deformací se tak získají obě dvě kompletní deformační podmínky (27)(28)

$$d_{y1} + \frac{F_{y1}}{k_{y1}} = d_{y4} + \frac{F_{y4}}{k_{y4}} \quad (27)$$

$$d_{y2} + \frac{F_{y2}}{k_{y2}} = d_{y3} + \frac{F_{y3}}{k_{y3}} \quad (28)$$

Tím jsou všechny statické rovnice kompletní a sestava rovnic je řešitelná. Algebraickou úpravou rovnic je získána jejich finální podoba (29)(30)(31)(32)

$$F_{y1} + F_{y2} + F_{y3} + F_{y4} = F_{zy} \quad (29)$$

$$F_{y2} + F_{y3} = \frac{F_{zy}}{2} \quad (30)$$

$$\frac{F_{y1}}{k_{y1}} - \frac{F_{y4}}{k_{y4}} = -d_{y1} + d_{y4} \quad (31)$$

$$\frac{F_{y2}}{k_{y2}} - \frac{F_{y3}}{k_{y3}} = -d_{y2} + d_{y3} \quad (32)$$

Pro zjednodušení zápisu lze opět tyto rovnice zapsat v jejich maticovém tvaru (33)

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ \frac{1}{k_{y1}} & 0 & 0 & -\frac{1}{k_{y4}} \\ 0 & \frac{1}{k_{y2}} & -\frac{1}{k_{y3}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{y1} \\ F_{y2} \\ F_{y3} \\ F_{y4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{zy} \\ \frac{F_{zy}}{2} \\ -d_{y1} + d_{y4} \\ -d_{y2} + d_{y3} \end{bmatrix} \quad (33)$$

V maticovém zápisu se jednotlivé matice pojmenují \underline{K} , \underline{E} , a \underline{Q} (34), aby se dále dalo zapsat maticové řešení soustavy rovnic (35)

$$\underline{K}_y \cdot \underline{F}_y = \underline{Q}_y \quad (34)$$

$$\underline{F}_y = \underline{K}_y^{-1} \cdot \underline{Q}_y \quad (35)$$

Po získání všech silových účinků se vypočtou celkové odchylky v rozích suportu podle vzorce (36) a odchylka středu suportu (37), která slouží jako výstupní a porovnávací hodnota

$$y_i = d_{yi} + \frac{F_{yi}}{k_{yi}} ; \quad i = \{1,2,3,4\} \quad (36)$$

$$y_5 = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + y_4}{4} \quad (37)$$

V této rovině se z odchylek dá dopočítat poslední úhlová chyba, a to sice vybočení, angl. yaw. Vzhledem k malým úhlům se dá vypočítat přímo takto (38):

$$yaw = \frac{y_1 - y_2}{b} \quad (38)$$

Vstupem do obou modelů jsou měřené chyby přímosti podkladové plochy kolejnice lineárního vedení strojní osy, které jsou závislé na zdvihu a které se v dalším kroku nahradí náhodným simulovaným profilem.

3.2 Generování náhodných chybových profilů podkladových ploch kolejnic

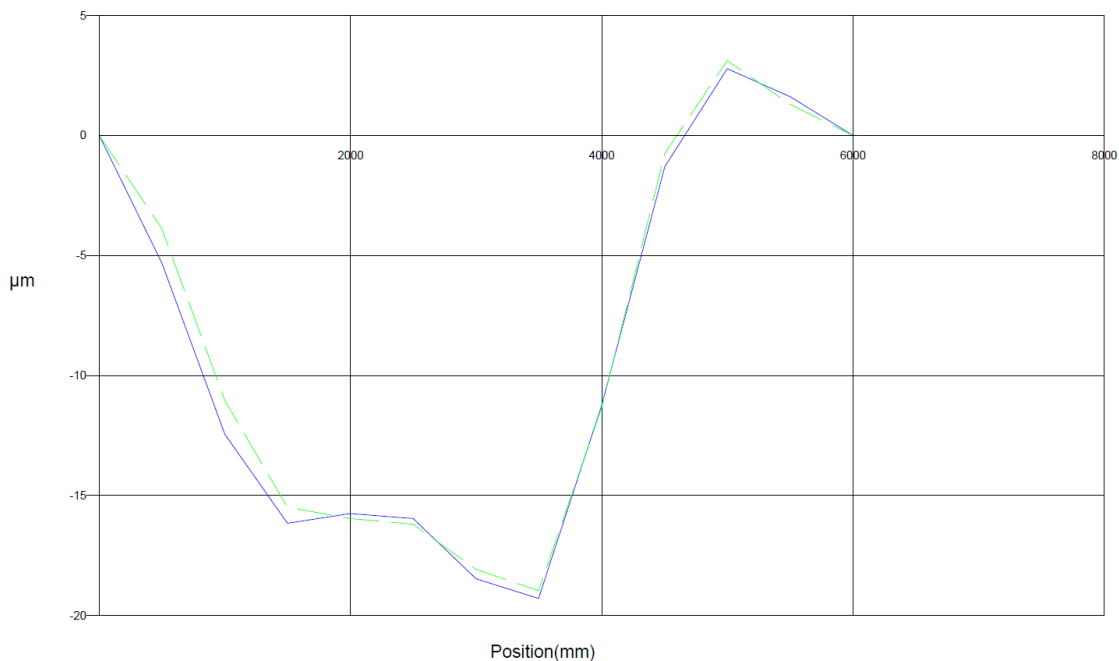
Výpočetní jádro předchozího modelu lze dále zužitkovat pro výpočet odchylek středu suportu v celém zdvihu osy, pokud jsou k dispozici průběhy přímosti kolejnic, potažmo podkladových ploch, které se na kolejnice téměř dokonale přenáší [21]. Protože obecně není k dispozici mnoho dat, na kterých by se dal model spouštět, bude vytvořen generátor náhodných průběhů přímosti podkladových ploch kolejnic. Na základě generovaných profilů bude možnost zkoumat výsledný průběh odchylek složené osy a na tomto průběhu pozorovat efekt průměrování chyb vedením.

Majda [24] a Rahmani a Bleicher [23] do svých simulací zaváděli chyby velice obecného průběhu, v obou případech se jednalo o jednoduché průběhy lineárního charakteru. Průběhy takového charakteru se na strojích většinou nevyskytují. Trochu komplexnější přístup zvolili Tong [22] a Ni [25], kteří modelovali chybový průběh tvarem funkce sinus, nebo složeným signálem z několika sinusových funkcí.

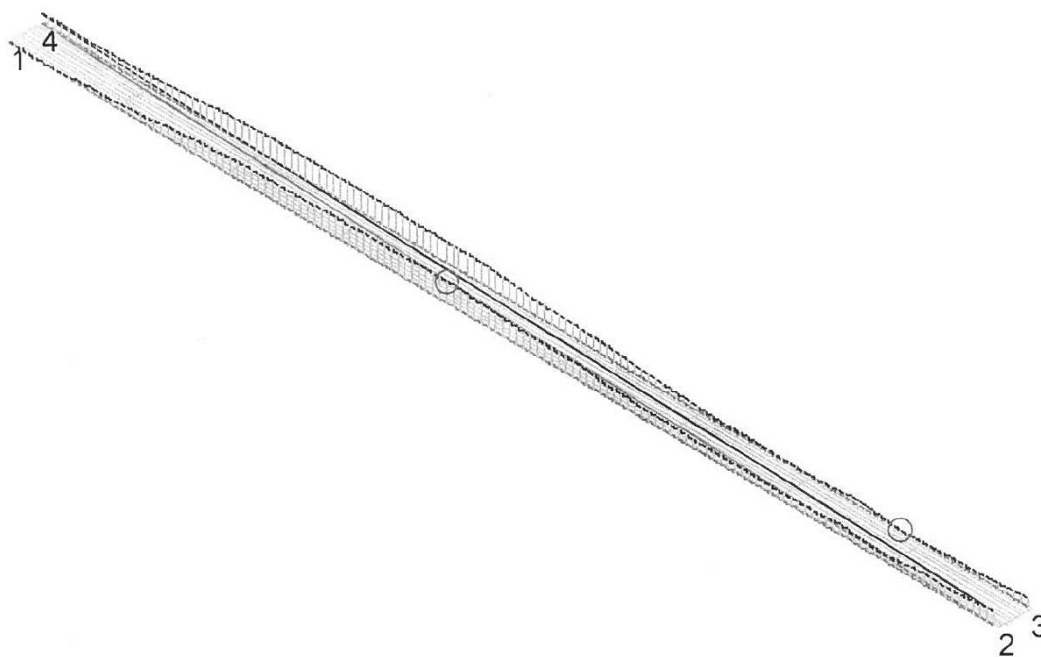
Ve skutečnosti jsou ale chybové profily velice obecné křivky, které spíše připomínají přibližný časový záznam nějakého signálu. Pro správný návrh generátoru takových profilů je nutné se nejdříve seznámit s co největším vzorkem měřených přímostí na podkladových plochách skutečných strojů a z toho odvodit, jakým způsobem je modelovat.

3.2.1 Výběr měřených přímostí podkladových ploch

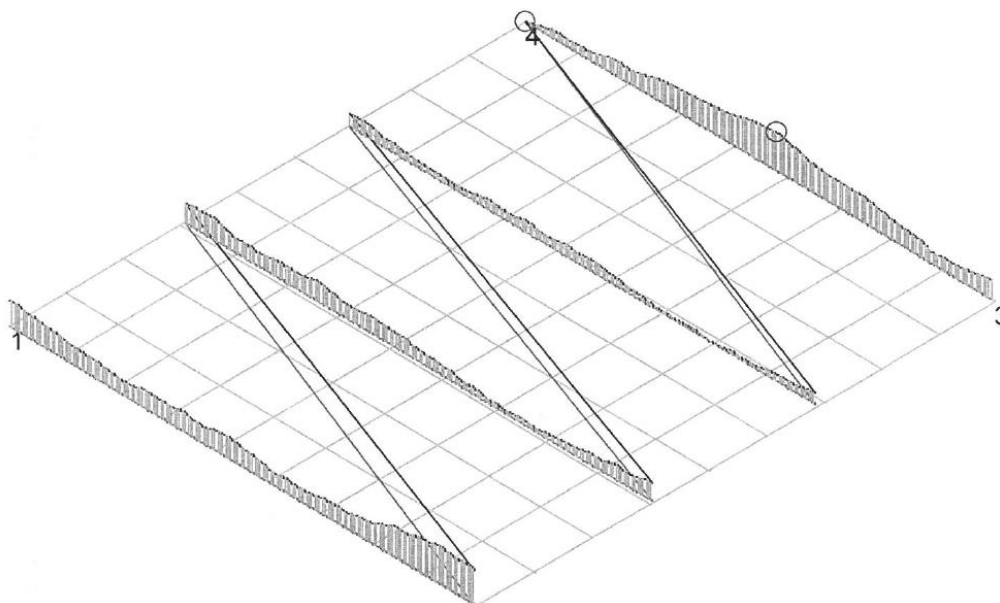
Pro ukázkou, jak měřené plochy vypadají ve skutečnosti, bude uveden výběr skutečných podkladových ploch některých strojů. Měřené hodnoty a podklady pro tuto kapitolu byly poskytnuty vedoucím práce.



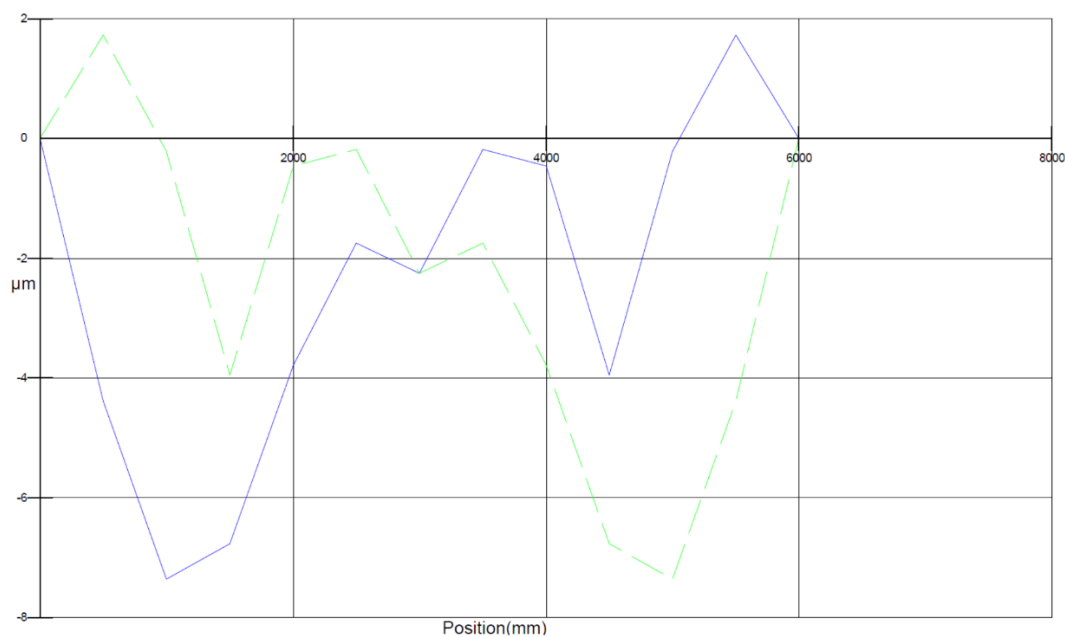
Obr. 3.11: Přímost podkladu vedení brusky s délkou kolejnic 6 000 mm



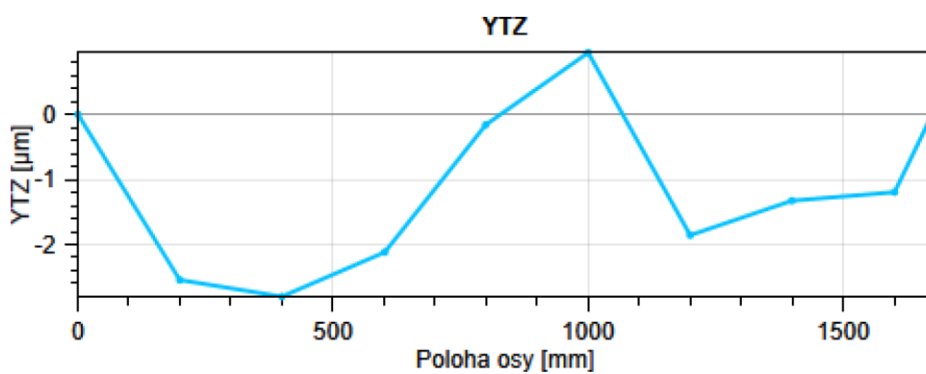
Obr. 3.12: Rovinnost podkladu hydrostatického vedení experimentálního standu. Délka kolejnice 1 400 mm, rovinnost 0,007 mm



Obr. 3.13: Přímost ploch pro kolejnice osy Y vertikálního obráběcího centra, délka kolejnice 1 900 mm, přímost 0,014 mm



Obr. 3.14: Přímost podkladu vedení brusky, délka kolejnice 6 000 mm



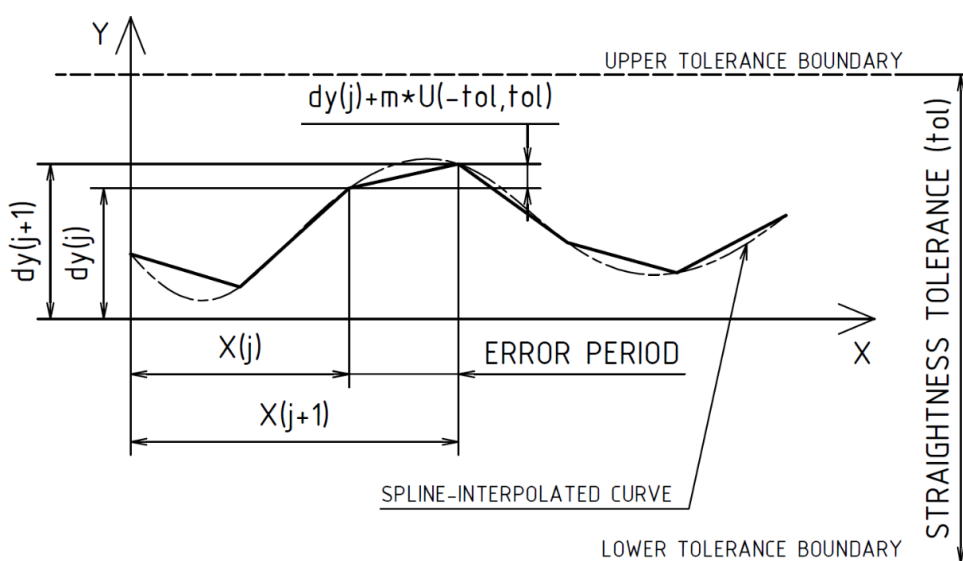
Obr. 3.15: Přímost plochy pro kolejnici vertikálního obráběcího centra, délka kolejnice 1 700 mm

Z výše uvedených průběhů (Obr. 3.11, Obr. 3.12, Obr. 3.13, Obr. 3.14 a Obr. 3.15) lze pro další práci odhadnout obecný charakter chybové křivky, který se po sléze použije k modelování náhodných chybových profilů podkladových ploch. Jedná se sice o křivky rozličných strojů s různými vlastnostmi a přesnostmi, ale několik vlastností platí pro všechny:

- Nejedná se o změť náhodně rozmístěných bodů, které by byly propojeny úsečkami
- Křivka má jistý vývoj, který není ale predikovatelný bez znalosti výrobní technologie
- Chybový profil je délkově i výškově škálovatelný
- Na křivce lze sledovat frekvence změny chyby, neboli jak často mění výrazněji svou hodnotu
- Dají se také sledovat velikosti přírůstků v jednotlivých bodech měření

3.2.2 Modelování náhodného chybového profilu podkladové plochy

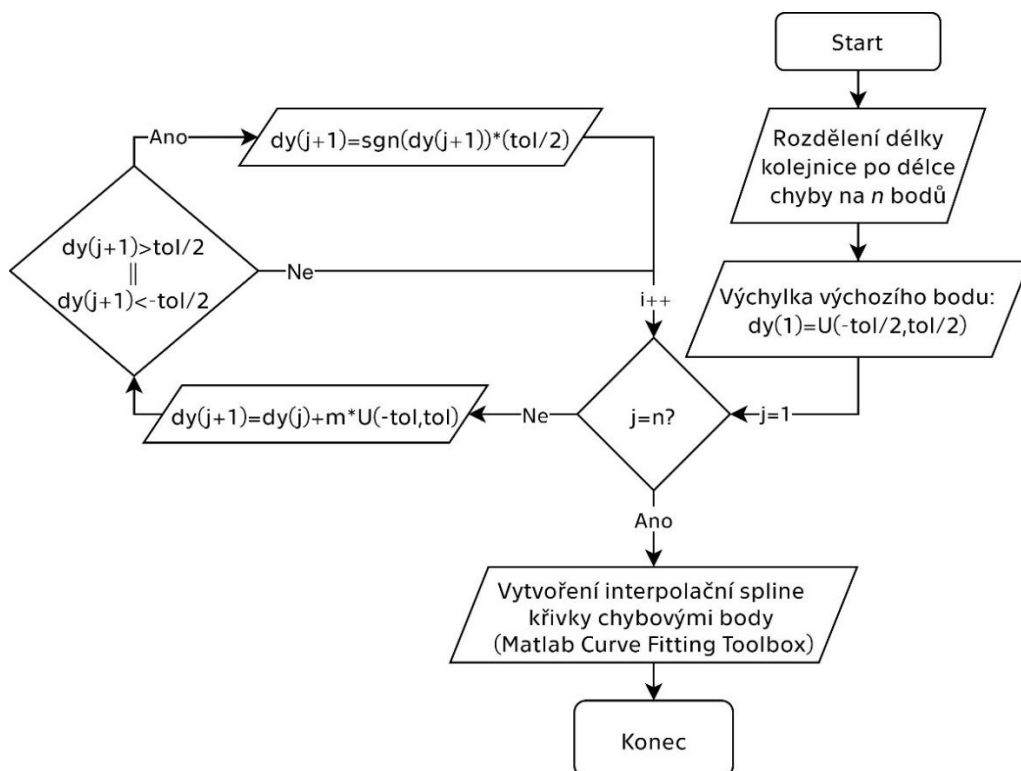
V této části bude vytvořen algoritmus, který bude produkovat náhodné, avšak tvarově podobné křivky těm ukázkovým z kapitoly 3.2.1. Nejdůležitějším vstupním parametrem je požadovaná tolerance přímosti – tedy maximální peak to peak hodnota generované křivky. To odpovídá požadavku z výkresové dokumentace, který se na tyto podkladové plochy předepisuje, právě pro zaručení geometrické přesnosti a budoucí dobré volumetrické přesnosti stroje. Ze studovaných profilů vplynuly další dva vstupní parametry – perioda chyby a velikost změny chyby. Tyto dva parametry vyjadřují, jak často se na křivce profilu mění chyba a jaká je velikost této změny. Posledním a samozřejmým parametrem je délka kolejnice, která vychází z velikosti suportu a zdvihu dokončené osy.



Obr. 3.16: Schéma a princip generování náhodných profilů

Jak již bylo řečeno, křivka chybového profilu není jen interpolovaná směs náhodných bodů podél kolejnice, ale má jistý vývoj. Generování náhodné křivky profilu probíhá tak, že se délka kolejnice rozdělí na určitý počet bodů, které jsou od sebe vzdáleny jednu periodu chyby a pak se zvolí náhodný výchozí bod uvnitř tolerančního pásma. Výchylka každého dalšího bodu je pak součtem té předchozí a náhodného přírůstku, který je náhodnou hodnotou z intervalu od záporné hodnoty tolerance do kladné hodnoty tolerance, přenásobený násobitelem vyjadřujícím velikost změny. Vizualizace je na Obr. 3.16. Pro výběr náhodného čísla z intervalu platí rovnoměrné pravděpodobnostní rozdělení a pro zajištění tolerance přímosti je vždy kontrolována podmínka, jestli výchylka aktuálního bodu nepřesahuje mezní hodnoty tolerančního pásma. Pokud tomu tak je, nastaví se její hodnota na krajní hodnotu příslušného tolerančního pásma. Po stanovení odchylek ve všech bodech podél kolejnice se tyto body proloží hladkou spline křivkou, kvůli pozdějšímu jemnějšímu simulování, pro které by byla lineární interpolace příliš hrubá a protože bude více odpovídat skutečnosti. Proces generování náhodných profilů je blíže popsán ve vývojovém diagramu na Obr. 3.17, případně výpočet vychylek jednotlivých bodů vztahem (39), kde Y je hodnota výchylky, m je násobitel (obvykle v rozmezí 0-1), funkce U generuje náhodná čísla v příslušném intervalu s rovnoměrným pravděpodobnostním rozdělením a tol je hodnota předepsané tolerance přímosti.

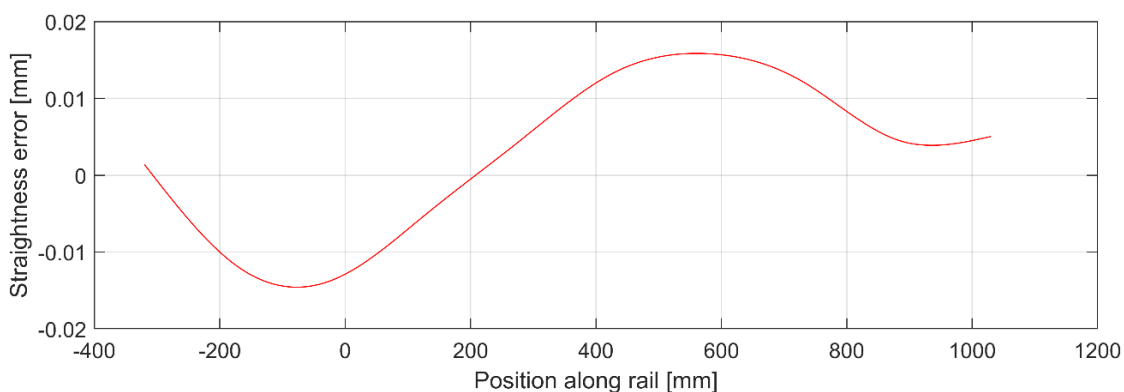
$$dy(j + 1) = dy(j) + m \cdot U(-tol, tol) \tag{39}$$



Obr. 3.17: Kompletní vývojový diagram procesu generování chybových profilů

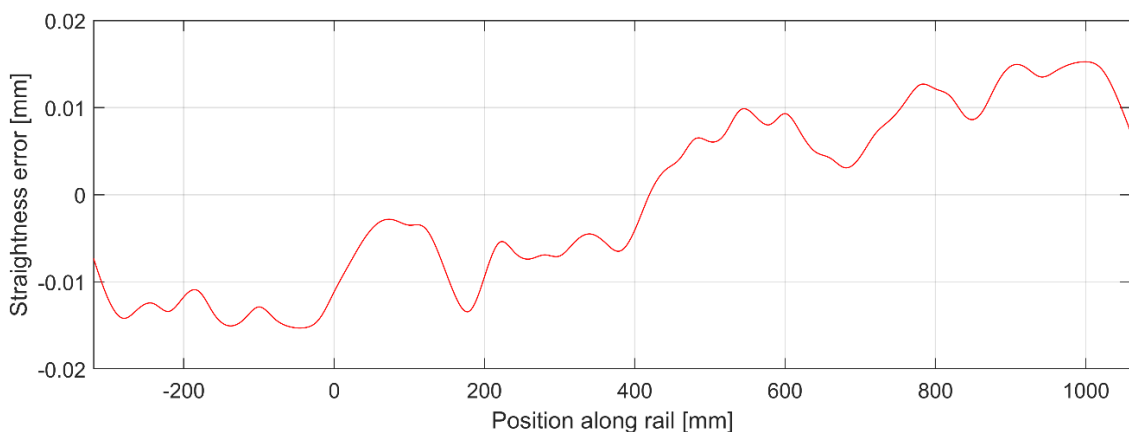
Tento proces generování náhodných chybových profilů podkladových ploch pro kolejnice se dá využít jak pro normálový podklad (vertikální směr chyb) tak pro boční podklad (horizontální směr chyb). Díky tomu, že jsou chybové body v posledním kroku proloženy hladkou spline křivkou, vzniká tak spojitá funkce přímosti umožňující odečítání výchyly v libovolném bodě zdvihu osy. Tato funkce má ale omezený obor platnosti, je definována pouze na intervalu $\{-b/2; zdvih + b/2\}$ a v jeho blízkém okolí.

Tato funkce produkuje tvarově podobné profily těm ukázkovým, např. pro délku kolejnice 1 350 mm, toleranci přímosti 0,03 mm, periodu chyby 150 mm a násobitel chyby m 0,6 vypadá jeden z generovaných profilů (Obr. 3.18) jako skutečný profil na Obr. 3.15.



Obr. 3.18: Jeden z generovaných profilů

Pro stejnou délku kolejnice a toleranci přímosti se může vyzkoušet vliv vstupních parametrů periody chyby a jejího násobitele, např. perioda chyby 20 mm a násobitel 0,2 generuje profily s vysokofrekvenčními chybami (Obr. 3.19)



Obr. 3.19: Generovaný profil s vysokou frekvencí chyb

Pro další modelování se volí hodnota periody chyby 100 mm a násobitel 0,5. Tyto dvě hodnoty produkuje profily, které jsou univerzálně podobné měřeným profilům.

3.2.3 Zavedení náhodných chybových profilů do modelu přenosu chyb

Díky tomu, že výsledkem generátoru profilů je spojitá funkce, jí lze použít přímo pro výpočet odchylek jednotlivých bodů vozíků v závislosti na zdvihu osy. Pro každou strojní osu se generují celkem čtyři profily: pro každou ze dvou kolejnic vždy vertikální a horizontální přímot. Jednotlivé odchylky vozíků ve vertikálním směru se pak dají snadno určit podle vztahů (40)(41)(42)(43). Odchylky v horizontálním směru se určí podle vztahů (44)(45)(46)(47).

$$d_{z1}(x) = \text{Rail 1 vertical straightness fcn}(x - b/2) \quad (40)$$

$$d_{z2}(x) = \text{Rail 1 vertical straightness fcn}(x + b/2) \quad (41)$$

$$d_{z3}(x) = \text{Rail 2 vertical straightness fcn}(x + b/2) \quad (42)$$

$$d_{z4}(x) = \text{Rail 2 vertical straightness fcn}(x - b/2) \quad (43)$$

$$d_{y1}(x) = \text{Rail 1 horizontal straightness fcn}(x - b/2) \quad (44)$$

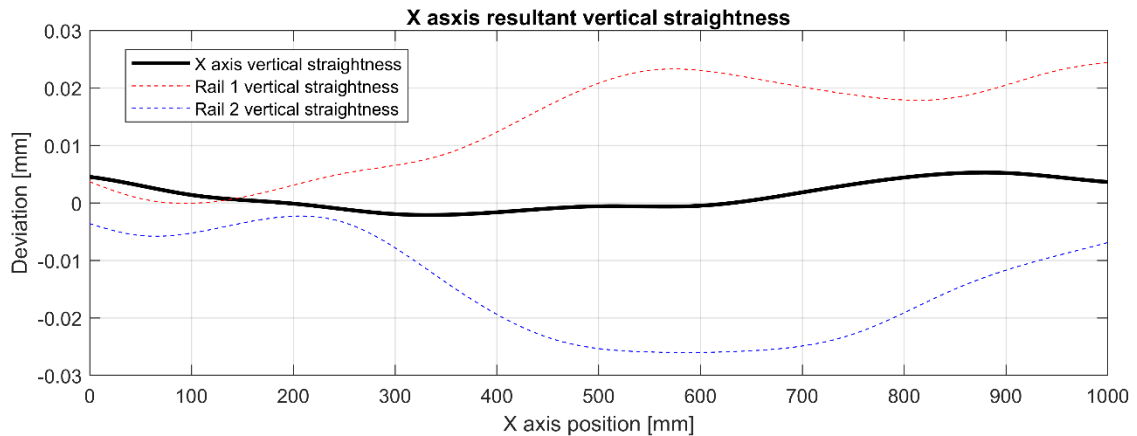
$$d_{y2}(x) = \text{Rail 1 horizontal straightness fcn}(x + b/2) \quad (45)$$

$$d_{y3}(x) = \text{Rail 2 horizontal straightness fcn}(x + b/2) \quad (46)$$

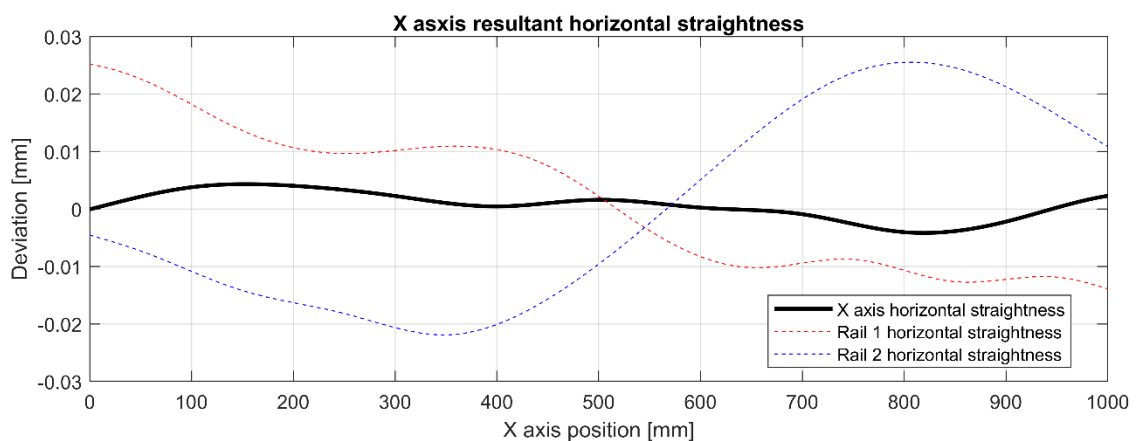
$$d_{y4}(x) = \text{Rail 2 horizontal straightness fcn}(x - b/2) \quad (47)$$

Výpočtem celkových odchylek přímot z_5 a y_5 podle vztahů (17) a (37) včetně úhlových chyb *roll*, *pitch* a *yaw* podle vztahů (18), (19) a (38) odvozených v kapitole 3.1 se získá kompletní popis průběhu pěti geometrických chyb osy v závislosti na zdvihu. Nutno podotknout, že lze zvolit různé tolerance přímot pro vertikální a horizontální přímot v rámci jedné osy. V samotném Matlab kódu tohoto modelu je pak ještě možnost určit, jestli na některé kolejnici v některém směru se chyba přímot nemá vyskytovat a lze tak například umístit chybový profil pouze na jednu kolejnici v jednom směru. Z průběhu celkových odchylek přímot z_5 a y_5 se dá odečíst jejich peak to peak hodnota a zjistit tak celkovou výslednou přímot osy, která se dá porovnat se vstupní přímotí a pozorovat procento zlepšení. Kompletní výstup z tohoto modelu je na Obr. 3.20, Obr. 3.21 a na Obr. 3.22. Vstupní tolerance přímot do tohoto modelu byla 0,05 mm ve vertikálním i horizontálním směru, zdvih osy 1 000 mm, rozměry suportu $a = 400$ mm, $b = 500$ mm, stejná tuhost všech vozíků, perioda chyby 100 mm a násobitel chyby 0,5. Do simulace nebyla vnesena vnější zátěžná síla. Výsledná výstupní

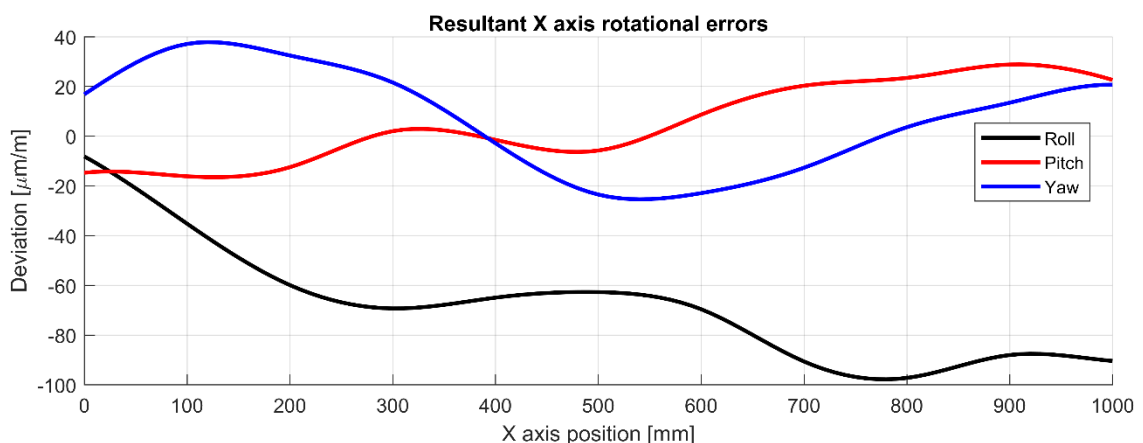
přímota ve vertikálním směru byla 0,007 mm a v horizontálním směru 0,008 mm, což odpovídá zlepšení o 79 %, respektive 82 % oproti skutečné přímoti generovaných profilů.



Obr. 3.20: Výstupní vertikální přímota, včetně zobrazení původní přímoti kolejnic



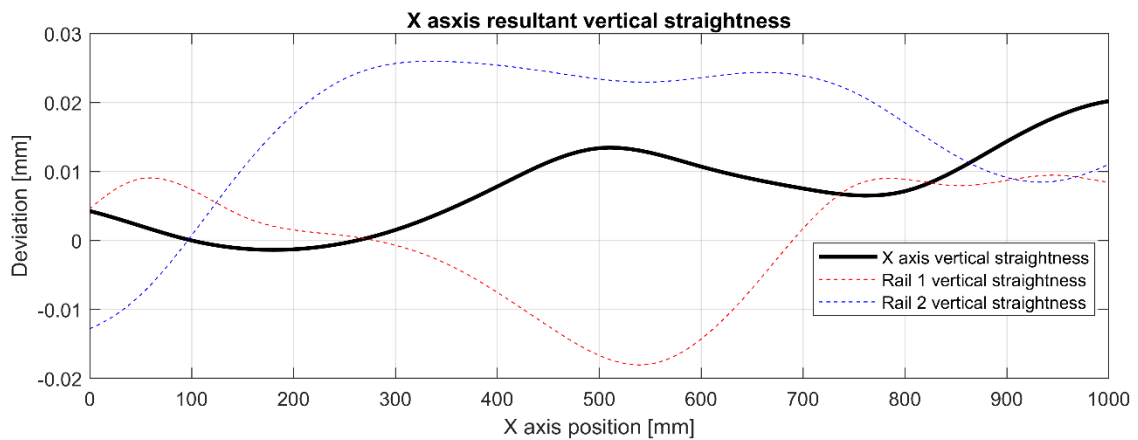
Obr. 3.21: Výstupní horizontální přímota, včetně zobrazení původní přímoti kolejnic



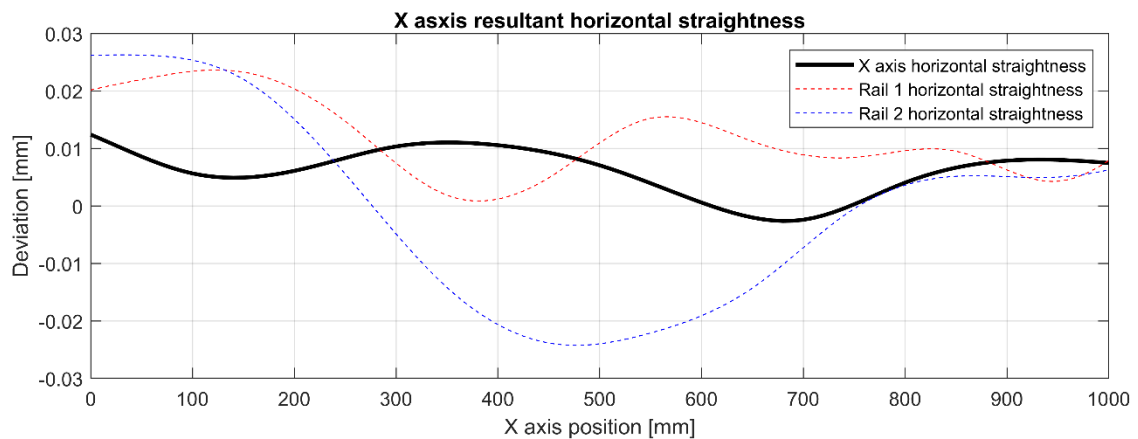
Obr. 3.22: Výstupní rotační geometrické chyby

Pro úplnou představu o výstupech jsou na dalších obrázcích (Obr. 3.23, Obr. 3.24 a Obr. 3.25) kompletní geometrické chyby další simulace se stejnými vstupními parametry. Tentokrát je výsledná přímota ve vertikálním

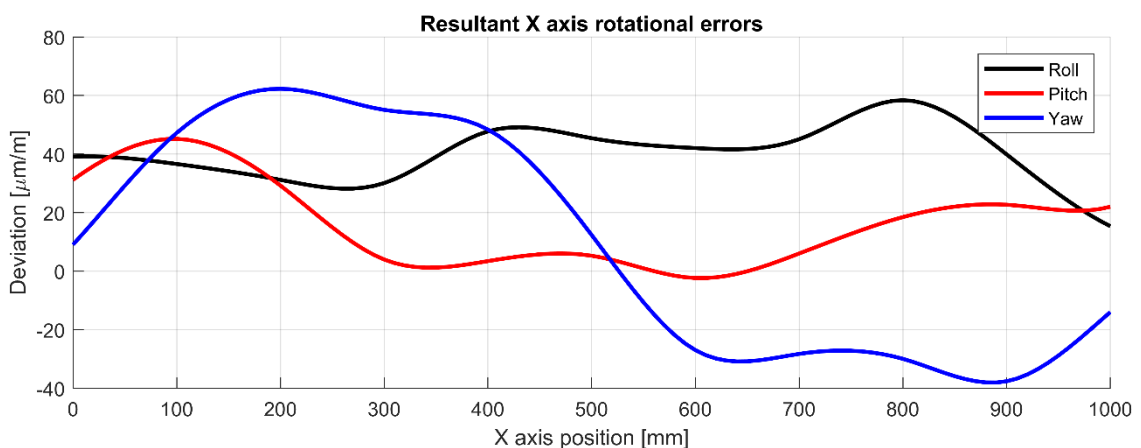
směru 0,022 mm a v horizontálním směru 0,015 mm, což odpovídá zlepšení o 51 %, respektive o 70 % oproti přímosti generovaných profilů přímosti.



Obr. 3.23: Další výstupní vertikální přímost, včetně zobrazení původní přímosti kolejnic



Obr. 3.24: Další výstupní horizontální přímost, včetně zobrazení původní přímosti kolejnic



Obr. 3.25: Další výstupní rotační geometrické chyby

Získává se tak model umožňující generovat strojní osy s náhodnými průběhy geometrických chyb. V popsaném modelu dochází ke zřetelnému efektu snížení celkové chyby přímosti oproti dílčím chybám přímosti podkladových ploch kolejnic.

3.3 Modelování volumetrické chyby

V následujících podkapitolách se bude práce zabývat modelováním volumetrických vlastností stroje. Nejprve budou představeny vstupní data modelu, následně sestaven kinematický model stroje a poté odvozen výpočet volumetrické chyby. Speciálně upravený druh tohoto modelu bude sloužit k porovnání měřených dat s vypočtenými hodnotami z modelu.

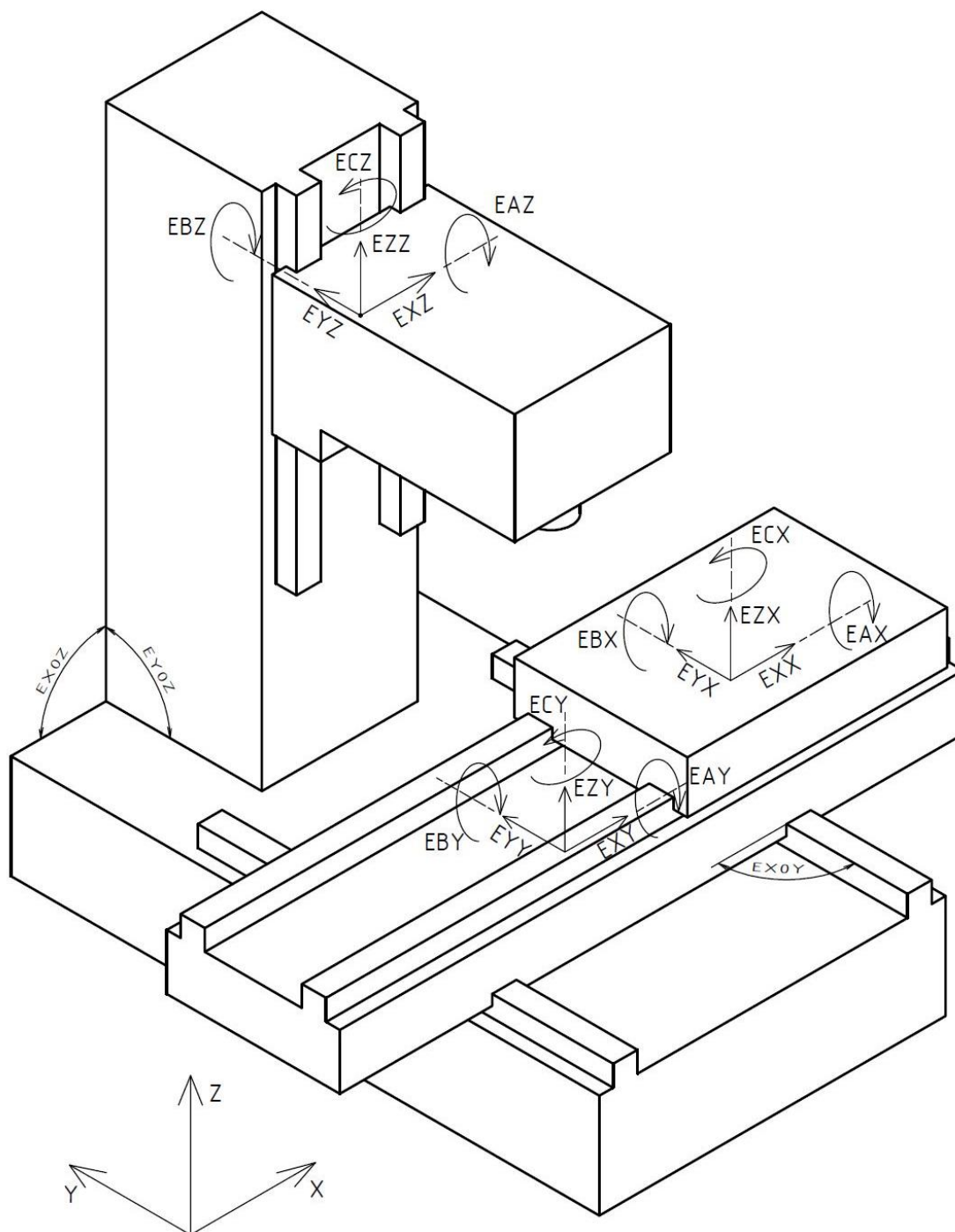
Volumetrická chyba, jak bylo popsáno v kapitole 2.4, se modeluje ve většině případů pomocí homogenních transformačních matic s využitím kinematické struktury stroje. Toto modelování opět využívá několik předpokladů, které ale nejsou tak rozsáhlé, aby zasloužily vlastní kapitolu. V podstatě se jedná o předpoklad malých úhlů rotace, díky čemuž se mohou používat transformační matice ve tvaru, který bude popsán. Zároveň je u tohoto modelu předpoklad absolutně tuhých těles nosné struktury stroje. Při modelování nebude uvažována zátěžná síla.

3.3.1 Vstupní data modelu

Vstupními daty do modelu volumetrické chyby se rozumí všech 21 geometrických chyb (pro 3 osý stroj). 18 z těchto chyb je polohově závislých a jsou proto funkcemi, zbylé 3 chyby kolmosti jsou v celém prostoru stroje konstantní. S průběhem těchto chyb úzce souvisí další vstupní parametry – zdvihy jednotlivých strojních os. Všechny polohově závislé geometrické chyby by měly být popsány v celém rozsahu zdvihu os. Model počítá volumetrickou chybu v určitém bodě, proto i souřadnice tohoto bodu jsou vstupními daty modelu a měly by být v rámci rozsahu os.

Pro výpočet volumetrických vlastností stroje je tedy potřeba proměřit všech 21 geometrických chyb, a to ideálně v jednom teplotně-mechanickém stavu, tedy za co nejkratší dobu. Protože se v kinematické struktuře zavádějí chyby v geometrickém středu pohybové vazby osy, je dobré tyto chyby také měřit co nejbližší tomuto bodu.

Značení podle konvence normy ISO 230-1 a umístění všech 21 geometrických chyb na tříosém obráběcí stroji s rámem typu C a křížovým stolem je na Obr. 3.26



Obr. 3.26: Značení a umístění 21 geometrických chyb na stroji s C-rámem a křížovým stolem

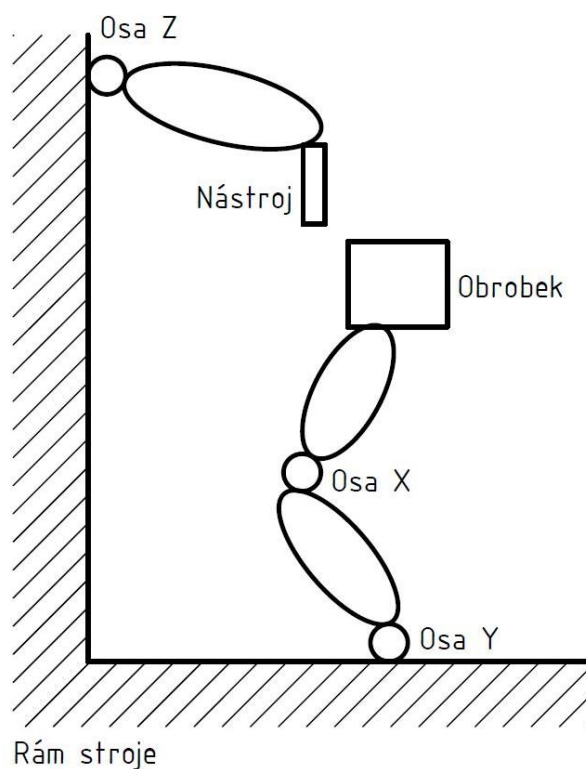
3.3.2 Kinematický model modelovaného stroje

Pro účely výpočtu volumetrické chyby je velmi důležité sestavit správný kinematický model, popisující pohybovou strukturu stroje. Tato práce se zabývá vertikálními obráběcími stroji s C rámem a křížovým stolem, ale sestavení kinematického modelu pro další druhy strojů je analogické. Kinematický model bude sestaven na základě přibližných rozměrů stroje MAS MCV 754 Quick (na Obr. 3.27), který je příkladem pro studium chyb s možností měření.



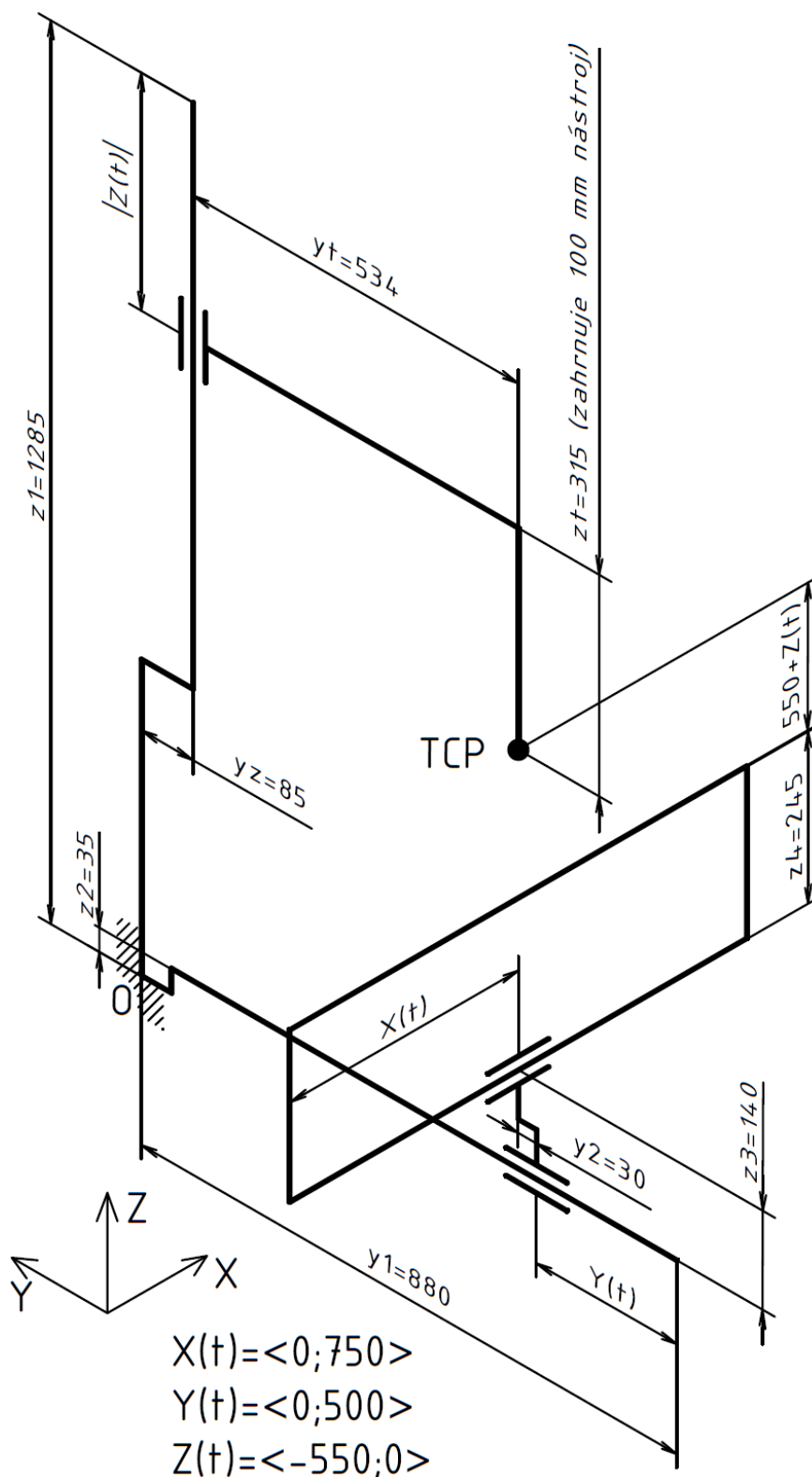
Obr. 3.27: Modelovaný stroj, MAS MCV 754 Quick [27]

Toto osové uspořádání rozděluje pohybové osy jak do nástrojové, tak obrobkové větve – nástrojová větev obsahuje osu Z, obrobková větev pak obsahuje osy X a Y. Jedná se tedy o konfiguraci ZFYX. Kinematický diagram tohoto uspořádání je na Obr. 3.28.



Obr. 3.28: Kinematický diagram stroje MCV 754 Quick (konfigurace ZFYX)

Během tvorby modelu byly k dispozici přibližné rozměry tohoto stroje, díky čemuž mohlo být sestaveno kompletní kinematické schéma se všemi posuvnými vazbami (Obr. 3.29), které jsou umístěny do geometrického středu mezi hnízda valivého vedení, na horní plochu kolejnic.



Obr. 3.29: Kompletní kinematické schéma MCV 754 Quick

3.3.3 Sestavení transformačních vztahů

Všech 21 geometrických chyb z Obr. 3.26 náleží do svých příslušných transformačních matic, které se později zavádí v bodech geometrického středu pohybových vazeb transformačního popisu kinematického schématu. Protože se předpokládají malé úhlové transformace, linearizuje se klasická transformační matice nahrazením funkce $\sin(\alpha) = \alpha$ a $\cos(\alpha) = 1$. Chybové transformační matice existují zvláště pro osu X (48), osu Y (49), osu Z (50) a pro chyby vzájemné kolmosti (51)(52)(53). Chybové transformační matice jednotlivých os jsou navíc polohově závislé na zdvihu příslušné osy, protože i jejich jednotlivé komponenty jsou polohově závislé.

$$T_{EX} = \begin{bmatrix} 1 & -ECX & EBX & EXX \\ ECX & 1 & -EAX & EYX \\ -EBX & EAX & 1 & EZX \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (48)$$

$$T_{EY} = \begin{bmatrix} 1 & -ECY & EBY & EXY \\ ECY & 1 & -EAY & EYY \\ -EBY & EAY & 1 & EZY \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (49)$$

$$T_{EZ} = \begin{bmatrix} 1 & -ECZ & EBZ & EXZ \\ ECZ & 1 & -EAZ & EYZ \\ -EBZ & EAZ & 1 & EZZ \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (50)$$

$$T_{EXOY} = \begin{bmatrix} 1 & -EXOY & 0 & 0 \\ EXOY & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (51)$$

$$T_{EXOZ} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & EXOZ & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -EXOZ & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (52)$$

$$T_{EYOZ} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -EYOZ & 0 \\ 0 & EYOZ & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (53)$$

Dalším krokem je sestavení transformačních vztahů pro vznik radiusvektoru mezi rámem a TCP v obrobkové a nástrojové větvi, ke kterému se použijí rozměry stroje z Obr. 3.29 a klasické translační transformační matice [28] pro transformaci v osách X (54), Y (55) a Z (56).

$$T_x(x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (54)$$

$$T_y(y) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (55)$$

$$T_z(z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (56)$$

Vztah pro transformaci souřadnic do souřadnicového systému vřeteníku je popsán vztahem (57) a transformace do souřadnicového systému stolu je ve vztahu (58).

$$T_{0T} = T_y(yz) \cdot T_z(z1) \cdot T_x(X(t)) \quad (57)$$

$$T_{0W} = T_z(z2) \cdot T_y(-y1) \cdot T_y(Y(t)) \cdot T_z(z3) \cdot T_y(y2) \cdot T_x(-X(t)) \cdot T_x(X(t)) \cdot T_z(z4) \quad (58)$$

Pro sestavení radiusvektoru popisujícího ideální polohu TCP v nástrojové a obrobkové větvi jsou ještě potřeba radiusvektory vedoucí do TCP v souřadných systémech vřeteníku (59) a stolu (60)

$$r_{TTCP} = \begin{bmatrix} 0 \\ -yt \\ -zt \\ 1 \end{bmatrix} \quad (59)$$

$$r_{WTCP} = \begin{bmatrix} 0 \\ 250 - Y(t) \\ 550 + Z(t) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (60)$$

Pomocí transformačních vztahů (57)(58) a radiusvektorů (59)(60) tedy může být sestaven předpis ideálního, nechybového radiusvektoru z rámu do TCP nástrojové (61) a obrobkové větve (62).

$$r_{0TTCP} = T_{0T} \cdot r_{TTCP} \quad (61)$$

$$r_{0WTCP} = T_{0W} \cdot r_{WTCP} \quad (62)$$

Nyní mohou být do klíčových bodů transformace zavedeny transformace geometrických chyb ze vztahů (48) – (53). Vznikají tím finální vztahy, chybová transformace (63) a (64) s chybovým radiusvektorem (65) a (66).

$$T_{0T}^* = T_y(yz) \cdot T_z(z1) \cdot T_{EY0Z} \cdot T_{EX0Z} \cdot T_z(Z(t)) \cdot T_{EZ}(Z(t)) \quad (63)$$

$$T_{0W}^* = T_z(z2) \cdot T_y(-y1) \cdot T_y(Y(t)) \cdot T_{EY}(Y(t)) \cdot T_z(z3) \cdot T_y(y2) \cdot T_x(-X(t)) \cdot T_{EX0Y} \cdot T_x(X(t)) \cdot T_{EX}(X(t)) \cdot T_z(z4) \quad (64)$$

$$r_{0TTCP}^* = T_{0T}^* \cdot r_{TTCP} \quad (65)$$

$$r_{0WTCP}^* = T_{0W}^* \cdot r_{WTCP} \quad (66)$$

3.3.4 Výpočet volumetrické chyby

Translační složky volumetrické chyby se získají rozdílem radiusvektoru se zavedenými geometrickými chybami a radiusvektoru ideálního, superpozicí těchto rozdílů v nástrojové a obrobkové větvi (67).

$$E_{volT} = (r_{0TTCP}^* - r_{0TTCP}) + (r_{0WTCP}^* - r_{0WTCP}) = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (67)$$

Kvůli různým počátečním úhlovým chybám a existujícím vyložením ale vzniká volumetrická chyba i v počátečních souřadnicích [0,0,0]. Tyto souřadnice se běžně volí jako referenční hodnota pro zbytek volumetrických chyb, tedy souřadnice s nulovou volumetrickou chybou. Do výpočtu volumetrické chyby se tak promítne odečet počáteční volumetrické chyby E_{volT}^0 , která se ale stanoví klasicky podle vztahu (67). Výsledný vztah pro výpočet translačních složek volumetrické chyby tak vypadá následovně (68).

$$E_{volT} = (r_{0TTCP}^* - r_{0TTCP}) + (r_{0WTCP}^* - r_{0WTCP}) - E_{volT}^0 = \begin{bmatrix} E_X \\ E_Y \\ E_Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (68)$$

Co se týče rotačních složek volumetrické chyby, ty jsou pouze součtem dílčích geometrických rotačních chyb a chyb kolmosti okolo jednotlivých os, protože na rozdíl od translačních chyb se rotační nemění s ramenem, na kterém se vyskytují. Vztah pro jejich výpočet je následující (69):

$$E_{volR} = \begin{bmatrix} EAX + EAY + EAZ + EYOZ \\ EBX + EBY + EBZ + EXOZ \\ ECX + ECY + ECZ + EXOY \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_A \\ E_B \\ E_C \end{bmatrix} \quad (69)$$

Rotační volumetrické chyby se podobným způsobem nenulují, protože referenční stav je samozřejmě prostor zcela bez úhlových chyb, kde jednotlivé osy spolu svírají vždy přesně 90°. Vektor celkové volumetrické chyby obsahující všech šest jejich složek je vyjádřen vztahem (70).

$$E_{vol} = \begin{bmatrix} E_X \\ E_Y \\ E_Z \\ E_A \\ E_B \\ E_C \end{bmatrix} \quad (70)$$

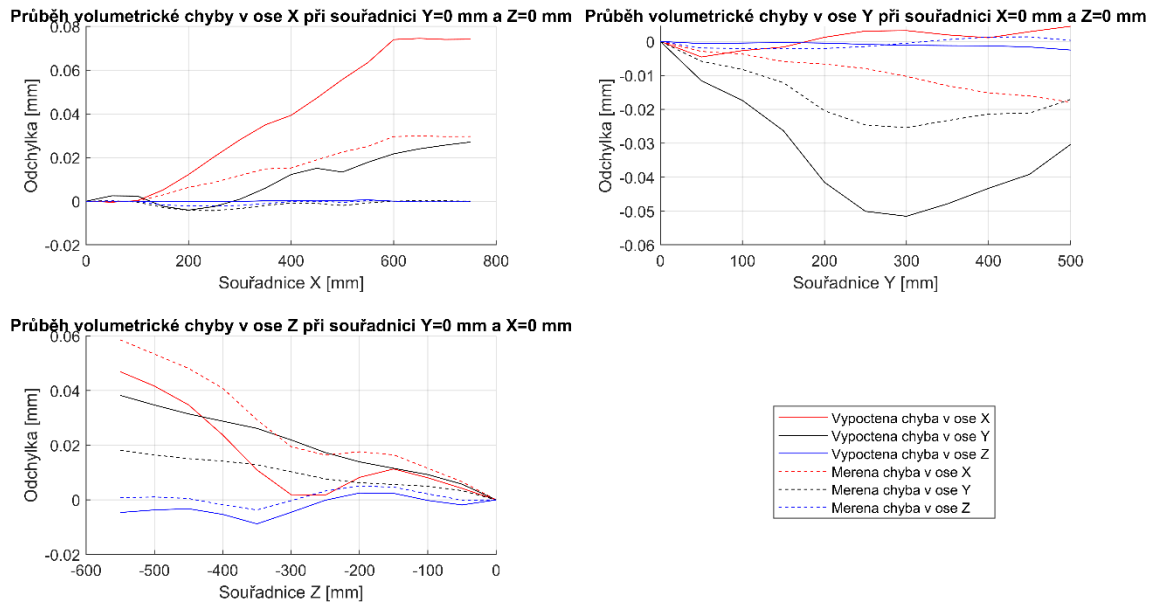
Výpočet volumetrické chyby podle výše popsaných vztahů lze provést pro libovolný bod pracovního prostoru, pokud pro něj jsou ve všech souřadnicích dostupné hodnoty geometrických chyb. Pokud ne, lze mezi nejbližšími souřadnicemi geometrické chyby interpolovat (lineárně, spline) a získat tak možnost volumetrickou chybu vypočítat pro opravdu libovolný bod pracovního prostoru stroje. Jednoduchou algoritmizační úlohou (3x vnořený FOR cyklus) se dá získat popis celého pracovního prostoru s určitým rozlišením, ze kterého se vytvářejí grafy znázorňující celkovou přesnost stroje. Vypočtením eukleidovské vzdálenosti pro jednotlivé translační složky volumetrické chyby (71) se dá získat další způsob popisu volumetrické přesnosti stroje, navíc odečtením maxima všech eukleidovských vzdáleností se zjistí maximální volumetrická chyba celého stroje, neboli největší nepřesnost v jeho pracovním prostoru. Tato hodnota se běžně používá jako srovnávací parametr mezi jednotlivými stroji. Tyto výstupy budou ukázány až v dalších kapitolách v návaznosti na určitá vstupní data.

$$\|E_{volT}\| = \sqrt{E_X^2 + E_Y^2 + E_Z^2} \quad (71)$$

3.3.5 Speciálně upravený model aplikovaný na měřená data

Během tvorby práce byla k dispozici sada měřených dat 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. Snaha této kapitoly je reverzně vypočíst volumetrickou chybu z geometrických chyb, které byly vypočteny z měřené volumetrické chyby.

Při zavedení aplikací vypočtených geometrických chyb do modelu ale vypočtená volumetrická chyba a její průběhy s měřenou vůbec nesouhlasí (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.



Obr. 3.30: Nesouhlasné průběhy jednotlivých složek volumetrické chyby

Po kompletní úpravě transformačních vztahů zanedbáním celé kinematické struktury a rozměrů stroje a výpočtu volumetrické chyby (72) – (79) se ale povedlo dosáhnout stejných průběhů volumetrické chyby skrz počátek souřadnic, bod [0,0,0].

$$r_X = \begin{bmatrix} X(t) \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (72)$$

$$r_Y = \begin{bmatrix} 0 \\ Y(t) \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (73)$$

$$r_Z = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ Z(t) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (74)$$

$$r_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (75)$$

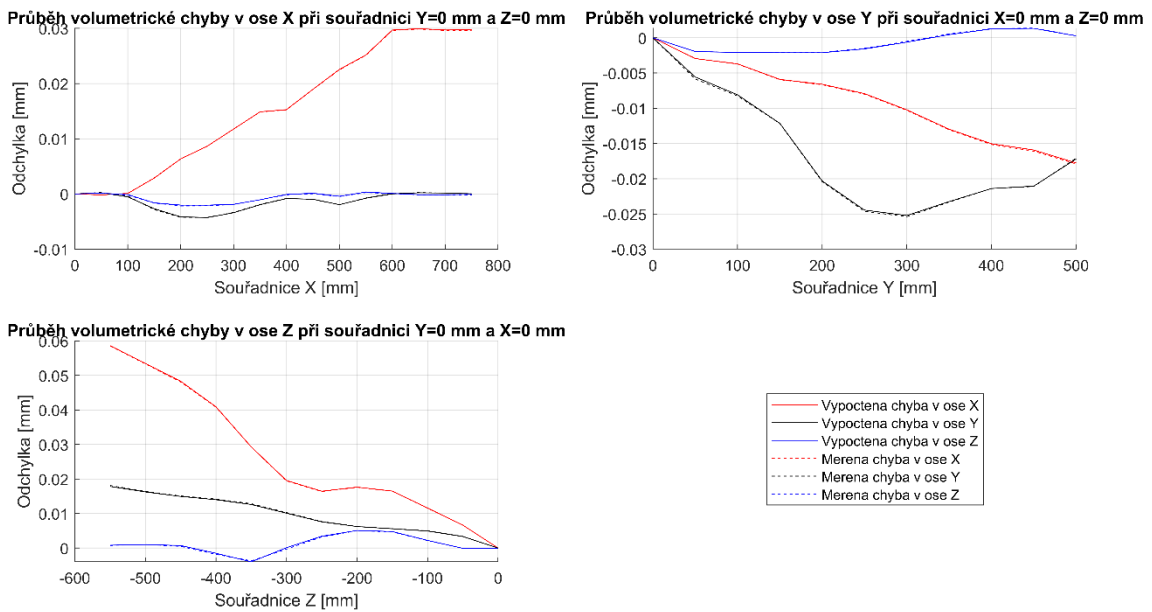
$$r_X^* = T_x(X(t)) \cdot T_{EX}(X(t)) \cdot r_1 \quad (76)$$

$$r_Y^* = T_{EX0Y} \cdot T_y(Y(t)) \cdot T_{EY}(Y(t)) \cdot r_1 \quad (77)$$

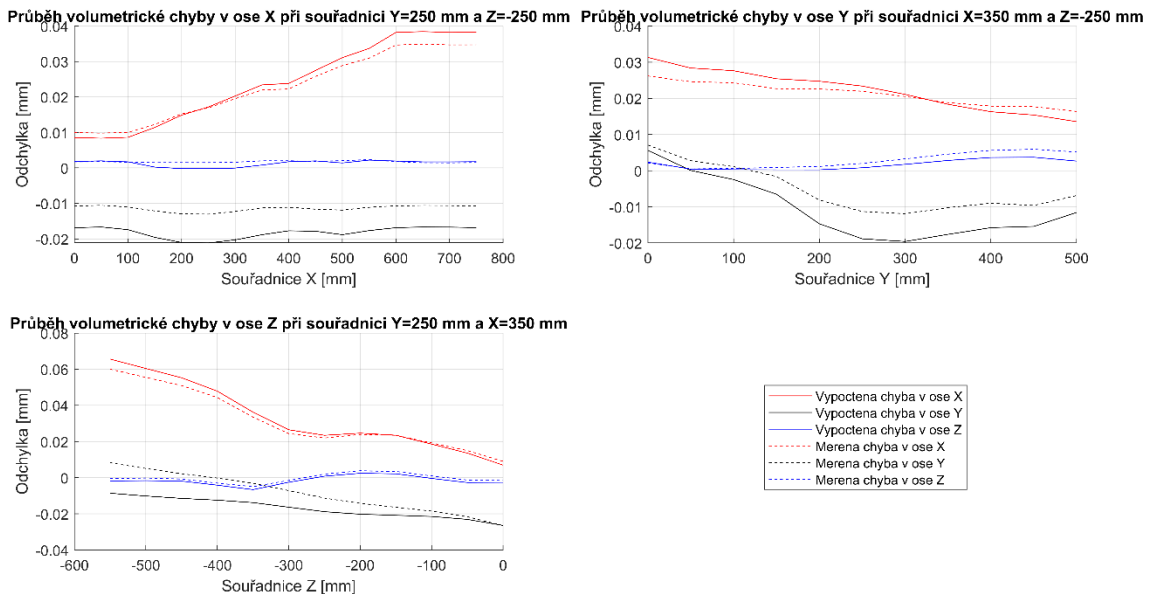
$$r_Z^* = T_{EX0Z} \cdot T_{EY0Z} \cdot T_z(Z(t)) \cdot T_{EZ}(Z(t)) \cdot r_1 \quad (78)$$

$$E_{volT} = (r_X^* - r_X) + (r_Y^* - r_Y) + (r_Z^* - r_Z) = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (79)$$

Nyní souhlasné průběhy volumetrické chyby počátkem souřadnic jsou na Obr. 3.31. Protože ale algoritmus výpočtu 21 geometrických chyb aplikace Trac-cal není dokonalý, nejsou geometrické chyby přesné a dochází k odchýlkám od měřených volumetrických chyb mimo počátek souřadnic (na Obr. 3.32).

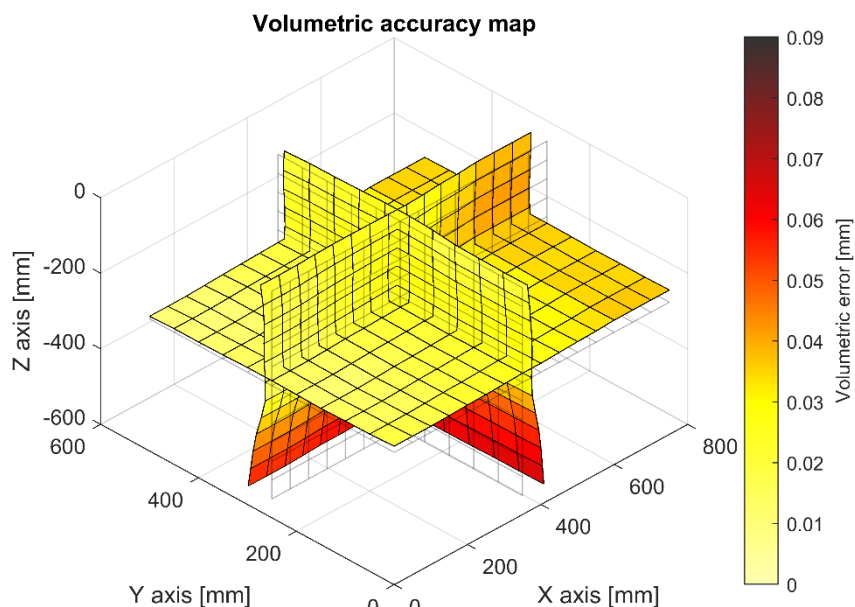


Obr. 3.31: Souhlasné průběhy jednotlivých složek volumetrické chyby

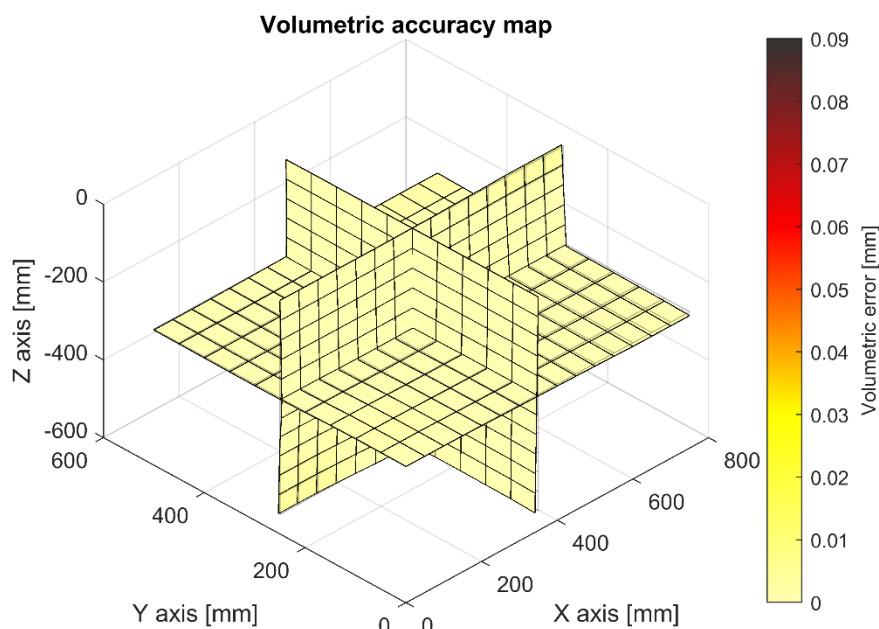


Obr. 3.32: Průběh jednotlivých složek mimo počátek souřadnic s odchýlkou od měřených dat

I tak lze vypočtené geometrické chyby použít ke kompenzaci. Tuto kompenzaci je možné zobrazit. Od měřených volumetrických chyb se odečtou vypočtené a zobrazí se volumetrická mapa stroje před a po kompenzaci, Obr. 3.33 a Obr. 3.34. Maximální volumetrická chyba tohoto stroje před výpočtovou kompenzací byla 0,068 mm, po výpočtové kompenzaci se tato chyba snížila na 0,023 mm.



Obr. 3.33: Volumetrická mapa stroje před kompenzací (zobrazuje se velikost celkové volumetrické chyby)



Obr. 3.34: Volumetrická mapa stroje po kompenzaci (zobrazuje se velikost celkové volumetrické chyby)

3.4 Spojení předchozích modelů, generování chybově náhodných strojů

V předchozích kapitolách byly popsány nástroje, které nyní poslouží pro generování a popis stroje složeného 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.

3.4.1 Vstupní data

Tento model je takřka totožný s modelem volumetrických chyb z kapitoly 3.3, ale místo vstupujících měřených geometrických chyb jsou zde vstupem simulované geometrické chyby z modelu popsaným v kapitolách 3.1 a 3.2. Protože ale model přenosu chyb z podkladových ploch na složenou osu negeneruje chybu polohování a chyby vzájemné kolmosti os, je potřeba tyto také ošetřit a vygenerovat. Zůstává zachovaný i kinematický model stroje se všemi jeho rozměry, ale v tomto případě je nutné ho doplnit o rozměry základů vozíků lineárního vedení jednotlivých os, viz. Tab. 3.1.

Tab. 3.1: Rozměry suportů jednotlivých os stroje MCV 754 Quick

	Rozměr <i>a</i>	Rozměr <i>b</i>
Osa X	350 mm	640 mm
Osa Y	604 mm	480 mm
Osa Z	316 mm	356 mm

Vstupními daty se tak stávají tolerance pro generování přímostí jednotlivých os stroje, rozměry suportů jednotlivých os, zdvihy jednotlivých os, tolerance chyby polohování a maximální povolená chyba kolmosti jednotlivých dvojic os. Dále pak lze specifikovat scénář umístění chyb pro jednotlivé osy, díky čemuž se může vygenerovat např. stroj, který má pouze chybu přímosti ve vertikálním směru na ose Y. V neposlední řadě se zadávají i parametry generátoru náhodných profilů, tedy perioda chyby a její násobitel. Pro vypisování volumetrických vlastností se zadává ještě bod, ve kterém se odečte volumetrická chyba a skrz který se zobrazí patřičné průběhy.

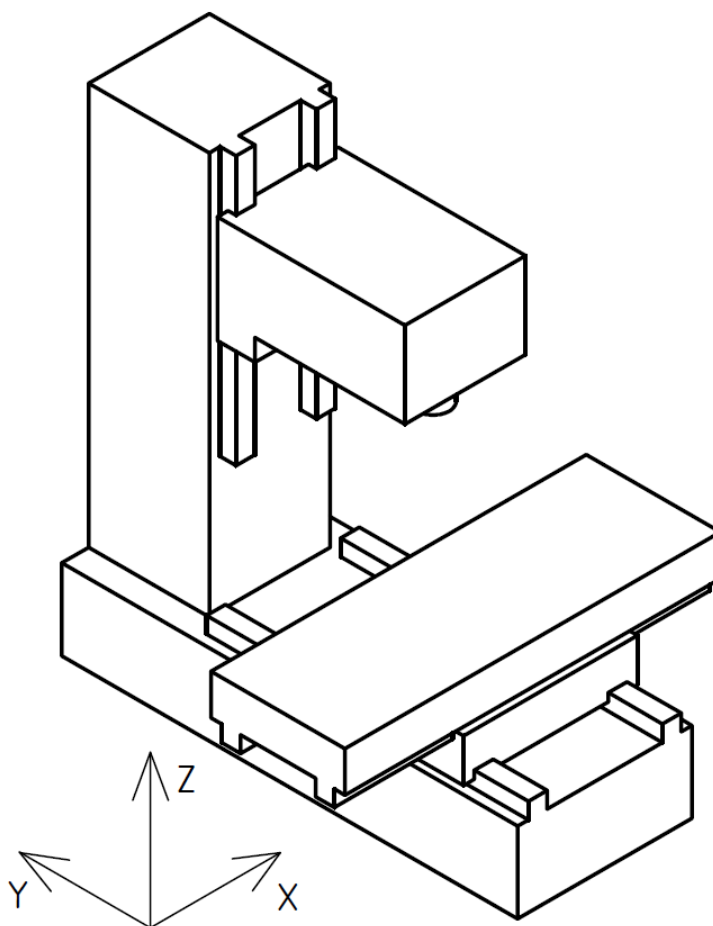
Generování průběhů chyb polohování využívá stejný algoritmus jako generování profilů pro přímost podkladových ploch – průběhy mají stejný charakter. Chyba polohování je ale sporná část volumetrické chyby, pokud je stroj vybaven přímým odměřováním, je téměř zanedbatelně malá a z modelu lze jednoduše vyřadit. U strojů s nepřímým odměřováním ale

vzniká a proto byla do modelu zahrnuta a zajišťuje tak větší množství vstupních chyb do celkového modelu stroje.

Vzájemná kolmost dvojice strojních os se generuje jako náhodné číslo s rovnoměrným rozdělením pravděpodobnosti, a to z intervalu od záporné maximální chyby kolmosti do kladné maximální chyby kolmosti, pro kolmost os X a Y např. podle vztahu (80).

$$EX_{OY} = U(-sqtol; sqtol) \quad (80)$$

Po vygenerování všech průběhů přímosti (vertikální a horizontální) a úhlových chyb jednotlivých os proběhne jejich dosazení do modelu volumetrických chyb. Je zkrátka potřeba přiřadit např. *roll* osy Z správně jako chybu ECZ. Protože toto nahrazování závisí na orientaci a uspořádání kolejnic na stroji a na předchozích obrázcích toto nebylo zřetelné, je umístění a orientace kolejnic ukázána na Obr. 3.35.



Obr. 3.35: Umístění a orientace kolejnic na stroji MCV 754 Quick

Tab. 3.2 ukazuje způsob popisu geometrických chyb stroje geometrickými chybami generovanými modelem popsaným v kapitole 3.1 a 3.2.

Tab. 3.2: Popis jednotlivých geometrických chyb stroje MCV 754 Quick generovanými chybami

	Osa X	Osa Y	Osa Z
polohování	EXX	EYY	EZZ
z_5 (vertikální přímost)	EZX	EZY	EYZ
y_5 (horizontální přímost)	EYX	EXY	EXZ
roll	EAX	EBY	ECZ
pitch	EBX	EAY	EAZ
yaw	ECX	ECY	EBZ

3.4.2 Výstup modelu

Výstupy tohoto modelu jsou shodné s výstupy modelu volumetrické chyby. Jedná se tedy o vypsání volumetrické chyby v zadaném bodě, zjištění maximální velikosti volumetrické chyby celého prostoru stroje a její vypsání a hlavně zobrazení grafů průběhů volumetrické chyby.

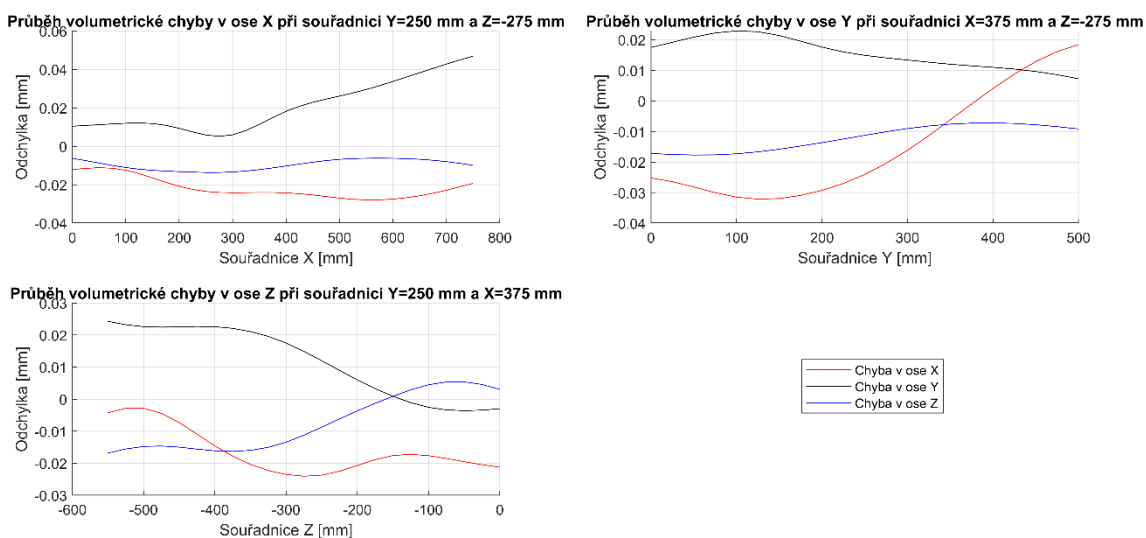
Pro lepší představu budou vypsány výsledky a výstupní grafy pro dvě různé simulace se vstupními parametry modelu podle Tab. 3.3.

Tab. 3.3: Vstupní parametry volumetrického modelu náhodného stroje

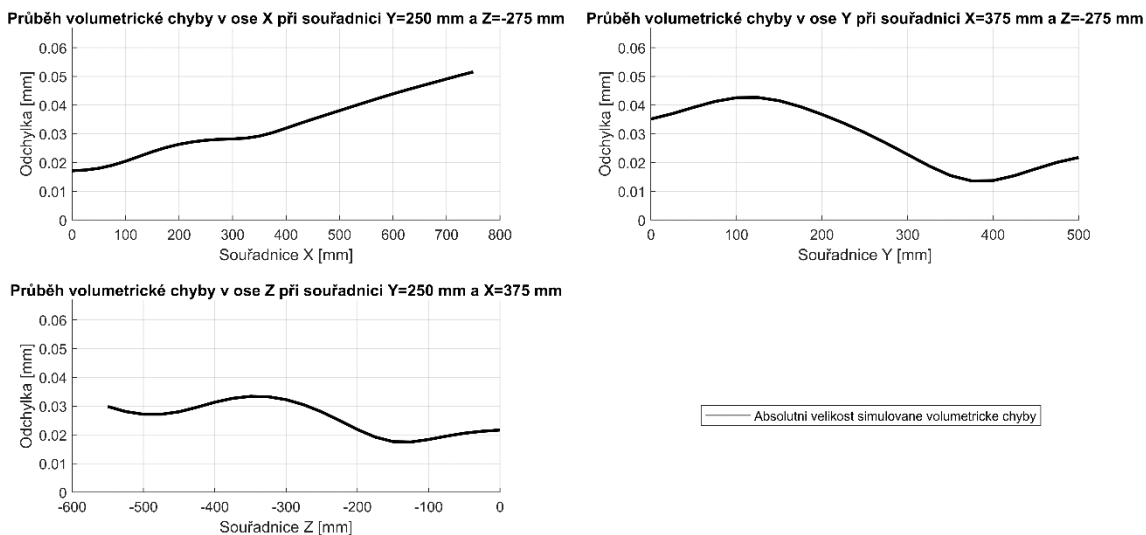
Parametr	Hodnota
Osa X – vertikální přímost podkladu kolejnic	0,03 mm
Osa Y – vertikální přímost podkladu kolejnic	0,03 mm
Osa Z – vertikální přímost podkladu kolejnic	0,03 mm
Osa X – horizontální přímost podkladu kolejnic	0,03 mm
Osa Y – horizontální přímost podkladu kolejnic	0,03 mm
Osa Z – horizontální přímost podkladu kolejnic	0,03 mm
Přesnost polohování osy X	0,01 mm
Přesnost polohování osy Y	0,01 mm
Přesnost polohování osy Z	0,01 mm
Maximální odchylka kolmosti os XY	30 $\mu\text{m}/\text{m}$
Maximální odchylka kolmosti os XZ	30 $\mu\text{m}/\text{m}$
Maximální odchylka kolmosti os YZ	30 $\mu\text{m}/\text{m}$
Perioda chyby	100 mm
Násobitel chyby m	0,5
Bod k odečtení volumetrické chyby	[375,250,-275]
Tuhost všech vozíků	100 000 N/mm

První simulace vykazuje následující výsledky (Obr. 3.36, Obr. 3.37, Obr. 3.38 a Obr. 3.39)

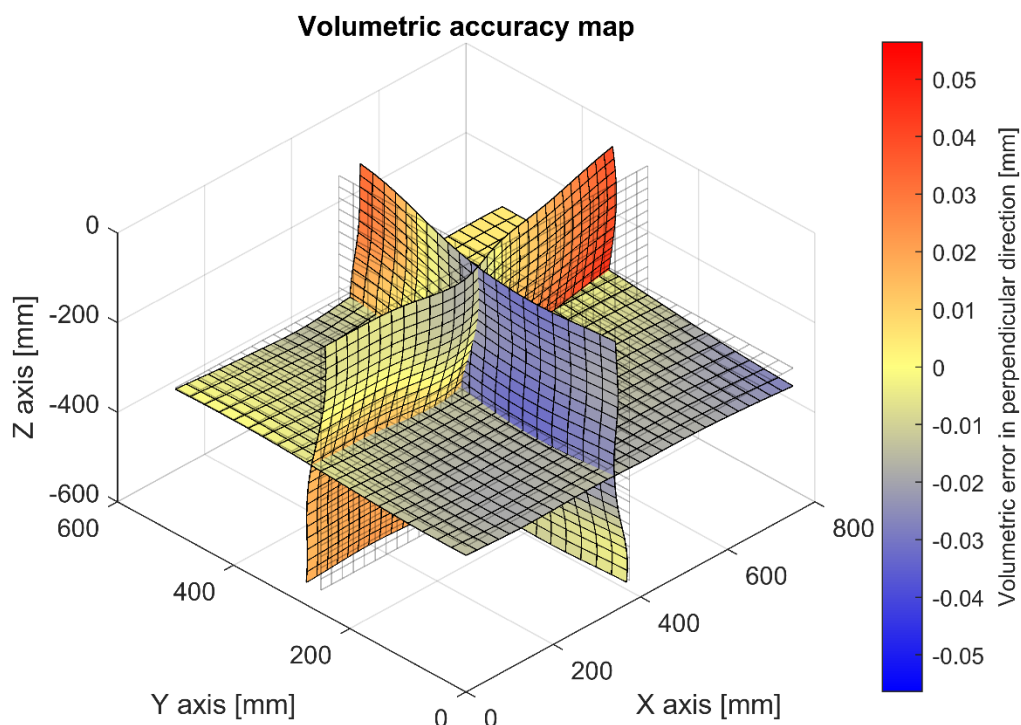
- Volumetrická chyba ve středu pracovního prostoru [375,250,-275]:
 - Chyba v ose X: -0,024 mm
 - Chyba v ose Y: 0,015 mm
 - Chyba v ose Z: -0,011 mm
 - Natočení okolo osy X: 25,4 $\mu\text{m}/\text{m}$
 - Natočení okolo osy Y: 7,2 $\mu\text{m}/\text{m}$
 - Natočení okolo osy Z: 7,0 $\mu\text{m}/\text{m}$
- Maximální volumetrická chyba v prostoru stroje: 0,067 mm



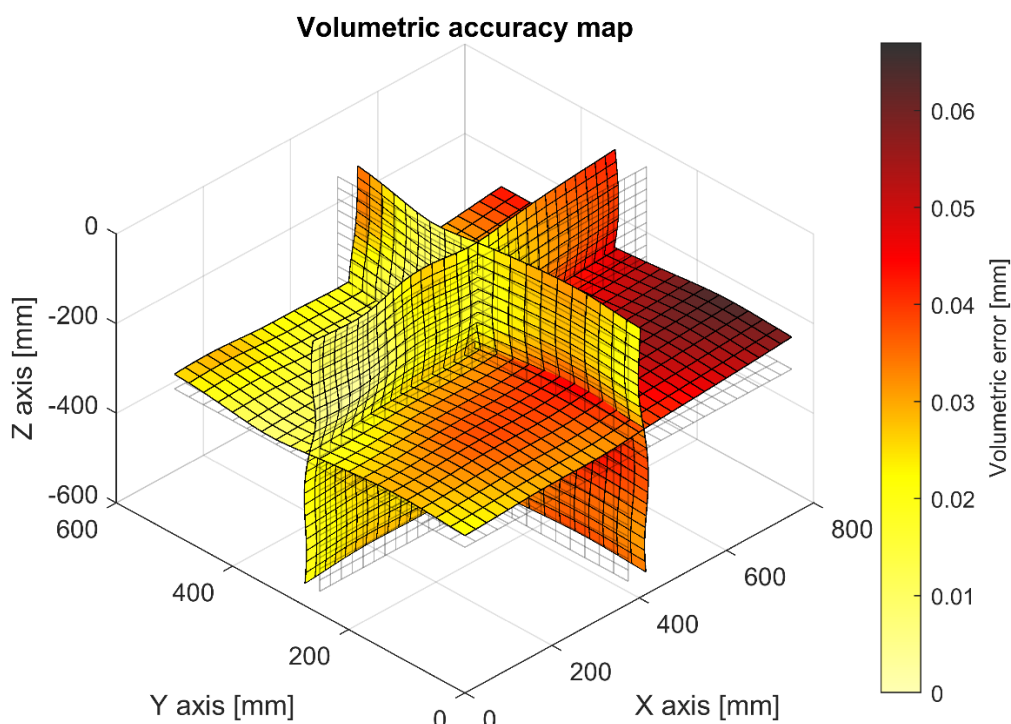
Obr. 3.36: Průběhy volumetrických chyb jednotlivých os náhodného stroje, 1. vzorek



Obr. 3.37: Průběhy celkové volumetrické chyby náhodného stroje, 1. vzorek



Obr. 3.38: Mapa volumetrických chyb v osách kolmých na zobrazovanou plochu, 1. vzorek

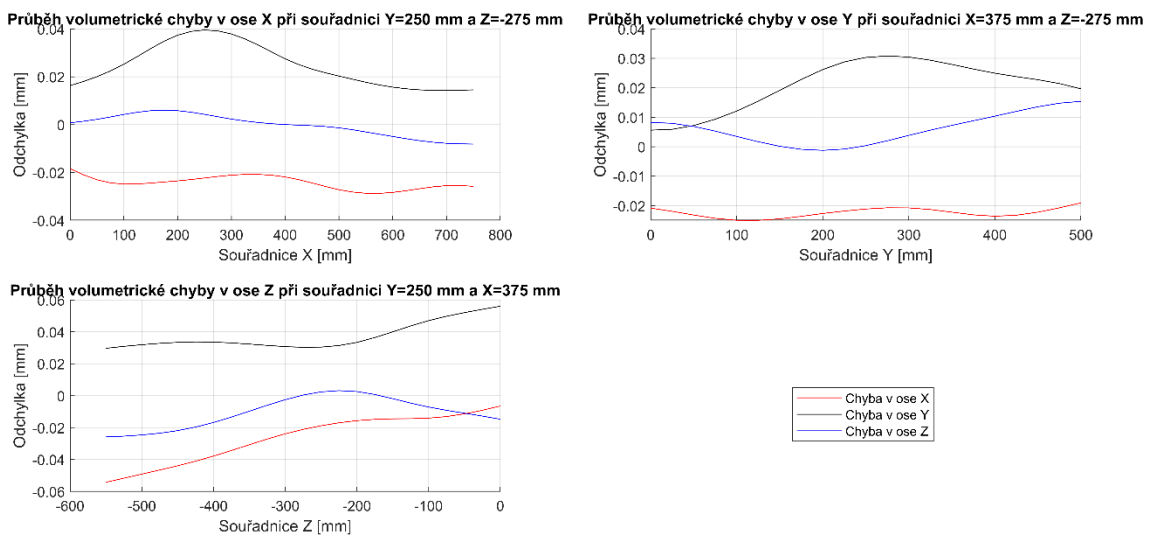


Obr. 3.39: Mapa celkové volumetrické chyby, 1. vzorek

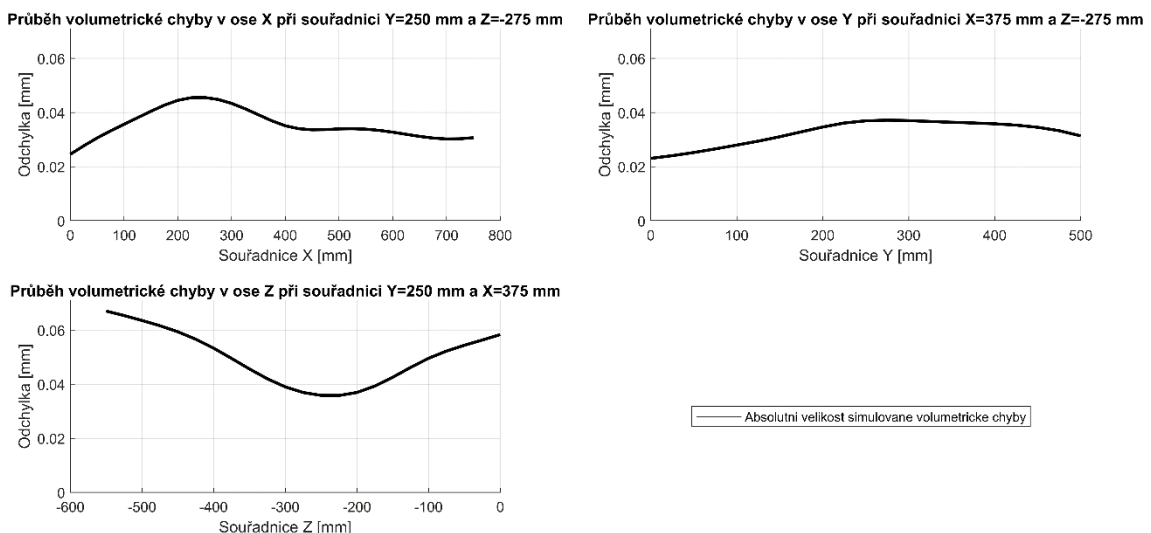
Tyto výsledky zhruba odpovídají třídě přesnosti daného stroje a předepsaným tolerancím. Obr. 3.38 a Obr. 3.39 názorně vizualizují konečné vlastnosti stroje a geometrickou „deformaci“ pracovního prostoru.

Pro druhou simulaci s jinými náhodně generovanými průběhy vstupních chyb vychází jiné výsledky, konkrétně (Obr. 3.40, Obr. 3.41 a Obr. 3.42):

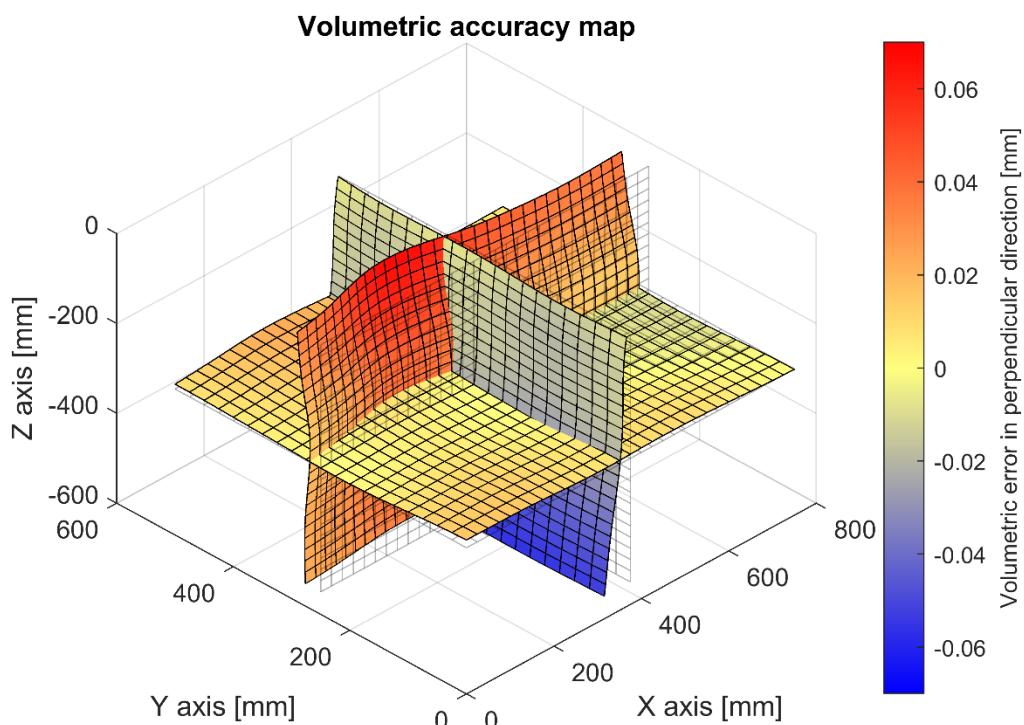
- Volumetrická chyba v zadaném bodě [375,250,-275]:
 - Chyba v ose X: -0,021 mm
 - Chyba v ose Y: 0,030 mm
 - Chyba v ose Z: 0,000 mm
 - Natočení okolo osy X: -100,2 $\mu\text{m}/\text{m}$
 - Natočení okolo osy Y: -64,5 $\mu\text{m}/\text{m}$
 - Natočení okolo osy Z: -14,7 $\mu\text{m}/\text{m}$
- Maximální volumetrická chyba v prostoru stroje: 0,071 mm



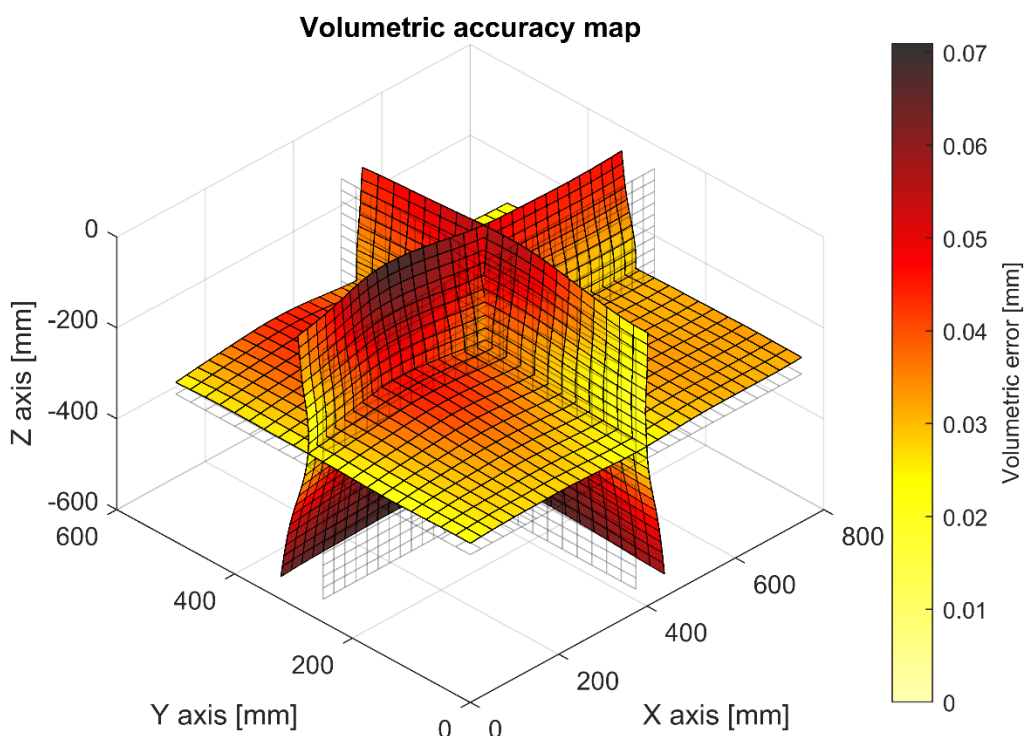
Obr. 3.40: Průběhy volumetrických chyb jednotlivých os náhodného stroje, 2. vzorek



Obr. 3.41: Průběhy celkové volumetrické chyby náhodného stroje, 2. vzorek



Obr. 3.42: Mapa volumetrických chyb v osách kolmých na zobrazovanou plochu, 2. vzorek



Obr. 3.43: Mapa celkové volumetrické chyby, 2. vzorek

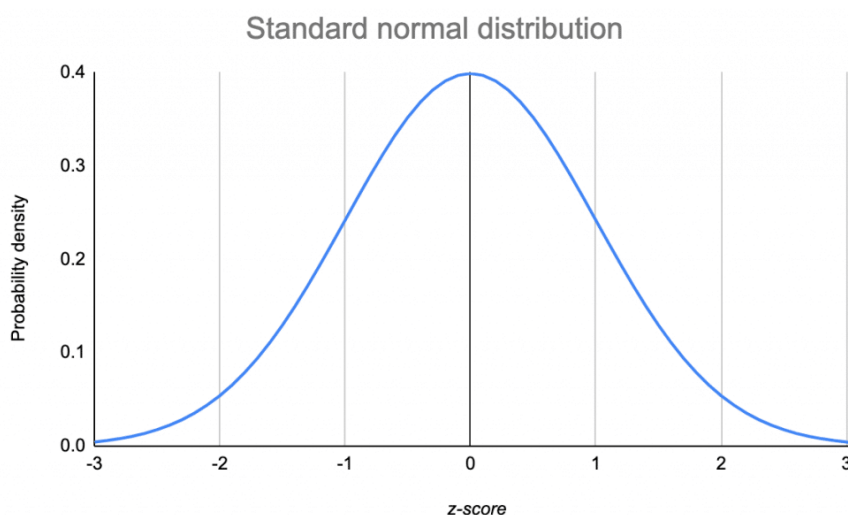
V tomto případě poslední volumetrická mapa (Obr. 3.43) svým charakterem připomíná skutečnou volumetrickou mapu měřeného stroje (Obr. 3.33), přestože vznikla na základě simulace s náhodně generovanými vstupními chybami v určených limitech.

3.5 Statistické vlastnosti modelů

U modelu simulace jedné kompletní osy a modelu chybově náhodného stroje lze zkoumat jejich výstupy z dlouhodobého hlediska, tedy při velkém vzorku výstupních dat. Vzniká při tom statisticky významný vzorek dat, ze kterého lze vyhodnotit např. medián výstupních hodnot, histogram jejich rozložení nebo určitý percentil. Z jednotlivých statistických hodnot pak lze předvídat chování simulačního modelu a při změně vstupních dat lze pak provést i citlivostní analýza.

3.5.1 Statistika modelu složené osy

Je možné předpokládat, že skutečné rozměry vyráběných součástí s určitou lineární tolerancí odpovídají normálnímu pravděpodobnostnímu rozložení, tedy že medián skutečných vyráběných rozměrů odpovídá středu tolerančního pole a okolo tohoto středu jsou ostatní vyráběné rozměry symetricky umístěny s určitým rozptylem (Obr. 3.44).

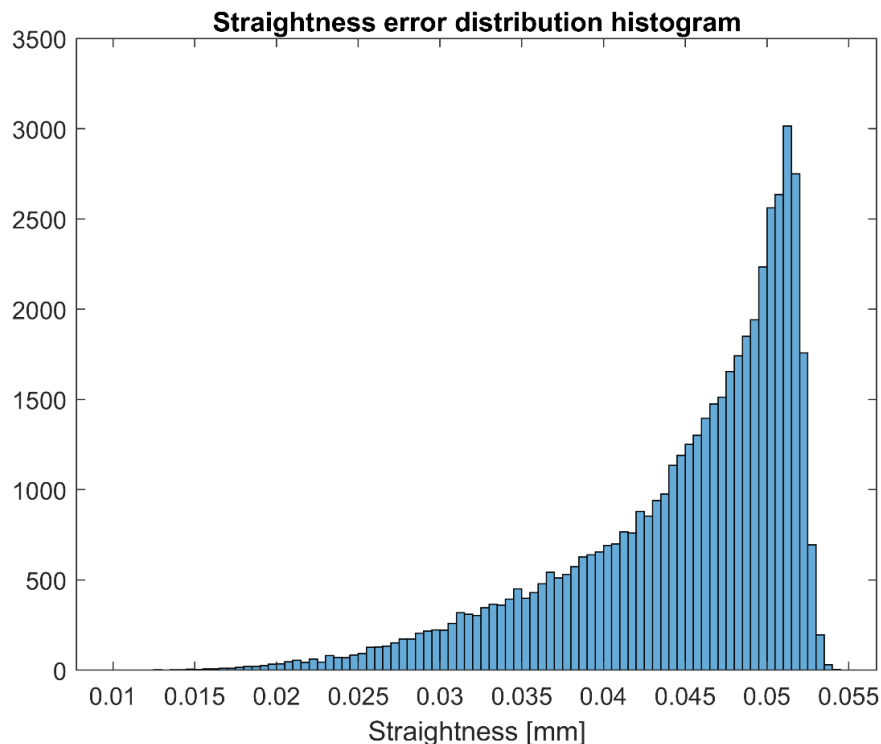


Obr. 3.44: Normální (Gaussovo) rozdělení pravděpodobnosti [29]

Na podkladové plochy se ale předepisuje tolerance přímosti, což je geometrická tolerance, ne lineární rozměrová. Je omezená shora svou tolerancí a ze spodu omezená nulou, teoreticky přesnou přímkou. Pro to bude platit jiné rozdělení pravděpodobnosti, ale toto téma je velmi neprobádané. V rámci přehledové rešerše k tomuto tématu nebyla nalezena žádná relevantní vědecká práce, která by pravděpodobnostní rozdělení pro geometrické tolerance ukazovala.

Generátor náhodných chybových profilů podkladových ploch ale jisté rozdělení pravděpodobnosti má, a pro úplnost práce je důležité ho uvést. Jedná se hlavně o povědomí, jaké hodnoty přímosti budou generovány pro zadanou toleranci při nahlížení do statistického modelu chybově náhodného stroje. Pro toleranci přímosti 0,05 mm, periodu chyby 100 mm, násobitel 0,5 a zdvih osy 1000 mm je histogram rozdělení 50 000 vzorků na Obr. 3.45. Na

obrázku je vidět, že některé vzorky i přesáhnou hodnotu tolerance přímosti, to je důsledek prokládání chybových bodů spline křivkou a představuje minimální chybu.

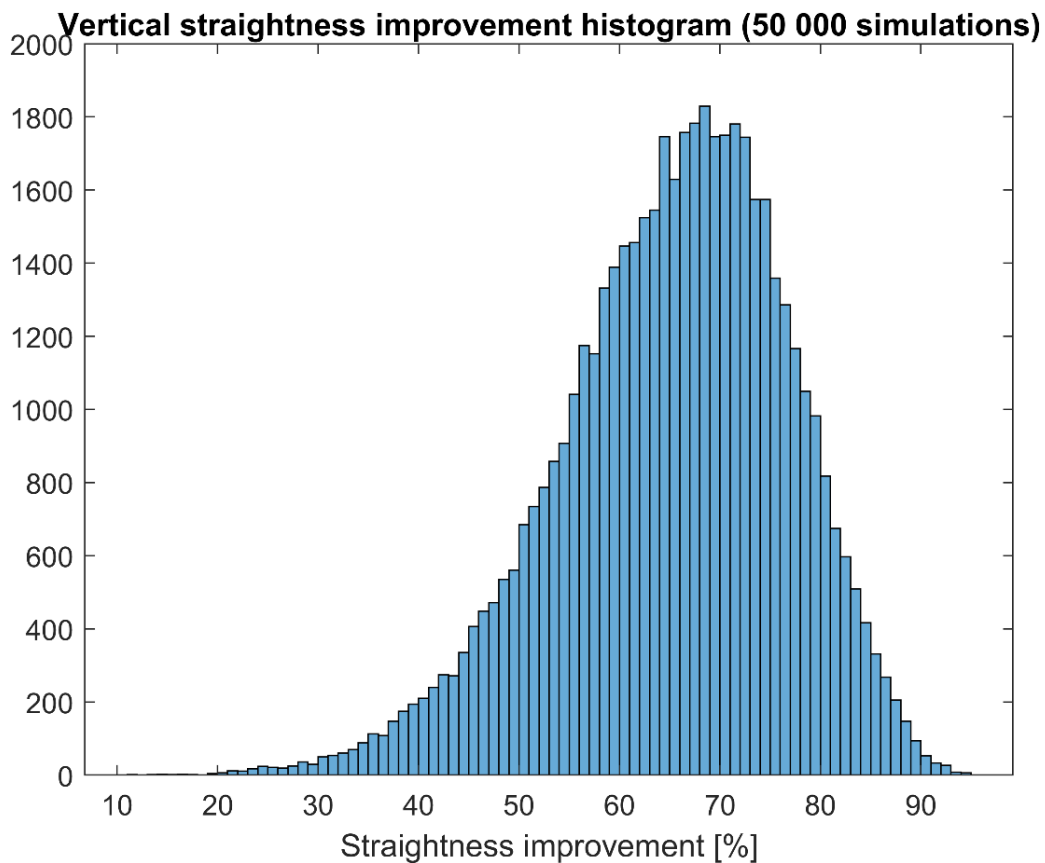


Obr. 3.45: Histogram pravděpodobnostního rozdělení generované přímosti při toleranci 0,05 mm

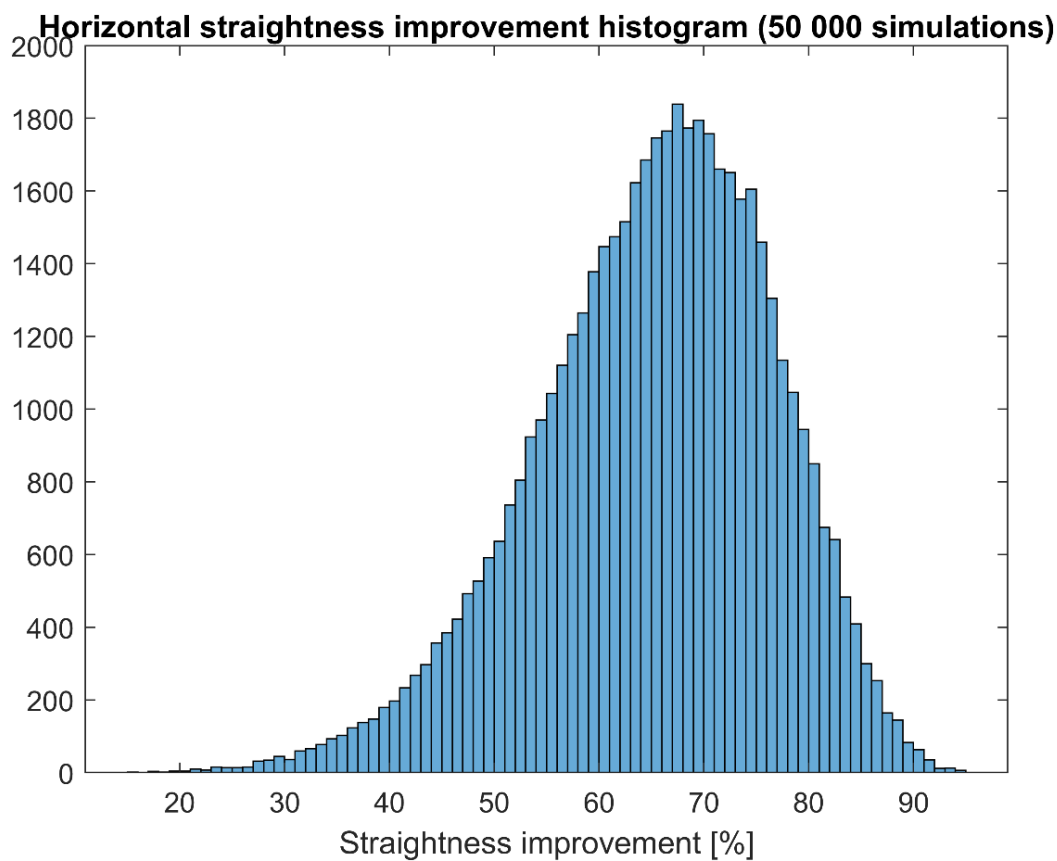
Další statistickou informací tohoto modelu je pravděpodobnostní rozdělení zlepšení přímosti. Z toho lze dále odečíst průměr, medián, percentily a ostatní statistické informace. Pro vstupní hodnoty podle Tab. 3.4 je výsledný histogram pro vertikální přímost na Obr. 3.46.

Tab. 3.4: Výchozí vstupní hodnoty pro statistické informace

Rozměr a:	400 mm
Rozměr b:	500 mm
Zdvih osy:	1000 mm
Horizontální přímost kolejnice:	0,05 mm
Vertikální přímost kolejnice:	0,05 mm
Perioda geometrické chyby:	100 mm
Násobitel geometrické chyby:	0,5
Tuhost k_{iz} :	100 000 N/mm
Tuhost k_{iy} :	100 000 N/mm
Počet simulací:	50 000



Obr. 3.46: Histogram zlepšení vertikální přímosti sestavené osy



Obr. 3.47: Histogram zlepšení horizontální přímosti sestavené osy

Výsledné statistické informace z těchto 50 000 vzorků pro vertikální přímost:

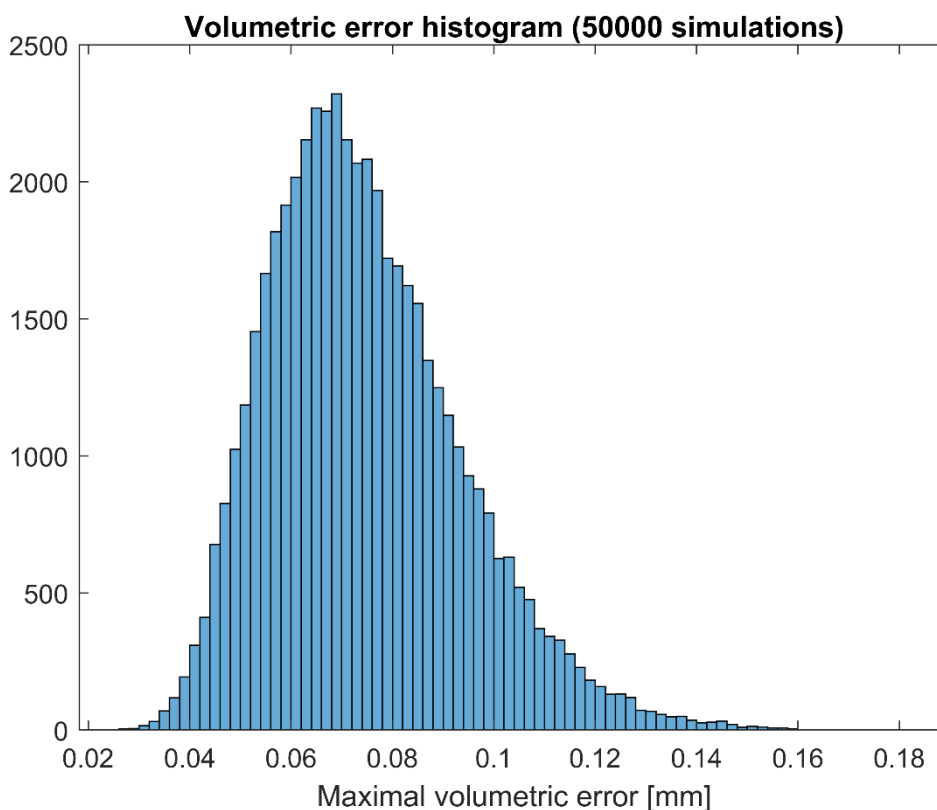
- Průměrné zlepšení přímosti 64,74 %
- Medián 66 %
- Minimální zlepšení 11 % a maximální zlepšení 95 %
- Percentil 90 zlepšení přímosti 50 %

Z těchto hodnot je v dalších případech zvolen jako porovnávací výstup právě percentil 90. Je to vypovídající hodnota z hlediska dlouhodobé výroby, říká, že 9 z 10 simulovaných os bude mít (v tomto případě) minimálně o 50 % lepší celkovou přímost v porovnání s dílčí přímostí podkladových ploch kolejnic. Co se týče statistiky pro horizontální přímost, nabývá stejných hodnot percentilů i průměru, histogram vypadá také stejně (Obr. 3.47). To je zajímavé vzhledem k tomu, že pro horizontální směr platí jiné deformační podmínky a celkově jiné výpočtové rovnice. Z tohoto chování lze tedy usuzovat, že efekt tlumení v horizontální rovině funguje úplně stejně, jako ve vertikální.

3.5.2 Statistika modelu chybově náhodného stroje

Jak již bylo řečeno, jako porovnávací parametr mezi jednotlivými stroji se v současné době používá maximální velikost celkové volumetrické chyby. To je tedy hlavní hodnota, která bude sledována při statistickém modelování chybově náhodných strojů a bude na ní dále sledována i citlivost vstupních parametrů.

Na modelovaném stroji MCV 754 Quick s tolerancemi podkladových ploch 0,03 mm a dalšími vstupními parametry podle Tab. 3.3 lze sledovat jeho maximální volumetrickou chybu z dlouhodobého výrobního hlediska a předvídat tím jeho přesnost, např. opět podle percentilu 90. Pro různé hodnoty tolerancí přímosti pak bude v další kapitole zkoumána citlivost maximální volumetrické chyby na jejich změnu.



Obr. 3.48: Histogram rozdělení maximální volumetrické chyby stroje

Histogram rozdělení maximální volumetrické chyby 50 000 vzorků modelovaného stroje (Obr. 3.48) ukazuje, že má volumetrická chyba spíše tendenci se roztáhnout do pásma horší přesnosti. To ukazuje i velký rozdíl mezi mediánem a devadesátým percentilem maximální volumetrické chyby z výsledků:

- Průměrná maximální volumetrická chyba 0,075 mm
- Medián 0,072 mm
- Nejmenší simulovaná maximální volumetrická chyba 0,027 mm, největší 0,181 mm
- Percentil 90 maximální volumetrické chyby 0,100 mm

Znamená to, že stroj se strukturou a rozměry stroje MCV 754 Quick a předepsanými tolerancemi podle výše zmíněné tabulky bude v devíti z deseti vyrobených kousků pracovat s volumetrickou chybou do 0,1 mm.

4 Analýza vlivu dílčích chyb nosných dílců na dosažitelnou přesnost

Pro různé vstupní hodnoty modelů lze sledovat statistickým pohledem citlivost na jejich změnu a analyzovat jejich vliv. Výsledkem této analýzy bude vyhodnocení, které parametry stroje mají na volumetrickou přesnost největší vliv a které by bylo vhodné optimalizovat, nebo naopak které parametry na výslednou volumetrickou přesnost příliš velký vliv nemají a u kterých je zbytečné se hnát za vysokými požadavky.

4.1 Vliv rozměrů pohybové osy na procento zlepšení přímosti

Při změně jednotlivých rozměrů lineární pohybové osy (rozměry a a b , zdvih osy) se při velkém množství simulací mění i procento zlepšení výsledné přímosti oproti dílčí přímosti podkladových ploch pro kolejnici. Jako výchozí stav této analýzy se berou vstupní hodnoty z Tab. 3.4, včetně výsledné statistiky vertikální přímosti z 50 000 vzorků:

- Průměrné zlepšení přímosti 64,74 %
- Medián 66 %
- Minimální zlepšení 11 % a maximální zlepšení 95 %
- Percentil 90 zlepšení přímosti 50 %

Po úpravách vstupních parametrů se dále budou vypisovat výsledky jen pro výslednou přímost ve vertikálním směru. Jak bylo ukázáno, výsledky pro vertikální a horizontální směr jsou stejné, tudíž nemá smysl uvádět oboje.

První zkouškou je úprava rozměru b , tedy úprava rozteče vozíků na kolejnici. Předpokládá se horší výsledek pro menší rozteč podle úvah a studií Tonga a kol. [22], protože bude menší poměr rozteče vozíků a vlnové délky chyby (parametr související s periodou chyby). Upravené vstupní parametry simulace určuje Tab. 4.1.

Tab. 4.1: První úprava vstupních parametrů

Rozměr a:	400 mm
Rozměr b:	250 mm
Zdvih osy:	1000 mm
Horizontální přímota kolejnice:	0,05 mm
Vertikální přímota kolejnice:	0,05 mm
Perioda geometrické chyby:	100 mm
Násobitel geometrické chyby:	0,5
Tuhost k_{zj} :	100 000 N/mm
Tuhost k_{yj} :	100 000 N/mm
Početa simulací:	20 000

Kvůli časové náročnosti velkého počtu simulací bylo odsimulováno jen 20 000 vzorků, což je ale pořád statisticky významná množina dat a tento počet simulací bude použit i pro další úpravy. Výsledky takto upravených vstupních parametrů potvrzují odhady:

- Průměrné zlepšení přímosti 60 %
- Medián 61 %
- Minimální zlepšení 5 % a maximální zlepšení 96 %
- Percentil 90 zlepšení přímosti 42 %

Jak průměrné zlepšení přímosti, tak medián a percentil 90 v tomto případě ukazují menší tlumení geometrické chyby přímosti na straně kolejnic. Dá se říct, že s delší roztečí vozíků na ose přichází i lepší efekt potlačení významu geometrických chyb přímosti podkladových ploch.

V další zkoušce se zkoumá vliv rozestupu kolejnic, tedy úprava rozměru a , viz. Tab. 4.2.

Tab. 4.2: Druhá úprava vstupních parametrů

Rozměr a:	200 mm
Rozměr b:	500 mm
Zdvih osy:	1000 mm
Horizontální přímota kolejnice:	0,05 mm
Vertikální přímota kolejnice:	0,05 mm
Perioda geometrické chyby:	100 mm
Násobitel geometrické chyby:	0,5
Tuhost k_{zj} :	100 000 N/mm
Tuhost k_{yj} :	100 000 N/mm
Počer simulací:	20 000

Výsledky simulace:

- Průměrné zlepšení přímosti 65 %
- Medián 66 %
- Minimální zlepšení 15 % a maximální zlepšení 94 %
- Percentil 90 zlepšení přímosti 50 %
- Dochází ke zvýšení amplitudy úhlové chyby *roll*

Další zkouškou je zvětšení zdvihu osy. Zde se předpokládá zhoršení, protože na větší délce zdvihu je větší šance k výraznějším výkyvům a tedy k horší hodnotě celkové přímosti. Vstupní data této změny obsahuje Tab. 4.3.

Tab. 4.3: Třetí úprava vstupních parametrů

Rozměr a:	400 mm
Rozměr b:	500 mm
Zdvih osy:	2000 mm
Horizontální přímota kolejnice:	0,05 mm
Vertikální přímota kolejnice:	0,05 mm
Perioda geometrické chyby:	100 mm
Násobitel geometrické chyby:	0,5
Tuhost k_{iz} :	100 000 N/mm
Tuhost k_{iy} :	100 000 N/mm

Počet simulací:	20 000
-----------------	--------

Pokles tlumícího efektu je v tomto případě znatelný:

- Průměrné zlepšení přímosti 55 %
- Medián 57 %
- Minimální zlepšení 5 % a maximální zlepšení 91 %
- Percentil 90 zlepšení přímosti 37 %

Pro všechny tyto výsledky platí nezávislost na samotné toleranci přímosti, díky způsobu generování náhodných profilů. Zlepšení v procentech nastává pro libovolnou velikost tolerance přímosti. Hlavním výsledkem této analýzy je fakt, že pro jakékoliv nastavení vstupních parametrů dochází ke zlepšení přímosti, a to zřetelné. Z výsledků se dá obecně říct, že přímost sestavené lineární osy odpovídá ve většině případů polovině hodnoty přímosti ploch vedení, v horizontálním i vertikálním směru. To může být vodítkem pro konstruktéry – pokud má výsledná osa splňovat přímost pohybu 0,02 mm, mělo by stačit předepsat toleranci přímosti pro podkladovou plochu 0,04 mm.

4.2 Vliv dílčích chyb přímosti na celkovou volumetrickou chybu stroje

Stroj typu MCV 754 Quick, na kterém jsou demonstrovány všechny modely, obsahuje celkem šest předepsovaných tolerancí přímosti na podkladových plochách pro kolejnice. Jedná se o normálové a boční plochy na osách X, Y a Z. Díky modelům sestaveným v této práci lze zkoumat vliv jednotlivých předepsaných tolerancí na celkovou volumetrickou přesnost stroje a určit, na kterých z nich má smysl se dožadovat vyšší přesnosti a které naopak vliv skoro žádný nemají. Taková optimalizace pak může vést ke snížení výrobních nákladů na některé dílce, ale zároveň ke zvýšení celkové volumetrické přesnosti stroje díky identifikaci klíčových tolerancí, které postačí předepsat trochu přesněji.

Při zkoumání vlivu jednotlivých přímostí bude z modelu úplně vyřazena chyba polohování a chyba vzájemné kolmosti os, aby se dal sledovat čistě vliv jednotlivých tolerancí přímosti. Jako počáteční výchozí stav k porovnání slouží vstupní data podle Tab. 4.5, kde jsou přímosti všech podkladových ploch tolerovány na 0,03 mm.

Jako porovnávací parametr mezi jednotlivými úpravami bude sloužit percentil 90 maximální volumetrické přesnosti a tolerance přímosti bude nabývat následujících hodnot (Tab. 4.4):

Tab. 4.4: Různé hodnoty přímosti pro analýzu

0,005 mm	0,015 mm	0,03 mm	0,045 mm	0,06 mm
----------	----------	---------	----------	---------

Tab. 4.5: Výchozí tolerance pro analýzu

Parametr	Hodnota
Osa X – vertikální přímost podkladu kolejnic	0,03 mm
Osa Y – vertikální přímost podkladu kolejnic	0,03 mm
Osa Z – vertikální přímost podkladu kolejnic	0,03 mm
Osa X – horizontální přímost podkladu kolejnic	0,03 mm
Osa Y – horizontální přímost podkladu kolejnic	0,03 mm
Osa Z – horizontální přímost podkladu kolejnic	0,03 mm
Perioda chyby	100 mm
Násobitel chyby m	0,5
Tuhost všech vozíků	100 000 N/mm

Pro stanovení percentilu 90 maximální volumetrické přesnosti musí být použitý statisticky významný vzorek simulací. Pro tuto analýzu se ve všech případech bude jednat o 50 000 simulačních vzorků. To je nejmenší počet vzorků, při kterém se nemění výsledek percentilu na čtvrtém desetinném místě po opakovaném spuštění statistického modelu.

Výsledný percentil 90 maximální volumetrické přesnosti při výchozích tolerancích přímosti: **93,4 μm** . To znamená, že devět z deseti vyrobených strojů bude disponovat maximální volumetrickou chybou lepší než 93,4 μm .

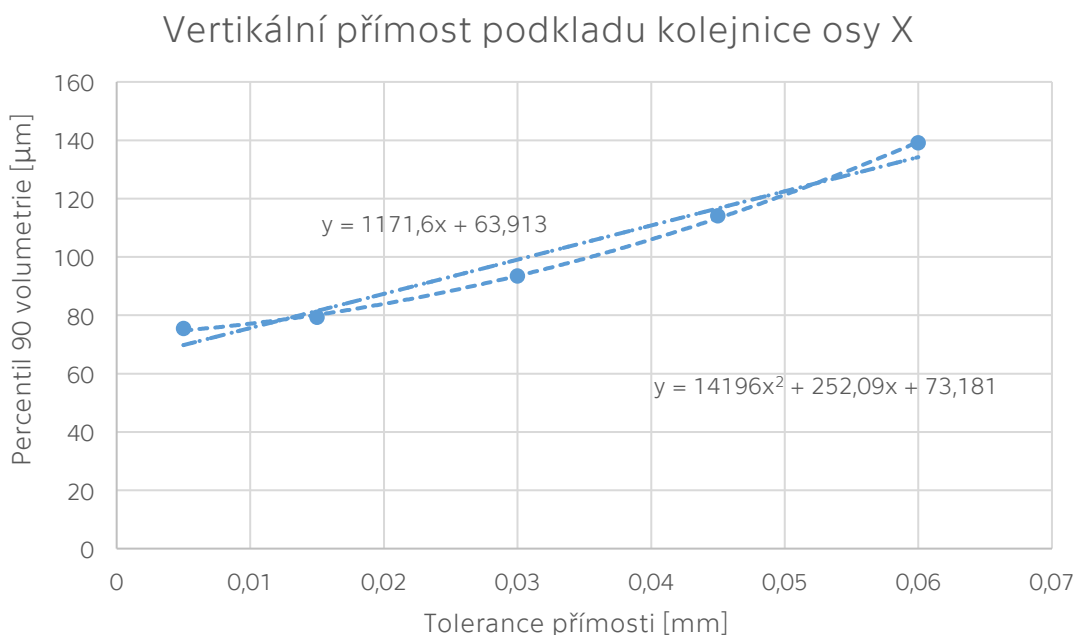
4.2.1 Vliv vertikální přímosti podkladu osy X

Jako první byla otestována citlivost vertikální přímosti podkladových ploch osy X. Při zachování ostatních tolerancí přímosti na hodnotě 0,03 mm a změně tolerancí vertikální přímosti podkladu pro osu X podle Tab. 4.4 vycházejí devadesáté percentily volumetrické chyby následně (Tab. 4.6):

Tab. 4.6: Reakce volumetrické chyby na změnu vertikální přímosti podkladu osy X

Tolerance přímosti	Percentil 90 volumetrické chyby
0,005 mm	75,4 μm
0,015 mm	79,3 μm
0,03 mm	93,4 μm
0,045 mm	114,1 μm
0,06 mm	139,0 μm

Jednotlivé výsledky budou pro vizualizaci zobrazeny v grafu (Obr. 4.1), včetně spojnic trendu. Na grafu lze pozorovat, že vzniklá závislost není lineární – odpovídá spíše kvadratickému průběhu. Uvedeny jsou ale obě spojnice trendu, jak lineární, tak kvadratická. Kvadratický trend závislost popisuje přesněji, ale z lineárního trendu lze odečíst jeho směrnice, která se pak bude porovnávat s ostatními závislostmi.



Obr. 4.1: Závislost percentilu 90 maximální volumetrické chyby na toleranci vertikální přímosti podkladové plochy pro kolejnice osy X

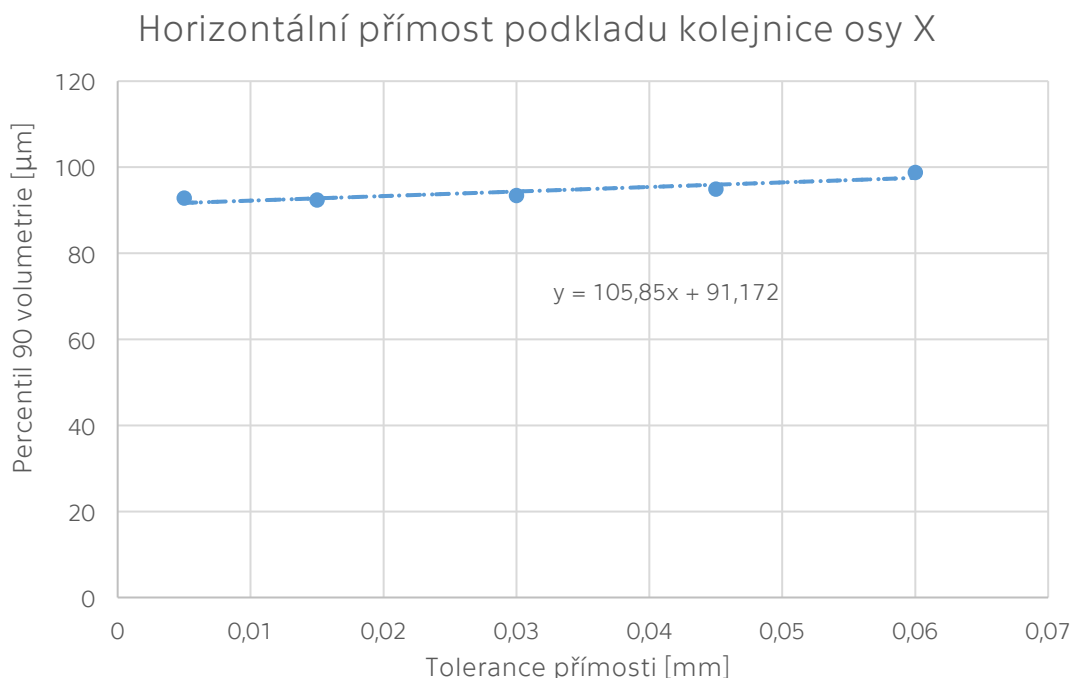
4.2.2 Vliv horizontální přímosti podkladu osy X

Druhou zkouškou bude vliv horizontální přímosti podkladových ploch pro kolejnice na ose X, tedy na toleranci jejich boční opěrné plochy. Nastavení experimentu je stejné jako v kapitole 4.2.1. Výsledky pro tuto zkoušku obsahuje Tab. 4.7.

Tab. 4.7: Reakce volumetrické chyby na změnu horizontální přímosti podkladu osy X

Tolerance přímosti	Percentil 90 volumetrické chyby
0,005 mm	92,8 μm
0,015 mm	92,4 μm
0,03 mm	93,4 μm
0,045 mm	94,9 μm
0,06 mm	98,7 μm

Výsledky jsou opět zaneseny do grafu, který ukazuje závislost percentilu 90 volumetrické chyby na toleranci přímosti (Obr. 4.2). V tomto případě je závislost velmi plochá a kvadratická spojnice by nebyla tak výrazná, i když by průběh popisovala přesněji.



Obr. 4.2: Závislost percentilu 90 maximální volumetrické chyby na toleranci horizontální přímosti podkladové plochy pro kolejnice osy X

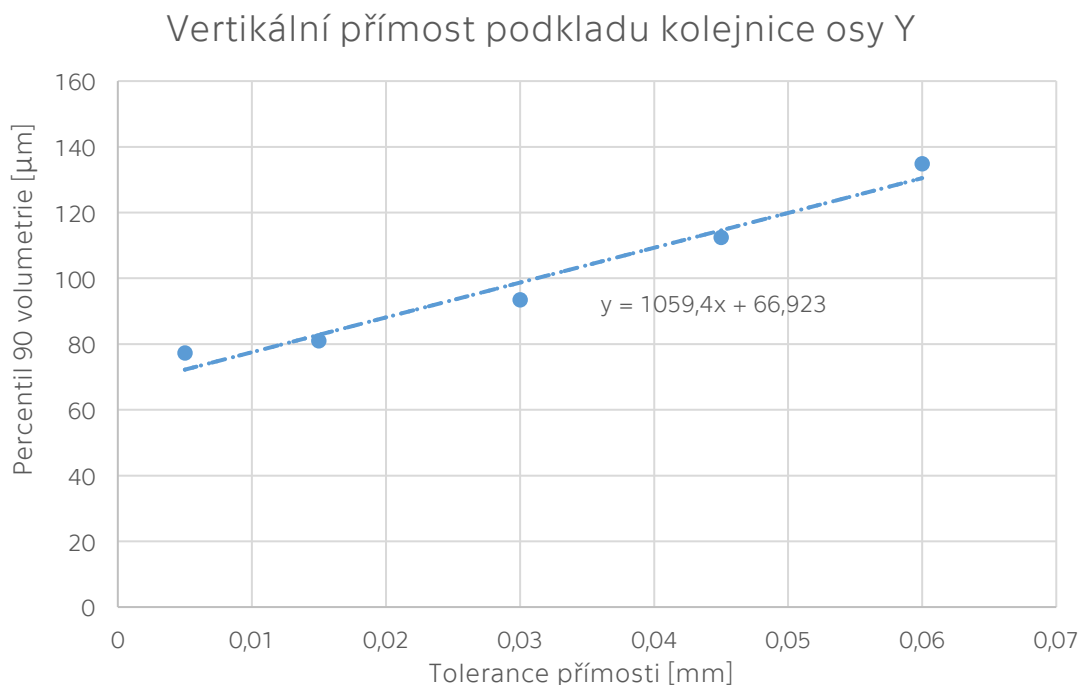
4.2.3 Vliv vertikální přímosti podkladu osy Y

Další zkouška zkoumá vliv vertikální přímosti podkladových ploch pro kolejnice osy Y. Pro stejné nastavení experimentu jako v předchozích případech popisuje výsledky Tab. 4.8:

Tab. 4.8: Reakce volumetrické chyby na změnu vertikální přímosti podkladu osy Y

Tolerance přímosti	Percentil 90 volumetrické chyby
0,005 mm	77,2 μm
0,015 mm	80,9 μm
0,03 mm	93,4 μm
0,045 mm	112,4 μm
0,06 mm	134,8 μm

Zobrazení výsledků v grafu je na Obr. 4.3. Směrnice a závislost je v tomto případě velmi podobná s první zkouškou vlivu vertikální přímosti podkladu osy X a i zde je závislost mnohem lépe popsána kvadratickou spojnicí trendu, ale pro přehlednost už není uvedena.



Obr. 4.3: Závislost percentilu 90 maximální volumetrické chyby na toleranci vertikální přímosti podkladové plochy pro kolejnice osy Y

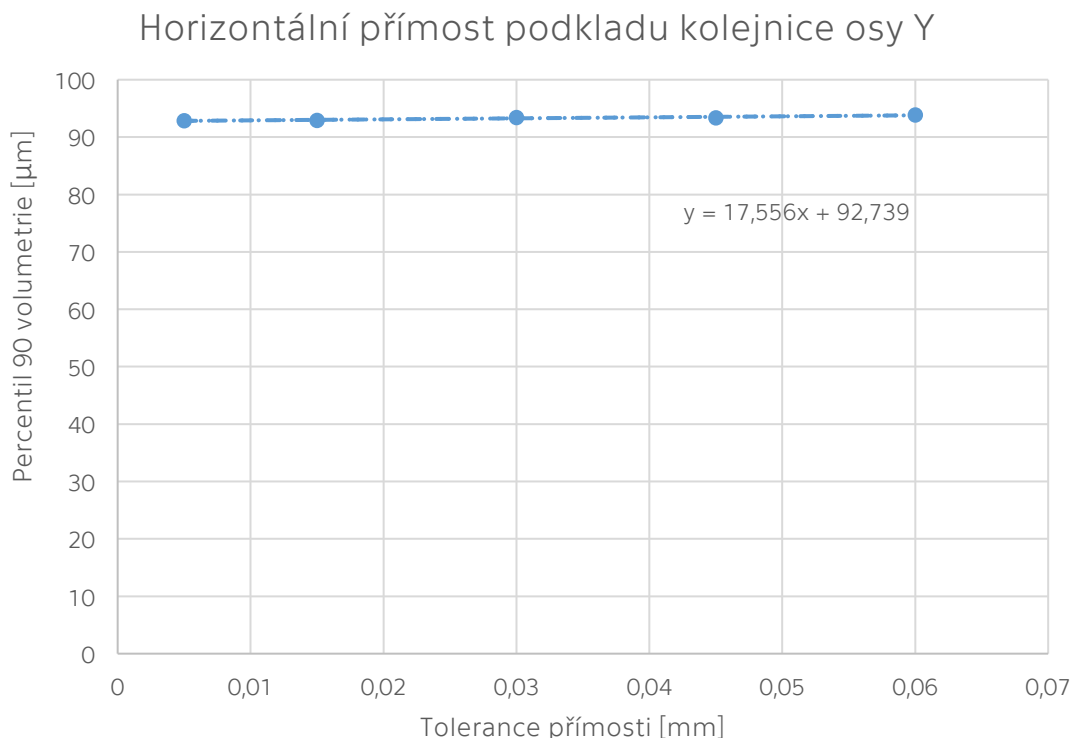
4.2.4 Vliv horizontální přímosti podkladu osy Y

Čtvrtá zkouška zkoumala vliv horizontální přímosti podkladových ploch kolejnic na ose Y. Nastavení experimentu je opět stejné a výsledky ukazuje Tab. 4.9.

Tab. 4.9: Reakce volumetrické chyby na změnu horizontální přímosti podkladu osy Y

Tolerance přímosti	Percentil 90 volumetrické chyby
0,005 mm	92,9 μm
0,015 mm	92,9 μm
0,03 mm	93,4 μm
0,045 mm	93,4 μm
0,06 mm	93,9 μm

Toto jsou poměrně zajímavé výsledky z pohledu, že ani výrazná změna tolerance přímosti nezpůsobí adekvátní změnu volumetrické přesnosti stroje. Po vynesení hodnot do grafu (Obr. 4.4) je vidět pouze mírný vzestup trendu a jeho směrnice je v porovnání s ostatními o hodně menší.



Obr. 4.4: Závislost percentilu 90 maximální volumetrické chyby na toleranci horizontální přímosti podkladové plochy pro kolejnice osy Y

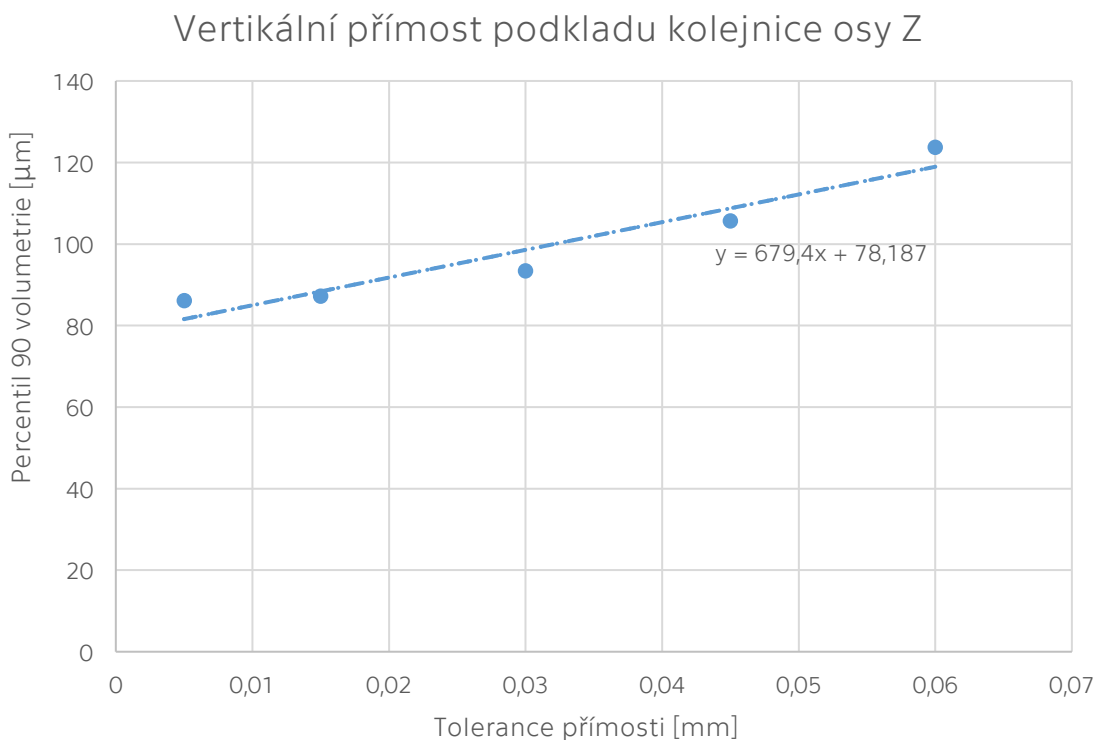
4.2.5 Vliv vertikální přímosti podkladu osy Z

Předposlední zkouškou byla citlivost volumetrické chyby na změnu vertikální (tedy normálové) přímosti podkladových ploch kolejnic pro osu Z. Zavedené nastavení experimentu vyneslo následující výsledky (Tab. 4.10).

Tab. 4.10: Reakce volumetrické chyby na změnu vertikální přímosti podkladu osy Z

Tolerance přímosti	Percentil 90 volumetrické chyby
0,005 mm	86,2 μm
0,015 mm	87,2 μm
0,03 mm	93,4 μm
0,045 mm	105,7 μm
0,06 mm	123,7 μm

Tyto výsledky jsou opět zaneseny do grafu (Obr. 4.5) a zavedena lineární spojnice trendu.



Obr. 4.5: Závislost percentilu 90 maximální volumetrické chyby na toleranci vertikální přímosti podkladové plochy pro kolejnice osy Z

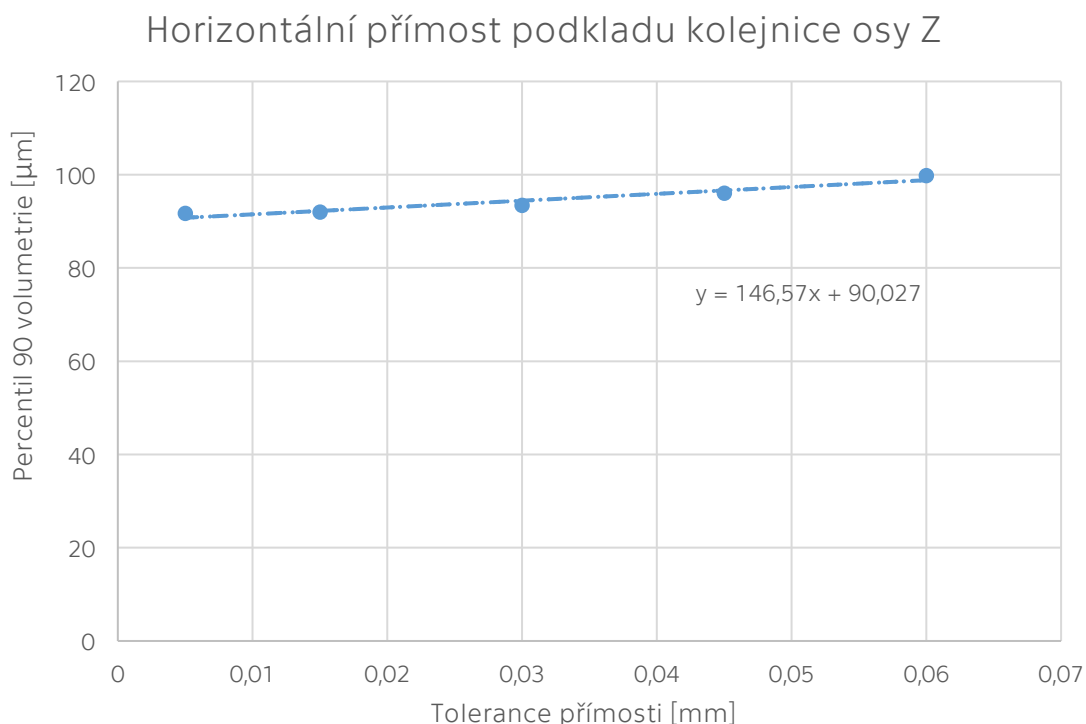
4.2.6 Vliv horizontální přímosti podkladu osy Z

Poslední zkouškou citlivosti jednotlivých os je zkoumání vlivu horizontální přímosti podkladových ploch pro kolejnice osy Z. Tentokrát jsou výsledky provedených simulací následující (Tab. 4.11)

Tab. 4.11: Reakce volumetrické chyby na změnu horizontální přímosti podkladu osy Z

Tolerance přímosti	Percentil 90 volumetrické chyby
0,005 mm	91,7 μm
0,015 mm	92,0 μm
0,03 mm	93,4 μm
0,045 mm	96,0 μm
0,06 mm	99,8 μm

Výsledky jsou vyneseny do grafu (Obr. 4.6) a zavedena lineární spojnice trendu. Ze všech prozatímních výsledků to vypadá, že horizontální přímosti nemají na volumetrickou chybu na simulovaném stroji významný vliv.



Obr. 4.6: Závislost percentilu 90 maximální volumetrické chyby na toleranci horizontální přímosti podkladové plochy pro kolejnice osy Z

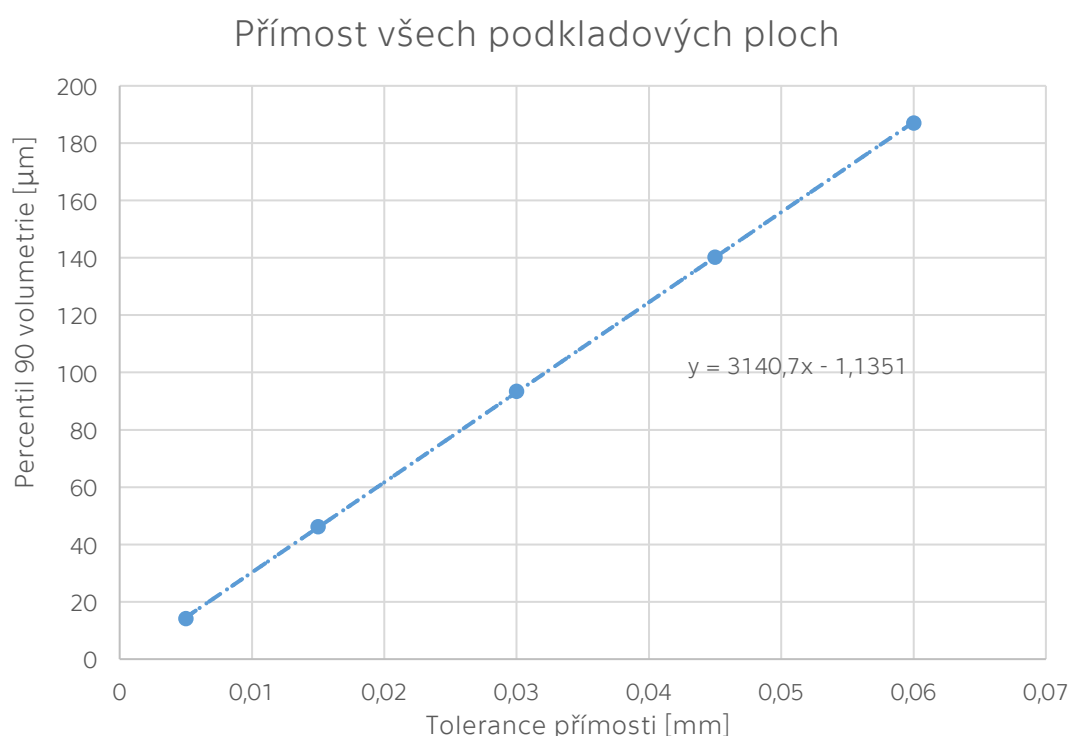
4.2.7 Úprava tolerancí přímosti všech os

Poslední experimentální simulací byla úprava všech tolerancí přímosti podkladových ploch kolejnic ve všech směrech a na všech osách naráz. Pro tuto úlohu jsou výsledky simulace následující (Tab. 4.12).

Tab. 4.12: Reakce volumetrické chyby na změnu tolerance všech přímostí

Tolerance přímosti	Percentil 90 volumetrické chyby
0,005 mm	14,1 μm
0,015 mm	46,3 μm
0,03 mm	93,4 μm
0,045 mm	140,3 μm
0,06 mm	187,1 μm

Vynesené hodnoty do grafu (Obr. 4.7) ukazují téměř dokonalou lineární závislost. Ta by měla protínat počátek, neboť stroj s absolutně přesnými osami by měl mít nulovou volumetrickou chybu.



Obr. 4.7: Závislost percentilu 90 maximální volumetrické chyby na toleranci přímosti všech podkladových ploch

4.2.8 Analýza citlivosti jednotlivých tolerancí přímosti

Ze všech grafů z předchozích kapitol lze odečíst směrnice spojnice lineárního trendu, pod kterou si lze představit míru vlivu jednotlivých tolerancí na výslednou volumetrickou přesnost.

Nezávisle na zkoumání citlivosti byla provedena ještě jedna simulace s následujícím nastavením a výsledky (Tab. 4.13). Tato simulace bude popsána později v této kapitole.

Tab. 4.13: Další simulace s různými vstupními parametry

Vert. Přím. X	Hor. Přím. X	Vert. Přím. Y	Hor. Přím. Y	Vert. Přím. Z	Hor. Přím. Z	P _{90%}
0,02 mm	0,06 mm	0,02 mm	0,06 mm	0,02 mm	0,06 mm	86,3 μm

Všemi simulacemi bylo navíc získáno hodně simulačních dat, ze kterých lze sestavit multilineární regresní model a z jeho koeficientů opět posuzovat vliv jednotlivých tolerancí, či dokonce bez dalších dlouhých simulací předvídat přesnost stroje pro jinou kombinaci tolerancí, s určitou odchylkou.

Koeficienty multilineárního regresního modelu jsou získány z následující maticové rovnice (81), kde β jsou koeficienty regresního modelu, γ je matice vstupních tolerancí přímosti do modelu (sloupce odpovídají směrům a osám, řádky jednotlivým simulacím) a δ je vektor simulovaných percentilů 90 volumetrické chyby, vždy příslušící k danému řádku s danými vstupy.

$$\beta = (\gamma^T \cdot \gamma)^{-1} \cdot \gamma^T \cdot \delta \quad (81)$$

Pro přibližné stanovení devadesátého percentilu volumetrické chyby pro jinou než simulovanou kombinaci vstupních přímostí stačí dosadit tyto přímosti do vztahu (82), kde X_{\uparrow} je tolerance vertikální přímosti podkladu osy X, X_{\rightarrow} je tolerance horizontální přímosti podkladu osy X a obdobně pro ostatní osy.

$$P_{90\%} = \beta_1 \cdot X_{\uparrow} + \beta_2 \cdot X_{\rightarrow} + \beta_3 \cdot Y_{\uparrow} + \beta_4 \cdot Y_{\rightarrow} + \beta_5 \cdot Z_{\uparrow} + \beta_6 \cdot Z_{\rightarrow} \quad (82)$$

Směrnice spojnic trendů z grafů předchozích kapitol a koeficienty lineárního regresního modelu jsou pro porovnání v Tab. 4.14.

Tab. 4.14: Citlivostní koeficienty jednotlivých tolerancí přímosti

Tolerance:	Směrnice trendu	Koeficient regrese
Vert. Přímost X	1171,6	1132,8
Horiz. Přímost X	105,85	157,8
Vert. Přímost Y	1059,4	1019,7
Horiz. Přímost Y	17,556	66,7
Vert. Přímost Z	679,4	639,4
Horiz. Přímost Z	146,57	198,7

V tabulce citlivostních koeficientů je vidět dominance vlivu tolerancí vertikální přímosti na podkladových plochách kolejnic pro modelovaný stroj. Znamená to, že určující vliv na celkovou přesnost stroje mají většinou právě tyto tolerance vertikálních, tedy normálových podkladových ploch a na horizontálních (bočních) tolerancích přímosti tolik nezáleží. S touto znalostí lze provést např. optimalizace předepsaných tolerancí, kdy se tolerance s menším vlivem uvolní a tolerance s vyšším vlivem naopak trochu zpřesní. Zpřesnění vlivnějších tolerancí bude mít sice za následek trochu 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 s trochu užší tolerancí přímosti vertikálních podkladových ploch kolejnic a naopak volnější tolerancí přímosti horizontálních podkladových ploch. Optimalizovaný percentil 90 maximální volumetrické chyby se při optimalizaci z výchozích hodnot zlepšil z 93,4 μm na 86,3 μm .

Popsané citlivostní koeficienty jsou linearizované, ve skutečnosti ale bylo vidět, že jsou závislosti spíše kvadratické. Takto linearizované hodnoty tedy mají omezenou platnost pro blízké okolí simulovaných tolerancí, jinde by vznikala značná odchylka.

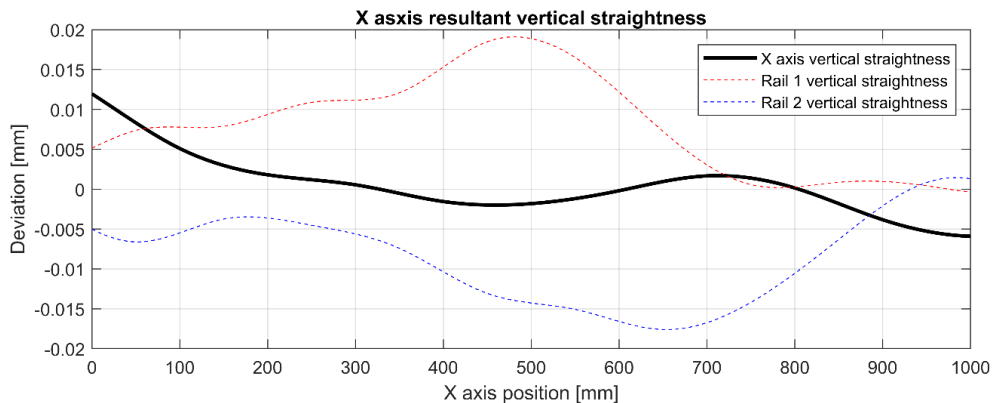
5 Závěr

Tato práce se zabývala volumetrickou přesností stroje a jejím původem v dílčích geometrických chybách. V teoretické části je představena sada 21 geometrických chyb stroje, jimiž je popsána geometrická přesnost tříosého obráběcího stroje. Byly ukázány vlastnosti jednotlivých chyb a způsob jejich měření, ať už přímý či nepřímý. Geometrická přesnost stroje je jedna z jeho klíčových vlastností a pečlivě se kontroluje při přejímce stroje – k tomu náleží příslušné normy, např. v práci popsaný soubor norem ISO 230, který normalizuje označování geometrických chyb, ukazuje způsoby měření a dále stanovuje další konvence určování geometrické přesnosti stroje. Kromě geometrické přesnosti byla představena i chyba volumetrická, její význam a způsob měření. Zároveň byl popsán i způsob, jak volumetrickou chybu modelovat ze sady 21 dílčích geometrických chyb.

V dalších kapitolách teoretického a praktického úvodu byl ukázán současný stav řešené problematiky v několika tématech. Rešerší a studiem četných akademických výzkumných prací bylo ukázáno přenášení chyb z podkladových ploch na kolejnici při montáži osy, efekt průměrování chyb valivým vedením a tlumící vlastnosti tohoto efektu a vliv statického zatížení na změnu průběhu geometrických chyb.

Poznatky z akademických prací zmíněných v rešeršní části byly pak použity k matematickému modelování. Základ tvoří odvozený silový výpočet staticky neurčitýho systému, který tvoří absolutně tuhý suport se čtyřmi poddajnými vozíky lineárního vedení v rozích na dvou kolejnicích. Každý vozík je pak vychýlen z ideální polohy určitou odchylkou, představující chybu přímosti v daném bodě a směru. V tomto systému jsou vypočteny silové účinky a deformace jednotlivých vozíků, ze kterých jsou dále stanoveny celkové úhlové chyby a chyby přímosti složené osy.

Pro tento model byl následně vytvořen generátor náhodných chybových profilů podkladových ploch pro kolejnice se zadáním tolerancí, díky kterému lze sestavit kompletní model geometrických chyb lineární osy s vytvořením průběhů všech chyb podél zdvihu. Generátor byl sestaven na základě měřených dat tak, aby charakter generovaných křivek odpovídal charakteru skutečných měřených průběhů. Generátor lze ladit pomocí dvou parametrů – délková perioda chyby a její násobitel. Příklad výstupu generátoru sestavené lineární osy se zobrazením profilu obou kolejnic a výsledného průběhu přímosti ve vertikálním směru kolejnice je na Obr. 5.1.

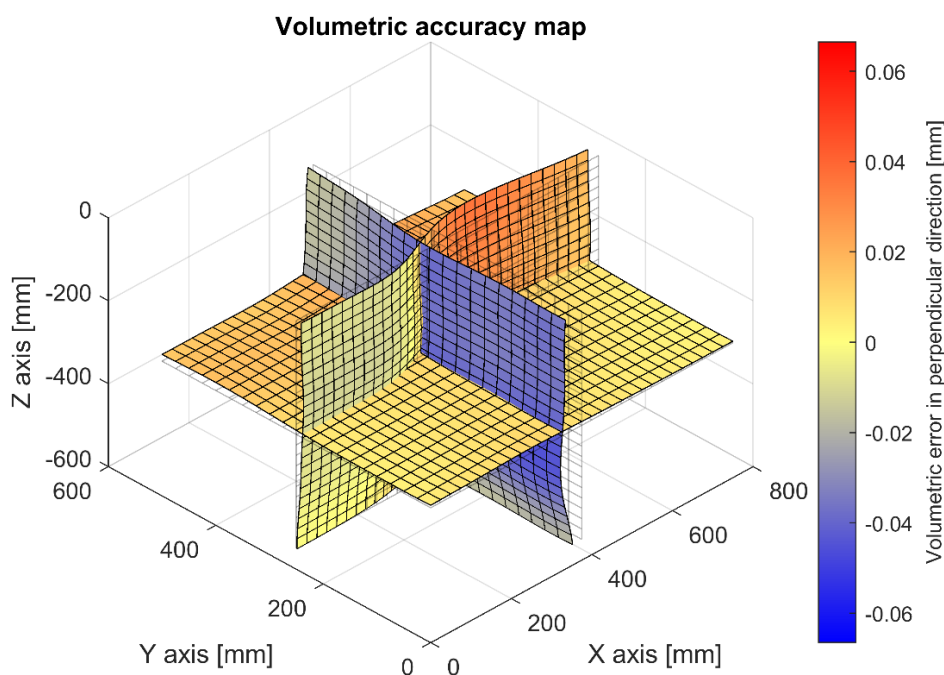


Obr. 5.1: Jeden z výstupů modelu (průběh přímosti ve vertikálním směru) složené osy se zahrnutým generátorem náhodných profilů

Popsány byly i statistické vlastnosti takto složeného modelu, histogram rozdělení generované přímosti při zadané toleranci a histogram rozdělení procentuálního zlepšení přímosti. Zároveň byla provedena citlivostní analýza, která zkoumala vliv roztečí vozíků lineárního vedení na celkové zlepšení přímosti v percentilu 90 a dalších statistických vlastnostech. Ke zlepšení přímosti celkové osy oproti přímosti jednotlivých kolejnic dochází vždy, ale efekt potlačení přenosu vstupní chyby je výraznější pro osy s menším zdvihem a pro delší rozteče vozíků na kolejnici, rozstup kolejnic nemá vliv. Všechny statistické analýzy byly vytvořeny z desítek tisíců simulovaných vzorků. Ze všech výsledků si lze odnést jeden univerzální poznatek – sestavená lineární osa snižuje vliv vstupních chyb přímosti podkladových ploch kolejnic ve většině případů na polovinu či lépe. Otevřenou otázkou zůstává pravděpodobnostní rozdělení reálné vyráběné geometrické tolerance přímosti.

Dále byla v práci modelována volumetrická chyba z jednotlivých dílčích geometrických chyb, kterých je na třiosém stroji celkem 21. Jako modelovaný stroj posloužilo vertikální frézovací centrum MCV 754 Quick s rámem tvaru C a křížovým stolem. Volumetrická chyba byla modelována pomocí kinematické struktury stroje a homogenních transformačních matic, popisujících danou strukturu a chybové transformace v klíčovém bodech struktury. Výstupem tohoto modelu je vypočtená volumetrická chyba v libovolném bodě pracovního prostoru a informace o maximální hodnotě absolutní velikosti volumetrické chyby, což je srovnávací parametr volumetrické přesnosti strojů. K dispozici byla i měřená volumetrická chyba tohoto stroje v celém pracovním prostoru, ze které byly pomocí aplikace Trac-cal vypočteny i všechny dílčí geometrické chyby. Tyto vypočtené geometrické chyby byly dosazeny do speciálně upraveného modelu volumetrické chyby a ověřena jeho platnost shodou s měřenými daty. Protože aplikace Trac-cal při výpočtu neuvažuje kinematickou konfiguraci ani rozměry stroje, nejsou geometrické chyby vypočteny úplně správně.

V modelu volumetrické chyby pak byly nahrazeny měřené geometrické chyby simulovanými chybami, které vznikají díky modelu geometrických chyb s generátorem náhodných chybových profilů přímosti podkladových ploch kolejnic. Vstup byl ještě doplněn generováním chyb polohování a chyb vzájemné kolmosti, které model geometrických chyb složené osy nevytváří. Tím vzniká komplexní model generující stroje s náhodnými průběhy geometrických chyb a s popsányi volumetrickými chybami v celém prostoru. Příklad volumetrické mapy která je jedním z výstupů tohoto modelu je na Obr. 5.2.



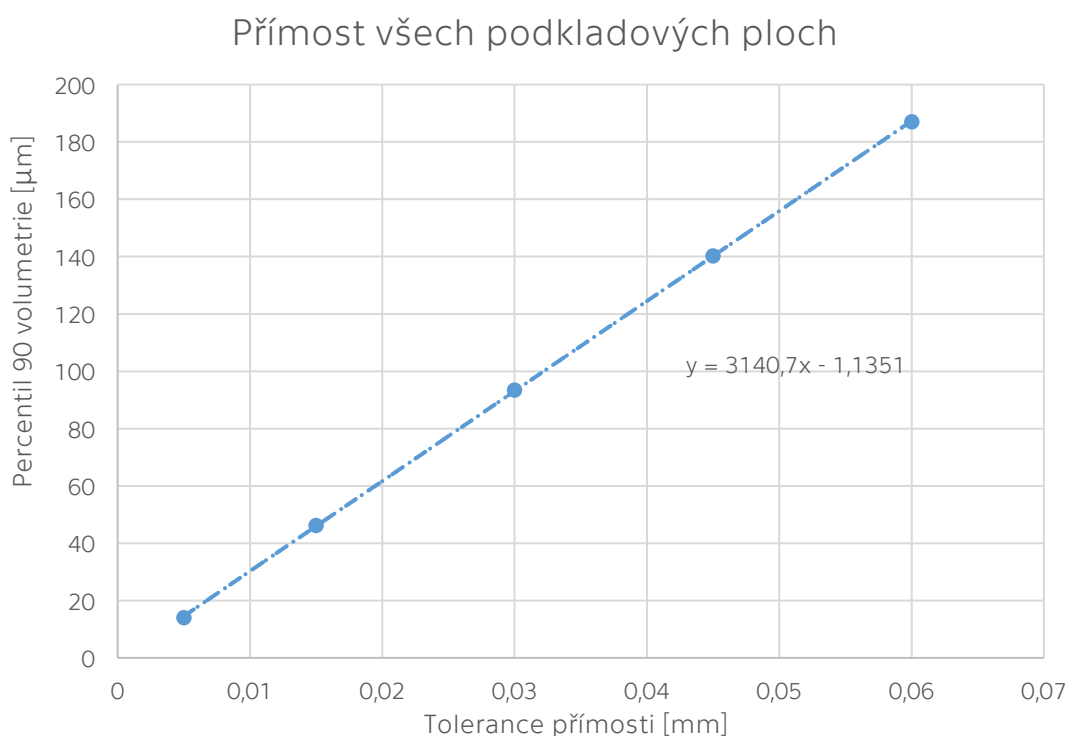
Obr. 5.2: Volumetrická mapa stroje s náhodnými chybami

Model generující stroje s náhodnými chybami byl také podroben statistické analýze (50 000 simulačních vzorků), která umožňuje předpovědět volumetrickou přesnost stroje na základě předepsaných tolerancí jednotlivých přímostí, chyb polohování a maximální povolené chybě vzájemné kolmosti a dalších vstupních parametrů.

Při změně jednotlivých tolerancí přímosti, vyřazení chyby polohování a kolmosti a opakování statistické analýzy byla pak vytvořena citlivostní analýza pro jednotlivé tolerance přímosti. Závislost maximální volumetrické chyby na dílčí toleranci přímosti má přibližně kvadratický průběh, pro určení citlivosti byla ale linearizována a pro úplnost byl sestaven multilineární regresní model. Jako dominantní se ukázal vliv tolerance přímosti na normálových podkladových plochách kolejnic. Tolerance přímosti na bočních podkladových plochách měla na celkovou volumetrickou přesnost stroje malý vliv.

Díky zjištěným citlivostním koeficientům lze optimalizovat předepisované tolerance přímosti na podkladových plochách kolejnic dílců nosné struktury (lože, stojan, křížové saně) pro stroj typu MCV 754 Quick tak, aby byla výroba dílců nosné struktury stroje levnější a zároveň se zlepšila maximální volumetrická chyba.

Posledním výsledkem práce je graf na Obr. 5.3, který ukazuje přímou vazbu mezi všemi předepisovanými tolerancemi přímosti a výsledným devadesátým percentilem maximální volumetrické chyby pro modelovaný stroj. Závislost v grafu může sloužit jako rychlý odhad volumetrické přesnosti podobných strojů pouze ze znalosti jejich geometrických tolerancí.



Obr. 5.3: Závislost percentilu 90 maximální volumetrické chyby na toleranci přímosti všech podkladových ploch

Použitá literatura a zdroje

- [1] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. Praha: MM publishing, 2006. MM speciál. ISSN 1212-2572.
- [2] ČSN ISO 230-1:2014, *Zásady zkoušek obráběcích strojů – Část 1: Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za kvazistatických podmínek*, ICS 25.080.01. 1. vyd. Praha: ÚNMZ, leden 2014.
- [3] SCHWENKE, H., W. KNAPP, H. HAITJEMA, A. WECKENMANN, R. SCHMITT a F. DELBRESSINE. Geometric error measurement and compensation of machines – An update. *CIRP Annals* [online]. 2008, 57(2), 660-675 [cit. 2020-10-31]. ISSN 00078506. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirp.2008.09.008
- [4] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů III*. Praha: MM publishing, 2014. MM speciál. ISBN 9788026067801.
- [5] ČSN ISO 230-2:2016, *Zásady zkoušek obráběcích strojů – Část 2: Určení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách*, ICS 25.080.01, 1. vyd., Praha: ÚNMZ, leden 2016.
- [6] ČSN ISO 230-4:2005, *Zásady zkoušek obráběcích strojů – Část 4: Zkoušky kruhové interpolace u číslicově řízených obráběcích strojů*, ICS 25.040.20, 2. vyd., Praha: ÚNMZ, září 2010.
- [7] MORÁVEK, M. *Výzkum přesnosti pětiosých frézovacích center*, Praha, 2018. Disertační práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení.
- [8] LEE, Eung-Suk, Suk-Hwan SUH a Jin-Wook SHON. A comprehensive method for calibration of volumetric positioning accuracy of CNC-machines. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 1998, 14(1), 43-49 [cit. 2020-10-31]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/BF01179416
- [9] SU, Shiping; LI, Shengyi; WANG, Guilin. Identification method for errors of machining center based on volumetric error model. *Jixie Gongcheng Xuebao(Chinese Journal of Mechanical Engineering)(China)*, 2002, 38.7: 121-125.
- [10] SARTORI, S. a G.X. ZHANG. Geometric Error Measurement and Compensation of Machines. *CIRP Annals* [online]. 1995, 44(2), 599-609 [cit. 2020-11-01]. ISSN 00078506. Dostupné z: doi:10.1016/S0007-8506(07)60507-1
- [11] SOMETCZ [online]. [cit. 2020-12-01]. Dostupné z: <https://somet.cz/cz/mostove-litinove-pravitko-500x40-mm-1-27058>
- [12] SOMETCZ [online]. [cit. 2020-12-01]. Dostupné z: <https://somet.cz/cz/vodovaha-strojni-digitalni-podelna-200mm-schut>

- [13] ČSN ISO 10791-7: 2005, *Podmínky zkoušek pro obráběcí centra – Část 7: Přesnost dokončovaného zkušebního obrobku*. ICS 25.080.20, Praha: ÚNMZ, srpen 2005.
- [14] TRAPET, Eugen, Juan-José AGUILAR MARTÍN, José-Antonio YAGÜE, Henny SPAAN a Vit ZELENÝ. Self-centering probes with parallel kinematics to verify machine-tools. *Precision Engineering* [online]. 2006, 30(2), 165-179 [cit. 2020-12-02]. ISSN 01416359. Dostupné z: doi:10.1016/j.precisioneng.2005.07.002
- [15] *Etalonproducts* [online]. [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: <https://www.etalonproducts.com/en/products/lasertracer/>
- [16] Holub, M.; Jankovych, R.; Vetiska, J.; Sramek, J.; Blecha, P.; Smolik, J.; Heinrich, P. Experimental Study of the Volumetric Error Effect on the Resulting Working Accuracy—Roundness. *Appl. Sci.* 2020, 10, 6233. Dostupné z: doi:10.1016/j.precisioneng.2005.07.002
- [17] TEISSANDIER, Denis, Yann LEDOUX, Santiago ARROYAVE-TOBON, Vincent DELOS a Jean Marc LINARES. Effect of form errors on the positioning precision of over-constrained systems. *CIRP Annals* [online]. 2019, 68(1), 519-522 [cit. 2021-01-08]. ISSN 00078506. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirp.2019.04.068
- [18] ZHANG, Zhiqiang, Jianhua LIU, Nabil ANWER, Laurent PIERRE a Nan SHAO. Integration of surface deformations into polytope-based tolerance analysis: application to an over-constrained mechanism. *Procedia CIRP* [online]. 2020, 92, 21-26 [cit. 2021-01-08]. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2020.05.175
- [19] BALLU, A., J.-Y. PLANTEC a L. MATHIEU. Geometrical reliability of overconstrained mechanisms with gaps. *CIRP Annals* [online]. 2008, 57(1), 159-162 [cit. 2021-01-08]. ISSN 00078506. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirp.2008.03.038
- [20] CAMMARATA, Alessandro. A novel method to determine position and orientation errors in clearance-affected overconstrained mechanisms. *Mechanism and Machine Theory* [online]. 2017, 118, 247-264 [cit. 2021-01-08]. ISSN 0094114X. Dostupné z: doi:10.1016/j.mechmachtheory.2017.08.012
- [21] ZHONG, Xuemin, Hongqi LIU, Xinyong MAO, Bin LI a Songping HE. Influence and error transfer in assembly process of geometric errors of a translational axis on volumetric error in machine tools. *Measurement* [online]. 2019, 140, 450-461 [cit. 2021-01-08]. ISSN 02632241. Dostupné z: doi:10.1016/j.measurement.2019.04.032
- [22] TONG, Van-Canh, Sun-Woong KWON a Seong-Wook HONG. Modeling of Moving Table with Linear Roller Guides Subjected to Geometric Errors In Guide Rails. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* [online]. 2020, 21(10), 1903-1919 [cit. 2021-01-09]. ISSN 2234-7593. Dostupné z: doi:10.1007/s12541-020-00394-w

- [23] RAHMANI, Mahdi a Friedrich BLEICHER. Experimental and Numerical Studies of the Influence of Geometric Deviations in the Performance of Machine Tools Linear Guides. *Procedia CIRP* [online]. 2016, 41, 818-823 [cit. 2021-01-09]. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2015.08.089
- [24] MAJDA, Paweł. Modeling of geometric errors of linear guideway and their influence on joint kinematic error in machine tools. *Precision Engineering* [online]. 2012, 36(3), 369-378 [cit. 2021-01-09]. ISSN 01416359. Dostupné z: doi:10.1016/j.precisioneng.2012.02.001
- [25] NI, Yanbing, Haiyang ZHOU, Cuiyan SHAO a Jinhe LI. Research on the Error Averaging Effect in A Rolling Guide Pair. *Chinese Journal of Mechanical Engineering* [online]. 2019, 32(1) [cit. 2021-01-09]. ISSN 1000-9345. Dostupné z: doi:10.1186/s10033-019-0386-y
- [26] RAHMANI, Mahdi a Friedrich BLEICHER. Experimental and Analytical Investigations on Normal and Angular Stiffness of Linear Guides in Manufacturing Systems. *Procedia CIRP* [online]. 2016, 41, 795-800 [cit. 2021-5-5]. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2015.12.033
- [27] MCV 754 Quick. *Kovosvit MAS* [online]. [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: <https://www.kovosvit.cz/mcv-754-quick-p3.html>
- [28] STEJSKAL, Vladimír a Michael VALÁŠEK. *Kinematics and dynamics of machinery*. New York: Marcel Dekker, 1996. ISBN 978-0824797317.
- [29] BHANDARI, Prita. The standard normal distribution. *Scribbr* [online]. 5. 11. 2020 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.scribbr.com/statistics/standard-normal-distribution/>

Seznam obrázků

Obr. 2.1: Geometrické chyby vozíku v ose X [2]	14
Obr. 2.2: Přímost osy X ve směru osy Y	15
Obr. 2.3: Obousměrná chyba a opakovatelnost nastavení polohy v ose X [5]	18
Obr. 2.4: Výstup testu kruhové interpolace stroje s vůlí v pohybovém mechanismu osy [6]	18
Obr. 2.5: Chyba vzájemné kolmosti os X a Y a její vliv na výsledek testu kruhové interpolace [6]	19
Obr. 2.6: Přehled technických prostředků pro měření geometrické přesnosti strojů [4]	20
Obr. 2.7: Měření přímosti osy X ve směru Z a vliv vzorkovací frekvence [2] ..	20
Obr. 2.8: Měření chyby polohování pomocí laser interferometru [3]	21
Obr. 2.9: Litinové pravítko mostové [11]	21
Obr. 2.10: Měření přímosti osy pomocí laser interferometru [3]	21
Obr. 2.11: Elektronická strojní vodováha SCHUT [12]	22
Obr. 2.12: Laser interferometr s úhlovou optikou [3]	22
Obr. 2.13: Přehled metod a zařízení, které lze použít pro měření geometrických chyb stroje [10]	23
Obr. 2.14: Zkušební obrobek pro zkoušku přesnosti [13]	25
Obr. 2.15: Měřící artefakt a samocentrovatelná hlava [14]	26
Obr. 2.16: 12 čar potřebných k proměření pracovního prostoru stroje [9] ..	26
Obr. 2.17: Měřené volumetrické vlastnosti stroje	27
Obr. 2.18: Volumetrické chyby pracovního prostoru stroje [16]	28
Obr. 2.19: Sestava laser tracerů pro kontinuální měření [15]	28
Obr. 2.20: Jednotlivé geometrické chyby vozíku na ose X [2]	29
Obr. 2.21: Vizualizace chybové transformace [8]	30
Obr. 2.22: Průběhy přímostí experimentálního měření [21]	32
Obr. 2.23: Poměr vlnové délky chyby a délky vozíku na amplitudu přenesené chyby [22]	33
Obr. 2.24: Simulace výsledné přímosti pro lineární pojezd [22]	34
Obr. 2.25: Způsob zavedení odchylky přímosti ve vertikálním směru [23] ...	35
Obr. 2.26: Vybrané simulované průběhy přenesené přímosti [24]	35
Obr. 2.27: Vliv zatížení na průběh přímosti [22]	36
Obr. 3.1: Závislost deformace hnízd valivého vedení na zatěžující síle [26].	39
Obr. 3.2: Schéma znázorňující nahrazení vozíků pružinami + zavedení zatěžujících sil	39
Obr. 3.3: Indexace bodů hnízd valivého vedení, kolejnic a značení důležitých rozměrů	40
Obr. 3.4: Značení vertikální a horizontální odchylky	40
Obr. 3.5: Náhradní mechanická soustava v obecné poloze, se zavedením odchylek kolejnic a deformací vozíků ve vertikálním směru	41

Obr. 3.6: Uvolnění náhradní soustavy, vertikální síly	41
Obr. 3.7: Znázornění deformační podmínky vertikálního směru	42
Obr. 3.8: Vizualizace výsledné roviny pro vertikální odchylky.....	44
Obr. 3.9: Náhradní mechanická soustava v obecné poloze, se zavedením odchylek kolejnic a deformací vozíků v horizontálním směru.....	45
Obr. 3.10: Uvolnění náhradní soustavy, horizontální síly	45
Obr. 3.11: Přímost podkladu vedení brusky s délkou kolejnic 6 000 mm.....	49
Obr. 3.12: Rovinnost podkladu hydrostatického vedení experimentálního standu. Délka kolejnice 1 400 mm, rovinnost 0,007 mm.....	49
Obr. 3.13: Přímost ploch pro kolejnice osy Y vertikálního obráběcího centra, délka kolejnice 1 900 mm, přímost 0,014 mm.....	50
Obr. 3.14: Přímost podkladu vedení brusky, délka kolejnice 6 000 mm	50
Obr. 3.15: Přímost plochy pro kolejnici vertikálního obráběcího centra, délka kolejnice 1 700 mm	50
Obr. 3.16: Schéma a princip generování náhodných profilů	51
Obr. 3.17: Kompletní vývojový diagram procesu generování chybových profilů.....	52
Obr. 3.18: Jeden z generovaných profilů.....	53
Obr. 3.19: Generovaný profil s vysokou frekvencí chyb	53
Obr. 3.20: Výstupní vertikální přímost, včetně zobrazení původní přímosti kolejnic	55
Obr. 3.21: Výstupní horizontální přímost, včetně zobrazení původní přímosti kolejnic	55
Obr. 3.22: Výstupní rotační geometrické chyby.....	55
Obr. 3.23: Další výstupní vertikální přímost, včetně zobrazení původní přímosti kolejnic	56
Obr. 3.24: Další výstupní horizontální přímost, včetně zobrazení původní přímosti kolejnic	56
Obr. 3.25: Další výstupní rotační geometrické chyby	56
Obr. 3.26: Značení a umístění 21 geometrických chyb na stroji s C-rámem a křížovým stolem	58
Obr. 3.27: Modelovaný stroj, MAS MCV 754 Quick [27]	59
Obr. 3.28: Kinematický diagram stroje MCV 754 Quick (konfigurace ZFYX) ..	59
Obr. 3.29: Kompletní kinematické schéma MCV 754 Quick.....	60
Obr. 3.30: Nesouhlasné průběhy jednotlivých složek volumetrické chyby ..	65
Obr. 3.31: Souhlasné průběhy jednotlivých složek volumetrické chyby	66
Obr. 3.32: Průběh jednotlivých složek mimo počátek souřadnic s odchylkou od měřených dat	66
Obr. 3.33: Volumetrická mapa stroje před kompenzací (zobrazuje se velikost celkové volumetrické chyby)	67
Obr. 3.34: Volumetrická mapa stroje po kompenzaci (zobrazuje se velikost celkové volumetrické chyby)	67
Obr. 3.35: Umístění a orientace kolejnic na stroji MCV 754 Quick.....	69

Obr. 3.36: Průběhy volumetrických chyb jednotlivých os náhodného stroje, 1. vzorek.....	71
Obr. 3.37: Průběhy celkové volumetrické chyby náhodného stroje, 1. vzorek	71
Obr. 3.38: Mapa volumetrických chyb v osách kolmých na zobrazovanou plochu, 1. vzorek	72
Obr. 3.39: Mapa celkové volumetrické chyby, 1. vzorek	72
Obr. 3.40: Průběhy volumetrických chyb jednotlivých os náhodného stroje, 2. vzorek.....	73
Obr. 3.41: Průběhy celkové volumetrické chyby náhodného stroje, 2. vzorek	73
Obr. 3.42: Mapa volumetrických chyb v osách kolmých na zobrazovanou plochu, 2. vzorek	74
Obr. 3.43: Mapa celkové volumetrické chyby, 2. vzorek	74
Obr. 3.44: Normální (Gaussovo) rozdělení pravděpodobnosti [29].....	75
Obr. 3.45: Histogram pravděpodobnostního rozdělení generované přímosti při toleranci 0,05 mm	76
Obr. 3.46: Histogram zlepšení vertikální přímosti sestavené osy.....	77
Obr. 3.47: Histogram zlepšení horizontální přímosti sestavené osy	77
Obr. 3.48: Histogram rozdělení maximální volumetrické chyby stroje	79
Obr. 4.1: Závislost percentilu 90 maximální volumetrické chyby na toleranci vertikální přímosti podkladové plochy pro kolejnice osy X	85
Obr. 4.2: Závislost percentilu 90 maximální volumetrické chyby na toleranci horizontální přímosti podkladové plochy pro kolejnice osy X.....	86
Obr. 4.3: Závislost percentilu 90 maximální volumetrické chyby na toleranci vertikální přímosti podkladové plochy pro kolejnice osy Y.....	87
Obr. 4.4: Závislost percentilu 90 maximální volumetrické chyby na toleranci horizontální přímosti podkladové plochy pro kolejnice osy Y.....	88
Obr. 4.5: Závislost percentilu 90 maximální volumetrické chyby na toleranci vertikální přímosti podkladové plochy pro kolejnice osy Z.....	89
Obr. 4.6: Závislost percentilu 90 maximální volumetrické chyby na toleranci horizontální přímosti podkladové plochy pro kolejnice osy Z.....	90
Obr. 4.7: Závislost percentilu 90 maximální volumetrické chyby na toleranci přímosti všech podkladových ploch	91
Obr. 5.1: Jeden z výstupů modelu (průběh přímosti ve vertikálním směru) složené osy se zahrnutým generátorem náhodných profilů.....	95
Obr. 5.2: Volumetrická mapa stroje s náhodnými chybami.....	96
Obr. 5.3: Závislost percentilu 90 maximální volumetrické chyby na toleranci přímosti všech podkladových ploch	97

Seznam tabulek

Tab. 2.1: Části normy ISO 230 [2].....	17
Tab. 3.1: Rozměry suportů jednotlivých os stroje MCV 754 Quick.....	68
Tab. 3.2: Nahrazování jednotlivých geometrických chyb stroje MCV 754 Quick generovanými chybami.....	70
Tab. 3.3: Vstupní parametry volumetrického modelu náhodného stroje	70
Tab. 3.4: Výchozí vstupní hodnoty pro statistické informace.....	76
Tab. 4.1: První úprava vstupních parametrů	81
Tab. 4.2: Druhá úprava vstupních parametrů	82
Tab. 4.3: Třetí úprava vstupních parametrů	82
Tab. 4.4: Různé hodnoty přímosti pro analýzu.....	84
Tab. 4.5: Výchozí tolerance pro analýzu	84
Tab. 4.6: Reakce volumetrické chyby na změnu vertikální přímosti podkladu osy X.....	85
Tab. 4.7: Reakce volumetrické chyby na změnu horizontální přímosti podkladu osy X	86
Tab. 4.8: Reakce volumetrické chyby na změnu vertikální přímosti podkladu osy Y.....	87
Tab. 4.9: Reakce volumetrické chyby na změnu horizontální přímosti podkladu osy Y.....	88
Tab. 4.10: Reakce volumetrické chyby na změnu vertikální přímosti podkladu osy Z.....	89
Tab. 4.11: Reakce volumetrické chyby na změnu horizontální přímosti podkladu osy Z.....	90
Tab. 4.12: Reakce volumetrické chyby na změnu tolerance všech přímostí	91
Tab. 4.13: Další simulace s různými vstupními parametry	92
Tab. 4.14: Citlivostní koeficienty jednotlivých tolerancí přímosti	93

Seznam příloh

Elektronické přílohy

Mat_modely.rar	Matlab skripty a zdrojová data matematických modelů
DP_1797_Valasek.pdf	Elektronická verze diplomové práce