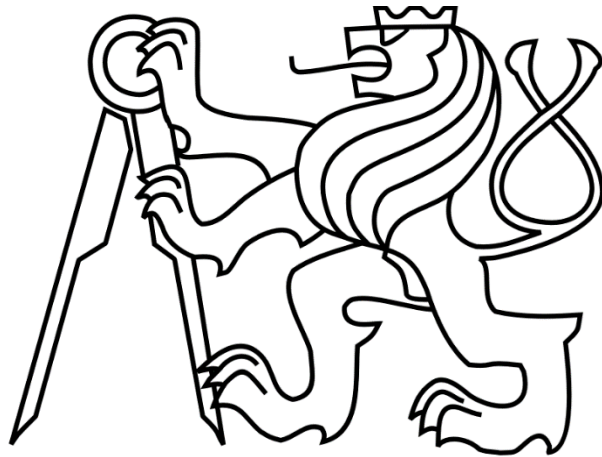


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Diplomová práce

Virtuální model laserového stroje a analýza jeho vlastností

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kosenko** Jméno: **Alexander** Osobní číslo: **437107**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav výrobních strojů a zařízení**
Studijní program: **Průmysl 4.0**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Virtuální model laserového stroje a analýza jeho vlastností

Název diplomové práce anglicky:

Virtual model of the laser machine tool and analysis of its properties

Pokyny pro vypracování:

Popis tématu: Student sestaví virtuální model laserového stroje firmy VANAD z MKP modelu jeho nosné struktury, modelu pohonů a modelu jejich regulace. Na tomto virtuálním modelu bude analyzovat jeho statické a modální vlastnosti a této analýze využije pro určení vhodného naladění regulace pohonů pro tento stroj; Osnova práce: Sestavení virtuálního modelu stroje propojením modelů nosné struktury, pohonů a regulace. Analýza statických a modálních vlastností stroje. Analýza možností nastavení regulace pohonů; Bez grafické části; Rozsah textové části 60-80 stran;

Seznam doporučené literatury:

SOUČEK, Pavel. Servomechanismy ve výrobních strojích. Praha: ČVUT v Praze, 2005; VESELÝ, Jan. Komplexní modelování dynamiky a řízení NC strojů. [Disertační práce]. Praha: ČVUT v Praze, 2009; KOLÁŘ, Petr, SULITKA, Matěj, MATYSKA, Vojtěch, FOJTŮ, Petr. Optimization of five-axis finish milling using a virtual machine tool. Praha: MM SCIENCE, 2019;

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Vojtěch Matyska, Ph.D., ústav výrobních strojů a zařízení FS

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

Ing. Aleš Šimůnek, ústav výrobních strojů a zařízení FS

Datum zadání diplomové práce: **29.10.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **04.01.2021**

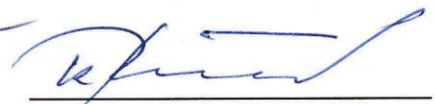
Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2021**



Ing. Vojtěch Matyska, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



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

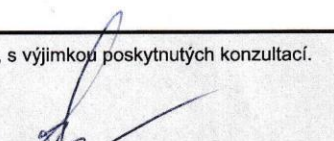


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

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.

10.12.2020
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 4.1.2021

podpis  _____

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Vojtěchovi Matyskovi Ph.D. za vedení této diplomové práce, vstřícnost a důkladné odborné konzultace, cenné podněty. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Aleši Šimůnkovi za odborné konzultace, stálou podporu a trpělivost při tvorbě modelu v nových pro mě prostředích.

Současně bych chtěl moc poděkovat Ing. Matěji Sulitkovi Ph.D. a Ing. Janu Moravcovi, Ph.D. za cenné rady a podporu během celého mého magisterského studia.

Anotace

Autor:	Bc. Alexander Kosenko
Název DP:	Virtuální model laserového stroje a analýza jeho vlastností
Rozsah práce:	80 stran
Školní rok vyhotovení:	2020/2021
Škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ú 12135 - Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí DP:	Ing. Vojtěch Matyska, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Aleš Šimůnek
Zadavatel:	ČVUT FS
Využití:	Analýzy nastavení parametrů regulace pohonu. Analýza přínosu jednotlivých komponent na regulaci.
Klíčová slova:	Komplexní model, MKP, kaskádní regulace, Gantry řízení, dráhové řízení
Anotace:	<p>Diplomová práce se zabývá tvorbou komplexního modelu laserového pálicího stroje od značky VANAD.</p> <p>Tento komplexní model byl vytvořen propojením diskreditovaného modelu mechanické stavby stroje a modelu regulace pohonu. Na modelu byla provedena simulace dráhového řízení.</p> <p>Výsledný komplexní model byl použit pro analýzy nastavení regulace pohonu a vlivu na přesnost dráhového řízení.</p> <p>Výsledkem práce jsou regulační parametry stroje a citlivostní analýza přínosu vyztužení jednotlivých komponent na kvalitu regulace a dráhového řízení.</p>



Annotation

Author:	Bc. Alexander Kosenko
Title of master dissertation:	Virtual model of the laser machine tool and analysis of its properties
Extent:	80 pages
Academic year:	2020/2021
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú12135 – Department of Production Machines and Equipment
Supervisor:	Ing. Vojtěch Matyska, Ph.D..
Consultant:	Ing. Aleš Šimůnek
Submitter of the Theme:	CTU FME
Application:	The analysis of reachable control system parameters. The analysis of single machine components influence on reached control system parameters
Key words:	Complex model, FEM, cascade control, Gantry control system, path control
Annotation:	The diploma thesis deals with the complex model creation of a laser cutting machine from the VANAD. This complex model was created by coupling finite element representation of the machine tool structure with feed drive control system. The coupled model was used to simulate the tool path control. The analysis of control system parameters and toolpath accuracy is done based on the final complex model. The recommended control system parameters and analysis of components reinforcement influence of on that system are the work results



Obsah

Úvod.....	12
1. Laserové pálicí stroje.....	13
1.1 Vanad KOMPAKT laser.....	13
1.2 Vanad MIRON laser.....	15
1.3 TRUMPF TruLaser 1030 fiber.....	15
1.5 LYNX FL.....	16
1.6 Další výrobce a shrnutí.....	17
2. Konstrukční provedení stroje.....	18
2.1 Sestava pohonu laserových CNC strojů.....	20
2.1.1 Vedení CNC obráběcích strojů.....	20
2.1.2 Pastorek a hřeben.....	21
2.1.3 Kuličkový šroub a matice.....	21
2.1.4 Lineární motor.....	22
3. Virtuální modelování strojů a obrábění.....	24
3.1 Komplexní virtuální modelování strojů a obrábění.....	25
3.2 CAM.....	26
3.3 Kontrola NC dat.....	28
3.4 Interpolátor a řídicí systém stroje.....	29
3.5 Propojený model stroje.....	30
3.5.1 Metoda konečných prvků.....	30
3.5.2 Pomocné a vazebné prvky.....	32
3.5.3 Náhrada komponent.....	32
3.5.4 Numerická modální analýza.....	32
3.5.5 Modální redukce.....	35
3.6 Stavový prostor.....	36
3.7 Kaskádní regulace.....	37
3.7.1 Proudová zpětná vazba.....	38
3.7.2 Rychlostní zpětná vazba.....	38
3.7.3 Polohová zpětná vazba.....	39
3.7.4 Odměřování.....	40
3.7.5 Filtry.....	40
3.7.6 Feedforwardy.....	41



3.8 Speciální případy řízení	42
3.8.1 Master Slave	42
3.8.2 Gantry.....	43
3.9 Interakce obrobku a nástroje	44
4. Tvorba propojeného modelu	45
4.1 Koncepce řešení.....	46
4.2 Úprava 3D modelu.....	47
4.3 Import.....	49
4.4 Náhrada vazeb modelu	49
4.4.1 Vazby mezi referenčními plochami a objemovými tělesy.....	49
4.4.2 Náhrada uložení.....	50
4.4.3 Náhrada pohonu v ose Z	50
4.4.4 Náhrada hmot	51
4.4.5 Náhrada lineárních vedení.....	52
4.5 Materiály modelu	55
4.6 Modální analýza	55
4.7 Výběr důležitých modů	58
5. Propojený model s regulací	60
5.1 Proudová regulace a její ladění	60
5.2 Rychlostní regulace a její ladění	62
5.3 Polohová regulace a její ladění.....	66
6. Simulace řízení.....	68
7. Citlivostní analýza	69
7.1 Vyhodnocení.....	71
8. Závěr	74
Seznam literatury	75
Seznam obrázků	77
Seznam tabulek	79
Seznam použitého softwaru	79
Seznam textových a grafických příloh	80
Seznam elektronických přílohy (CD)	80



Seznam zkratek

1D	One-dimensional space	Jednodimenzionální prostor
2D	Two-dimensional space	Dvoudimenzionální prostor
3D	Three-dimensional space	Trojdimenzionální prostor
CAD	Computer Aided Design	Počítačem podporované modelování
CAM	Computer Aided Manufacturing	Počítačem podporované
CNC	Computer numerical control	Počítačem řízené stroje
CL	Cutter location	Poloha nástroje
NC	Numerical Control	Číslicové řízení
MKP	Finite Elements Method	Metoda konečných prvků
MPC	Multi Point Constraint	Okrajové podmínky ve více uzlech
p	Proportional controller	Proporcionální regulátor
PI	Proportional-Integral controller	Proporcionální integrační regulátor
PV		Proudová vazba
PWM	Pulse wave modulation	Pulzní šířková modulace
KŠ		Kuličkový šroub
FRF	Fast Frequency Response	Přenosová funkce frekvenční odezvy
HSS	High Speed Steel	Rychlořezná ocel



Použité veličiny

M		Matice hmotnosti
B		Matice tlumení
K		Matice tuhosti
F		Vektor silových účinků
X		Vektor fyzikálních souřadnic
V		Matice vlastních vektorů
V^T		Transponovaná matice vlastních vektorů
Q		Vektor modálních souřadnic
I		Jednotková diagonální matice
Λ		Diagonální spektrální matice vlastních čísel
F_q		Vektor modálních (transformovaných) sil
Ω		Matice vlastních frekvencí
ξ		Matice modálních útlumů
s		Vektor stavů
u		Vektor vstupní veličiny Stavového popisu
A		Matice systému Stavového popisu
B		Matice vstupu Stavového popisu
C		Matice výstupů Stavového popisu
D		„Feedthrough“ matice
y		Vektor výstupní veličiny
s		Laplaceův operator
ξ_p		Tlumení filtrů
K_w	$[-]$	Váhový koeficient feedforwardu
v	$[m/min]$	Řezná rychlost
ΔR	$[\mu m]$	Odchylka kruhovitosti
x_z	$[mm]$	Žádaná hodnota polohy
x_s	$[mm]$	Skutečná hodnota polohy
v_z	$[mm]$	Žádaná hodnota rychlosti
v_s	$[mm]$	Skutečná hodnota rychlosti
i_z	$[A]$	Žádaná hodnota proudu
i_s	$[A]$	Skutečná hodnota proudu
K_M	$[N/A]$	Motorová konstanta
Ω_p	$[Hz]$	Frekvence filtru typu Dolní propust druhého řadu



f_{PWM}	[Hz]	Frekvence spínání pulzní šířkové modulace
T_{PWM}	[s]	Perioda spínání pulzní šířkové modulace
PP	[Hz]	Propustné pásmo
K_{PV}	[A · s/rad]	Proporcionální zesílení rychlostního regulátoru
T_{NV}	[s]	Časová integrační konstanta rychlostního regulátoru
K_V	[1/s]	Rychlostní konstanta polohového regulátoru
k	[N/mm]	Translační tuhost vozíku lineárního vedení
k_T	[N/mm]	Torzní tuhost vozíku lineárního vedení
k_{pz}	[N/mm]	Náhradní tuhost pohonu osy Z
k_{stat}	[N/μm]	Statická tuhost



Úvod

V rámci této diplomové práce bude řešena problematika virtuálního modelování strojů a obrábění, a možnost jejího použití pro tvorbu virtuálního modelu laserového pálicího stroje pro řezání plechových dílů od firmy Vanad a.s., která poskytla potřebná data, z nichž jsou definované cíle této diplomové práce

Cíle práce jsou:

- Sestavení virtuálního modelu stroje propojením modelů nosné struktury, pohonů a regulace
- Analýza statických a modálních vlastností stroje (včetně vyhodnocení přínosů jednotlivých částí stroje)
- Analýza možností nastavení regulace pohonů

V první části rešerše budou stručně popsány zástupci strojů pro plošné řezání laserem. Bude stručně popsán modelovaný stroj, a budou také zmíněné řešení od konkurenčních výrobců. Budou vyznačena společná konstrukční provedení, která budou také v této rešeršní části popsána. V druhé části rešerše bude probráno virtuální modelování strojů a obrábění. Budou popsány současné metody tvorby virtuálních modelů stroje, které jsou vhodné pro splnění cílů této práce.

V praktické části na základě modelu laserového stroje Vanad bude sestaven virtuální model laserového stroje složený z modelu jeho nosné struktury a modelů regulace pohonů. Na tomto virtuálním modelu se provedou analýzy statických a modálních vlastností stroje a této analýze se využije pro určení vhodného naladění regulace pohonů pro tento stroj. Dále na tomto modelu proběhnou simulace dráhového řízení a jejich vyhodnocení. Tento model bude považován za referenční.

Z referenčního modelu budou vytvořené čtyři výpočetní varianty, které budou použity pro citlivostní analýzy přínosu jednotlivých částí stroje na nastavení regulace a přesnosti simulace dráhového řízení. Výsledky těchto analýz mohou být použity pro doporučení možných úprav konstrukce stroje.



1. Laserové pálicí stroje

V této kapitole bude stručně představena současná nabídka pálicích strojů firmy *Vanad 2000 a.s.* Dál bude vyznačena oblast a výhody použití pálicích strojů s vláknovým laserem. Nakonec budou popsány stroje pro laserové řezání od firmy *Vanad* a konkurenčních výrobců.

VANAD je český výrobce pálicích strojů, které vyrábí stroje pro tvarové řezání materiálů autogenem, plazmou a vláknovým laserem. Všechny zmíněné metody jsou metody nekonvenčního dělení kovových materiálů a pro pálicí stroje jejich volba hlavně závisí na požadované tloušťce a formě obrobků.

Výrobce uvádí, že laserové stroje jsou vhodnější pro kovové plechy s tloušťkou do 15 mm. Tato metoda se vyznačuje kvalitní řeznou plochou a malou zónou ovlivněnou teplem. Od ostatních metod nekonvenčního řezání ji pak odlišuje mnohem vyšší rychlostí řezání. [1]

Vláknové lasery patří mezi modernější druhy laserů. Jejich předhůzce jsou CO₂ lasery. Jejich hlavní rozdíl je ve způsobu převedení laserového paprsku k řezací hlavě. CO₂ lasery mají složitý systém čoček, kdežto vláknové lasery používají optické vlákno.

Vláknové lasery na rozdíl od předchozí generace mají vyšší účinnost, jsou méně náročné na ovládání a mají menší náklady na údržbu. Nakonec dokážou řezat rychleji. Platí to pro již zmíněné malé tloušťky materiálu. [2]

1.1 Vanad KOMPAKT laser

Vanad KOMPAKT laser byl uveden na trh v roce 2012. Tento stroj představuje kompaktní řešení pro efektivní řezání konstrukční oceli, nerezové oceli, mědi, hliníku a mosazi. Lze ho dále použít pro řezání nekovových materiálů například slídové desky, plechy z rychlořezných ocelí (HSS), klingerit, mirelon, pěnový polyethylen, antivibromat, karton, korek.

Stroj dále umožňuje řezání vysoce reflexních materiálů. Toto je zaručeno kvalitní osazenou řezací hlavou od německé firmy *PRECITEC*.

Stroj má ve standartním provedení:

- vysoce přesné optické odměřování
- precizní kapacitní řízení výšky procesní hlavy
- vlastní protikolizní systémem laserové hlavy
- možnost dodání modulu *RotCUT* pro řezání trubek a profilů
- výkon laseru do 6 kW



Stroj *Vanad KOMPACT laser* je zobrazen na Obr. 1



Obr. 1 Stroj Kompakt laser [2]

Další technické specifikace:

- pohon stroje zaručují lineární motory
- oboustranný pohon podélného pojezdu
- portálová stavba
- řídicí systém od výrobce *B.R*
- maximální posuvová rychlost je 45,3 [m/min]

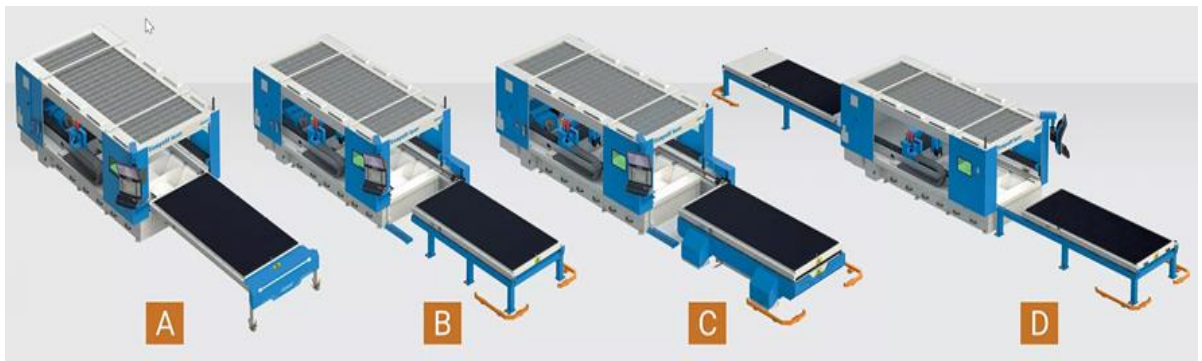
V závislosti na požadovaném stupni automatizace lze dodat stroj ve 4 variantách materiálových roštů (viz Obr. 2):

A – manuálně výsuvný rošt

B – motorově výsuvný rošt

C – dva hydraulicky výměnné rošty

D – dva manuálně výsuvné rošty



Obr. 2 Varianty provedení roštů [2]



1.2 Vanad MIRON laser

Stroj *Vanad MIRON* laser na Obr. 3 je další nabízenou variantou od značky VANAD. Představuje univerzální řešení. Tento model kromě laseru dále lze objednat s hlavou pro řezání plazmou nebo autogenem.

Má jiné prostorové provedení pro snadnější boční přístup ke stolu. Dále má menší zástavbovou délku i šířku oproti portálové konstrukci a je určen pro tvarové složitější řezání menších plechů.



Obr. 3 Miron laser [2]

1.3 TRUMPF TruLaser 1030 fiber

Americká společnost *TRUMPF* má ve své nabídce stroj *TruLaser 1030 fiber*. Společnost *Trumpf* patří mezi první světové výrobce laserových řezacích strojů. Model *TruLaser Fiber* proto má vlastní firemní řešení laserové hlavy a zdrojů laseru. [3] Výrobce dále uvádí že stroj má této pokročilé funkce:

- *BrightLine* fiber zaručuje lepší řezné hrany a snadné vyjmutí plechů,
- *PeerLine* která reguluje proces zapichování a zkracuje jeho čas o 80%.

Technická specifikace

- výkonu laserů od 2 do 6 kW.
- portálová stavba
- maximální simultánní rychlost je 140 m/min.
- automatický měnič trysek
- kamerový systém



Tento stroj má 3 provedení dle velikosti plechu a je zobrazen na Obr. 4.



Obr. 4 TruLaser 1030 fiber [3]

Tento stroj má také v nabídce různá doplňková řešení pro nakládání, vykládání, třídění a skladování dílů, této řešení patří mezi ty pokročilejší.

1.5 LYNX FL

Další zástupce laserových palicích strojů je model *LYNX FL* od belgické značky *LVD*. Stejně jako stroj *Vanad Kompakt Laser* má tento stroj pracovní hlavu *PRECITEC*. Stroj *LVD LYNX FL* je Obr. 5



Obr. 5 *LYNX FL* [4]

Dále je v nabídce od značky *LVD* stroj *ELECTRA FL*, který má větší výkon laseru až 8 kW. Specifikou je hliníkový příčník a přímý pohon lineárními motory.



Tento stroj má také v nabídce různá doplňková řešení pro nakládání, vykládání, třídění a skladování dílů. [4]

Technická specifikace:

- 3 varianty výkonu laserů, a to 2/3/4 kW.
- portálová stavba
- řídicí systém Siemens 80D.
- pohon pomocí hřebenu a pastorku
- pohon lineárními motory pro stroj *ELECTRA FL*
- maximální polohovací rychlost je 120 m/min.

1.6 Další výrobce a shrnutí

Kromě již zmíněných byly dále prozkoumány další modely různých výrobců:

- *Eagle eSmart* [5]
- *NF PRO NUKON* [6]
- *P3015 Bodor* [7]
- *CNC laser verze GA* [8]
- *CNC laser Raptor* [9]

Lze vyznačit společné prvky a řešení:

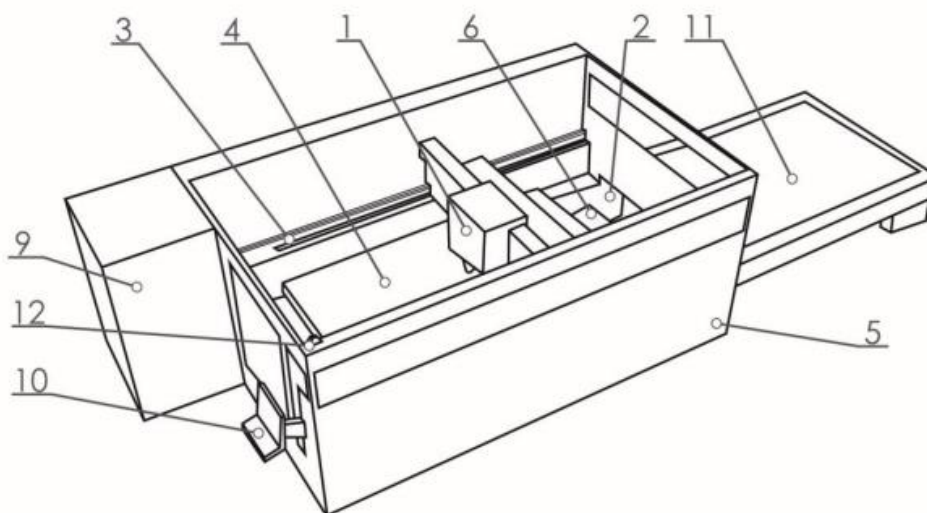
- portálová konstrukce rámu
- více pohonů pro jednu osu
- tendencí je přechod na lineární motory
- snaha o optimalizace konstrukce příčníků

Rozdíly jsou většinou v použitých řídicích systémech a volbě pohonů. Mezi nejčastější typy pohonů patří:

- pastorek a hřeben
- lineární motory
- kuličkový šroub a matice

2. Konstrukční provedení stroje

V této kapitole bude popsána typická konstrukce laserových strojů z předchozí kapitoly. Další část kapitoly je věnovaná konstrukčním prvkům, které jsou podstatně pro modelování stroje. Typické konstrukční uspořádání laserových strojů je na Obr. 6. [10]



Obr. 6 Konstrukční uspořádání laserových strojů [10]

1. Řezná hlava

Pracovní hlava se skládá z několika částí, ale nejdůležitější jsou čočka a tryska. Čočka usměrňuje laserové paprsky a soustřeďuje je do jednoho bodu. Tryska přivádí laserový paprsek a pracovní plyn k obrobku. Pro kvalitní řez musí být vzdálenost čočky od obrobku konstantní. Proto jsou často zvoleny kvalitnější odměřování a jsou kladeny vyšší požadavky na regulaci pohonu.

2. Rám

Rám je základním prvkem určující celkovou tuhost stroje. Stroje pro laserové řezání jsou ve většině vyrobené z plechových svařenců. Tyto stroje mají velký pracovní prostor a vysoké rychlosti řezání. Z toho dále plyne, že jejich namáhání je primárně dynamickými silami. Tomuto namáhání se přizpůsobují různé optimalizace stavby stroje.

3. Pohony.

Sestavy pohonů pro tento druh strojů budou popsány v podkapitole 2.1.



4. Materiálový rošt

Materiálový rošt je tvořen několika desítkami vyřezaných profilů, nejčastěji trojúhelníkového tvaru. Hlavním důvodem tohoto profilování je chování při řezání. Eliminuje možnost vzniků mikrosvárů a výpalek lze proto snadno odebrat.

5. Krytování

Pro krytování těchto strojů se nejčastěji využívá plechových dílů. Usměrněný laserový paprsek se může od plechu odrazit a zranit obsluhu stroje. Proto jsou tam zatmavená skla.

6. Odsávání a sběr zbytků

Díky těmto prvkům se udržuje čistota ve stroji. Což je zvláště důležité pro lineární motory.

7. Podpurný plyn (umístěno externě)

Plyny zaručují čisté prostředí ve vnitřním prostoru řezné hlavy. Díky těmto plynům se čočka částečně chladí, ale hlavně nedovoluje zbytkovým částicím, zrnkům čočku poškrábat.

8. Chlazení (umístěno externě)

Základní součást, která je chlazená, je generátor laseru. Další chladicí okruh vede přímo do řezné hlavy, kde chladí trysku.

9. Generátor laseru

Laserový generátor se nachází v některých případech mimo hlavní část. Zde je generován paprsek, který je pak optickým vláknem přiváděn k pracovní hlavě.

10. Ovládací panel

Ovládací panel pro nastavení stroje a monitoring jeho stavu.

11. Výměník pracovních roštů

Výměna pracovních roštů přemístěním po kolejnicích. Rošty jsou umístěné v rozdílných výškách, aby nedocházelo k jejich kolizím.

12. Alarmové osvětlení

Osvětlení oznamuje stav stroje.



2.1 Sestava pohonu laserových CNC strojů

Sestavy pohonu os laserových strojů jsou složeny z lineárního vedení a pohonů samotných. Pohony laserových strojů jsou zastoupené systémy se servomotory a různými typy převodů například pomocí kuličkového šroubu, hřebenu a pastorku nebo lineárním motorem. [11]

2.1.1 Vedení CNC obráběcích strojů

Vedením se rozumí sestava ploch, na nichž se stýká pohyblivá část osy s nepohyblivou. Účelem této sestavy je zaručit pohyb po geometricky přesné dráze, sestava lineárního vedení je na Obr. 7. Druhy vedení se rozlišují podle tvaru dráhy a podle druhu tření, které je dalším zdrojem tepla. [11]



Obr. 7 Lineární vedení [12]

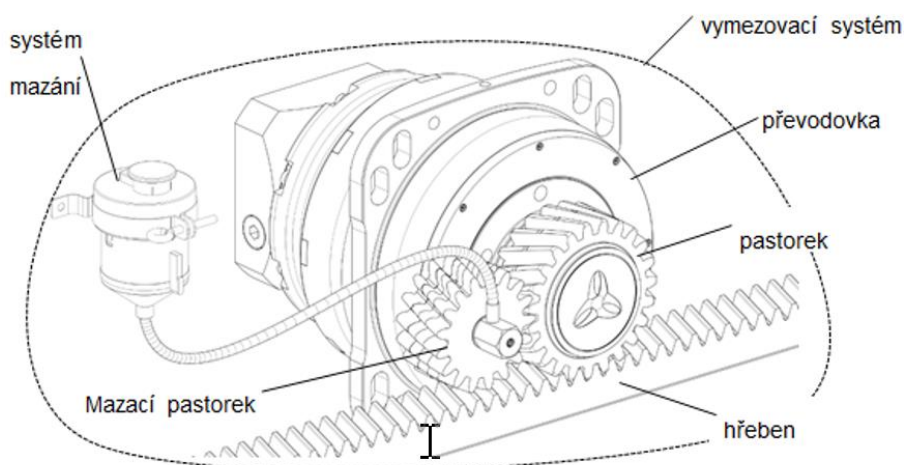
Nejčastěji se používají valivá vedení. Tento druh vedení je založen na valivém pohybu pomocí valivých elementů. Mezi základní valivé elementy patří kuličky (obráběcí stroje pro malé a střední výkony) a válečky (obráběcí stroje pro vysoké výkony s dlouhou životností). Přitom lze s kuličkovým vedením z principu realizovat vyšší rychlosti než s válečkovým vedením.

Výhody použití valivého vedení:

- minimální opotřebení
- dlouhá životnost
- možnost vymezení vůle a předepnutí
- vysoká přesnost pohybu i při malých rychlostech
- menší součinitel tření

2.1.2 Pastorek a hřeben

Pro pohony os s dlouhým zdvihem nebo pro pojezdy portálové konstrukce se používá systému pastorek – hřeben. Pastorek osazený na motoru nebo přes spojku nebo převodovku převádí moment z motoru na hřeben, a tím se rotační pohyb z motoru přeměňuje na lineární pohyb. Ukázka uspořádání pohonu s převodovkou a vloženým převodem s pastorkem s hřebenem je na Obr. 8.



Obr. 8 Pohon s převodovkou a vloženým převodem s pastorkem s hřebenem [13]

Výhody použití pastorku a hřebenu:

- větší styková tuhost
- nízká hlučnost u šikmých zubů
- bez nutnosti chlazení
- snadná údržba

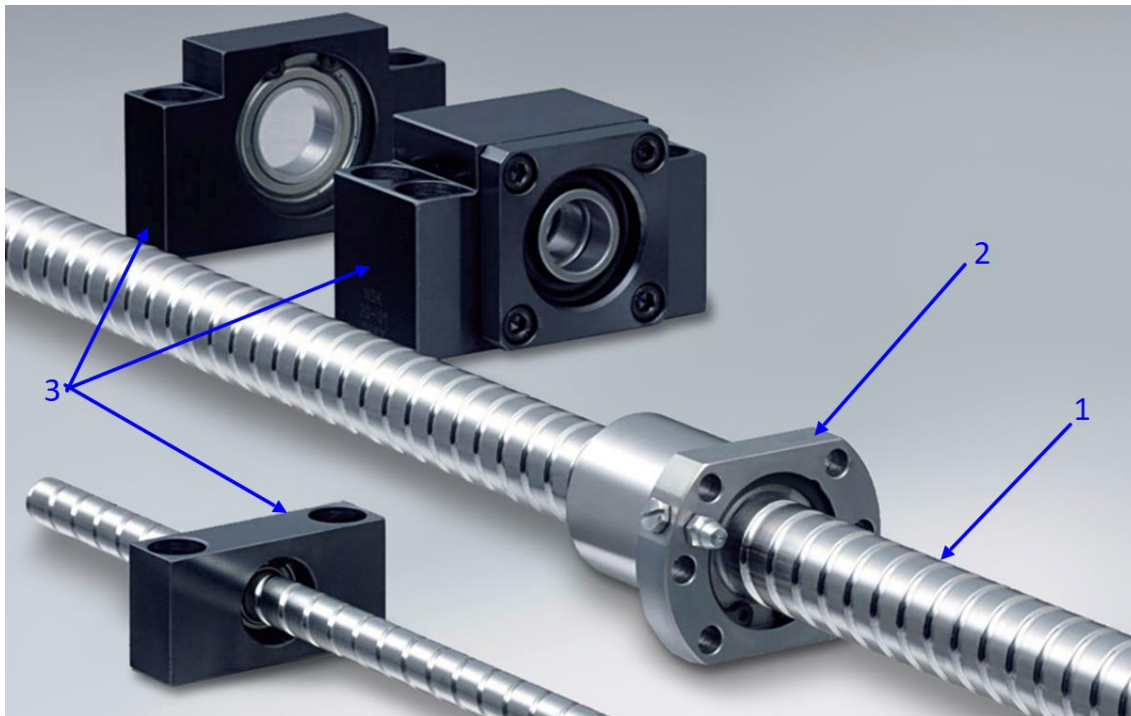
Nevýhody:

- nutnost mazání
- rozstřík maziva při větších rychlostech
- nutnost vymezení vůle

2.1.3 Kuličkový šroub a matice

Kuličkové šrouby (KŠ) jsou jedním z nejúčinnějších typů převodu rotačního pohybu na lineární. Používají se u obráběcích strojů pro polohování jednotlivých lineárních os – křížových saní, stolů, smykadel nebo příčníků. [2]

Kuličkový šroub spolu s dalšími komponenty sestavy mechanické části pohonu je na Obr. 9



Obr. 9 Kuličkový šroub 1, kuličková matice 2 a domečky ložisek kuličkového šroubu 3 [14]

Výhody použití kuličkových šroubů:

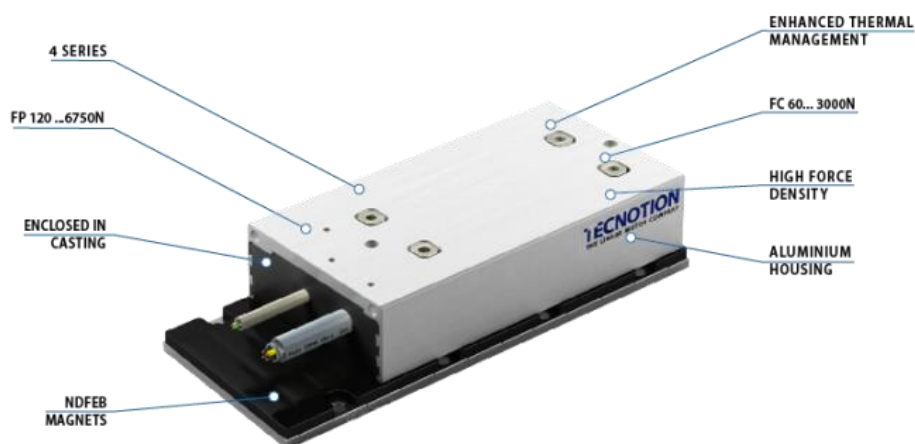
- nízká pořizovací cena
- relativní vysoká tuhost
- velká účinnost

Nevýhody:

- ohybové a torzní kmitání
- tuhost je závislá na okamžité poloze kuličkové matice
- omezená rychlost posuvu

2.1.4 Lineární motor

Vzhledem k absenci řezných sil spolu s vysokými požadavky na dynamiku, se pro laserové stroje často volí přímý pohon lineárními motory. Typické provedení lineárních motorů pro obráběcí stroje, kde primární díl s vinutím v drážkách je pohyblivý, a sekundární díl tvořený z magnetických modulů dráhy je statický viz. Obr. 10. [15]



Obr. 10 Lineární motor [15]

Mezi výhody těchto motorů patří:

- pohony nejsou tvořeny poddajnými komponenty
- plošný přenos síly
- možnost modulárního prodlužování dráhy pojezdu
- žádné chyby převodů
- nedochází k přeladování pohonu

Nevýhody

- malé posuvové síly v poměru k přitažlivým
- teplo vznikající v centru stroje a potřeba řešení chlazení
- vysoké požadavky na kvalitu regulace
- požaduje se kvalitní odměřování s vysokou vzorkovací frekvencí
- chybí ochranný efekt převodu
- nutnost dokonalé synchronizace paralelních pohonů

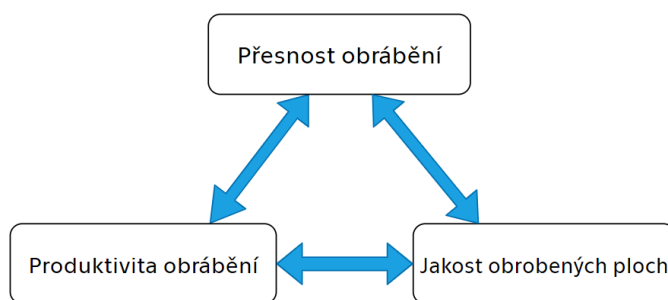


3. Virtuální modelování strojů a obrábění

Na výrobní stroje a technologie z hlediska užitných vlastností pro uživatele kladeno 6 požadavků:

- Přesnost – především přesnost práce strojů a rozměrová přesnost obrobků.
- Jakost obrobených ploch – charakterizuje se například drsností a vlnitostí
- Produktivita obrábění – která je daná počtem obrobku za jednotku času
- Spolehlivost – která je daná stálou kvalitou obrobku po delší dobu
- Hospodárnost – minimalizace jednotkových nákladů na strojích, vedlejších časů, nákladů na obsluhu, ale i minimalizace nákladů na samotnou výrobu strojů a jejich provoz
- Ekodesign – minimální negativní dopady na životní prostředí: Především minimalizace negativních dopadů výroby na strojích, ale i výroby strojů na životní prostředí. Především řešení energetických nároků

V rámci této práce jsou významné parametry: jakost obrobených ploch, přesnost a produktivita obrábění. Všechny tři parametry jsou navzájem provázané (viz. Obr. 11) a ovlivnitelné primárně nastavením řídicího systému stroje (regulace a interpolace). [11]



Obr. 11 Užité vlastnosti strojů

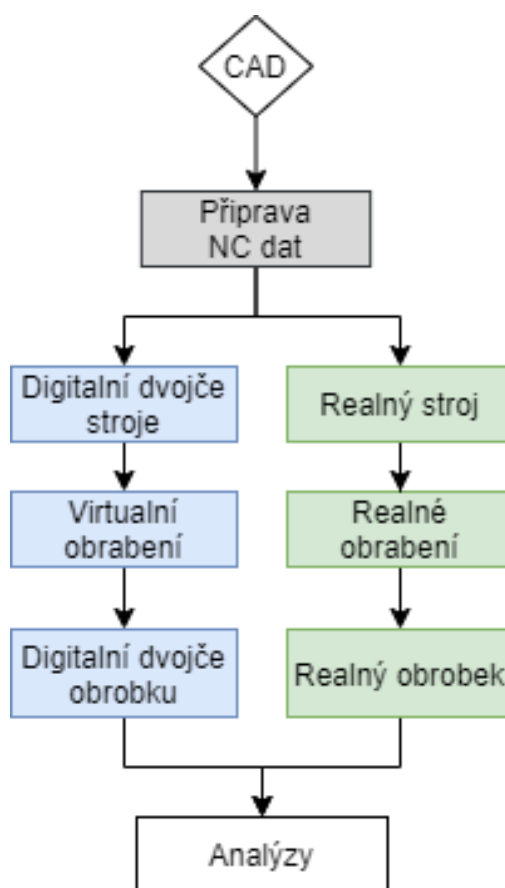
Nastavení řídicího systému stroje je však ovlivněno konstrukcí stroje. Tak pro dosažení nejlepších parametrů jsou podstatné statické a dynamické vlastnosti stroje. Při optimalizaci nastavení parametru obrábění se nejčastěji používají testy na reálných strojích.

Časové a finanční náklady s tím spojené jsou motivací pro vývoj takových virtuálních modelů strojů a obrábění, které umožňují modelovat chování stroje s ohledem na veškeré důležité vazby mezi jednotlivými komponenty

a interakci s obrobkem. Takové modely se označují jako komplexní modely nebo digitální dvojčata a jsou popsány v následující kapitole.

3.1 Komplexní virtuální modelování strojů a obrábění

Komplexní virtuální modelování strojů a obrábění je založeno na vzájemném propojování jednotlivých modelů částí strojů do větších celků. Takové modely by umožnily relevantní simulaci chování stroje se zahrnutím významných jevů a vlastností, které by mělo v dostatečné míře podobat reálnému obrábění. [16]. Vzniklý řetězec virtuálního obrábění je na Obr. 12, kde je dále uveden řetězec reálného obrábění.

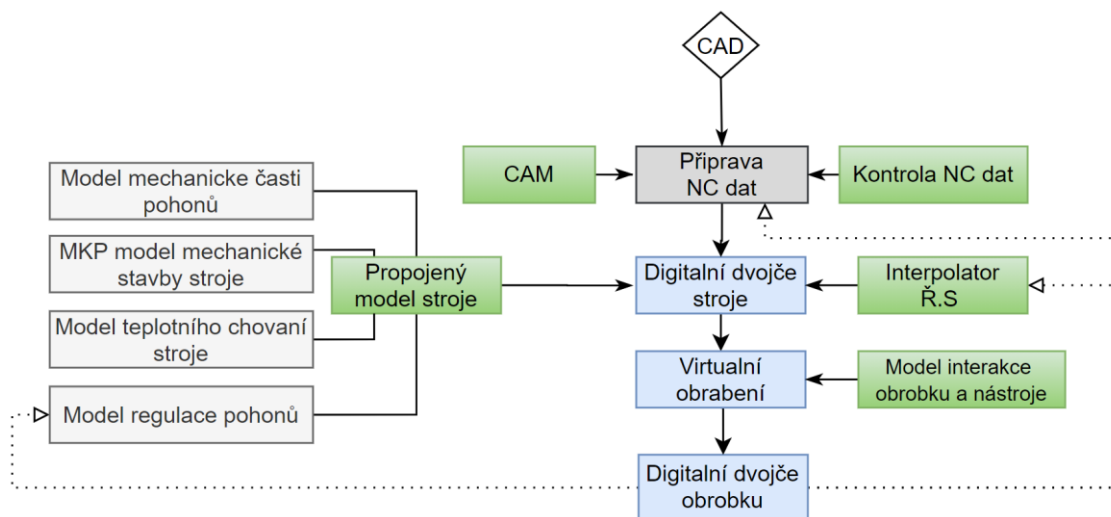


Obr. 12 Řetězec virtuálního a reálného obrábění

Z obrázku dále je patrné, že vstupní data jsou totožné pro oba řetězce. Dále je patrná možnost provedení analýz.



Vynecháním reálné větve a bloku analýzy z předchozího obrázku, zůstává řetězec vazeb virtuálního obrábění, jehož modelování se pak provádí v několika úrovních, které jsou označené zelenou barvou na Obr. 13



Obr. 13 Úrovně virtuálního modelování

Propojování veškerých úrovní z obrázku není vždy potřeba. Propojení do větších celků sice poskytuje kvalitnější výstupní data a umožňuje větší výběr analýz a způsobů optimalizací, ale má vyšší nároky na postavení modelu.

Proto v závislosti na úloze lze vytvořit takový model, který poskytne pro ni dostačující data.

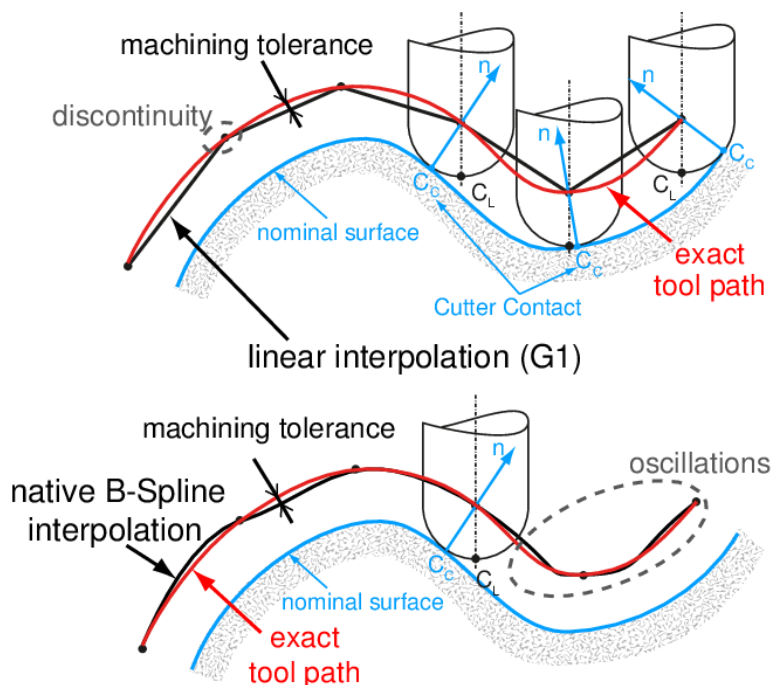
3.2 CAM

CAM (Computer Aided Manufacturing) je druh softwarů, ve kterých se volí strategie obrábění. Obecným vstupem jsou data z CAD (Computer Aided Design) softwarů, obsahující geometrický model obrobků. Výstupem je vygenerovaná dráha pojezdu nástroje.

V prostředí CAM pak se volí použité upínací a řezné nástroje, řezné podmínky a strategie obrábění. V CAM systémech lze definovat, jakým způsobem bude proveden popis dráhy nástroje. Mezi základní varianty patří lineární a kruhové interpolace a jejich kombinace. Moderní systémy dále poskytují možnost výběru i pokročilejších funkcí.

Dále lze zvolit hodnotu tolerance dráhy pojezdu nástroje. Tato hodnota i určuje míru odchylky vygenerované dráhy s dráhou požadovanou, a tedy s požadovaným tvarem obrobku.

Tolerance dráhy pojezdu nástroje je na Obr. 14, kde hodnota tolerance je označena jako *machining tolerance*, skutečná dráha je *exact tool path*.



Obr. 14 Tolerance dráhy pojezdu nástroje [17]

Čím větší je toleranční pásmo, tím menší jsou nároky na dodržení tvaru při výpočtu generované dráhy. Malá hodnota tolerance vede k tomu, že vygenerovaná dráha bude tvořena velkým počtem menších lineárních úseků, které jsou časově náročnější pro CAM i řídicí systém stroje, v dnešní době však již toto nepředstavuje problém z hlediska výpočetního výkonu.

V CAM softwaru lze provést simulaci obrábění sloužící pro prvotní detekci kolize při pojezdu po dráze nástroje. Lze dále provést vizualizaci úběru materiálu s cílem zjišťovat, kde došlo k podřezání ploch součásti, nebo naopak, kde materiál zbývá. Dalším výstupem je odhad času obrábění. Všechny tyto simulace však mají spíše informativní charakter a primární účel jejich použití je zmíněna detekce kolize.

CAM softwary jsou zaměřené na pokrytí co největšího počtu strojů. Jejich výstupní data vygenerované dráhy jsou označovány jako CL (*Cutter location*) data, mají proto univerzální charakter a neuvazují specifikace konkrétního stroje. CL data musí být převedené na podobu NC dat pomocí postprocesoru příslušného stroje. Postprocesor již má potřebné informace o stroji a do výstupních NC dat jsou zapsané hodnoty posuvových rychlostí.



3.3 Kontrola NC dat

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, CL data jsou vygenerována bez ohledu na konkrétní stroj a jeho vlastnosti. Proto je vygenerovaná dráha často neoptimalizovaná, což znamená horší shodu se zamýšleným tvarem výrobku, a může vést k větším nárokům na řídicí systém stroje, zvláště pro starší stroje. Výsledná kvalita NC dat má přímý vliv na přesnost, produktivitu obrábění a jakost obrobenejších ploch. Jednou z možností nápravy je úprava NC dat před odbavením na stroji.

K tomu lze využít řadu speciálních softwarů, které jsou určené pro simulaci, verifikaci a optimalizaci NC dat. Mezi pokročilejší řešení uvazující kinematiku reálného stroje patří například *NCSIMUL* a *Vericut*.

Oba systémy jsou modulární a podle potřeb lze v nich poskládat model pro simulaci obrábění. Základní moduly slouží pro verifikaci NC dat importovaných z CAMu. Do verifikačního modulu je dále importován CAD model obrobku včetně informací pro definici použitých nástrojů a rezných podmínkách. Následně se provádí simulace obrábění za definovaných podmínek. Výstupem z ní je model obrobenejší součásti, verifikovaný soubor dráhy pojezdu nástroje a výpis chyb detekovaných při simulaci.

Mohou to být:

- kontakt nástroje s obrobkem při rychloposuvu
- nepřesné programování
- nepřesně definované dráhy pojezdu nástroje
- chyby postprocesoru CAM systému
- kolize s přípravky a svorkami

Výstupem toho to modulu mohou být kvalitnější simulace obrábění s odhadem času obrábění, s výslednou přesností a vizualizací obrobenejšího povrchu. Tyto odhady mají přesnost 5 až 10 %.

Verifikační modul lze doplnit o různé další moduly pro optimalizaci dráhy, simulaci stroje při víceosém obrábění, modul detekce a vyhodnocení rozdílů mezi modelem a výrobkem, aditivní technologii obrábění a další.

Volbou vhodných modulů lze provést simulaci obrábění, ve které jsou již uvažované parametry kinematiky a řídicího systému stroje. Optimalizační algoritmy umožňují dosáhnout zkrácení výchozího CAM odhadu času obrábění o 30 %.



Hlavní výhody oproti CAM jsou:

- kontrola kolizí s kinematikou celého stroje
- kontrola zrychlení a omezení pohybových os
- komplexní porovnání obrobek – model
- uvažování limitu jednotlivých os strojů
- eliminace chyb vzniklých při programování
- NC optimalizace
- snadný import z/do CAM software

3.4 Interpolátor a řídicí systém stroje

Řídicí systém stroje se skládá z několika podsystémů. Kromě ovládaní pomocných agregátů, ukládání NC dat lze v řídicím systému zvolit nastavení parametrů regulace a pokročilejších funkcí řízení. Řídicí systém stroje tak má podstatný vliv na přesnost, čas a kvalitu obrábění.

Velmi důležitou součástí řídicího systému je interpolátor, do kterého vstupují NC data. Jeho hlavní funkcí je převod NC dat z geometrické do časové oblasti, čímž jsou vygenerované signály pro řízení pohonů. Z těchto důvodů je potřeba zahrnout řídicí systém do propojeného modelu, k tomu existují dvě možnosti. [18]

První je připojení virtuálního modelu stroje k řídicímu systému reálného stroje, tedy jsou vstupem do virtuálního modelu data z polohové smyčky reálného stroje v reálném čase. Je známa jako: *Hardware-in-the-loop*. Toto řešení je vhodné pro současný monitoring procesu obrábění pomocí digitálního dvojčete. Nevýhodou jsou nereálné simulace a testování při návrhu nového stroje.

Druhá možnost je použití virtuálního modelu řídicího systému stroje, což je softwarové řešení pro snadné PC simulace, která neprobíhá v reálném čase, a může proběhnout rychleji. Výhodou tohoto řešení jsou simulace, které můžou proběhnout rychleji než na reálném systému a lze je provádět na větším počtu výpočetních PC sestav. Tím je snadno získán větší počet dat pro optimalizaci.



3.5 Propojený model stroje

Jak již bylo naznačeno v kapitole komplexního modelování, propojený model stroje má umožňovat simulace, jejichž výsledky jsou natolik blízko k chování reálného stroje, že jim již lze použít pro věrohodnou predikci obrábění. Pro modelování dynamických vlastností stroje je v tomto případě vhodné použít propojený model mechanické stavby stroje. [16] [19]

Metoda konečných prvků je běžně použita pro modelování statických a dynamických vlastností nosné struktury stroje a je základem pro modelování propojeného modelu stroje. Tato metoda bude popsána v kapitole 3.5.1

Dále je důležité zmínit, že tato metoda se také hodně používá při modelování teplotního chování stroje, ale existují i další možnosti využití. Spolu lze velmi efektivně použít ve fázi návrhu stroje nebo komponenty. Jejich použití pro simulaci obrábění mají svoje omezení. Zvláště pro laserové stroje, kde primárním zdrojem tepla je teplo od pohonů. Proto jsou v rámci této práce modely simulace teplotního chování stroje zmíněny pouze okrajově a nejsou použity.

Pro simulaci řízení stroje je vhodné využít výpočetní software, které takovou simulaci umožňují, následně je potřeba zvolit metodu, která umožní propojení s MKP modelem. Takovou metodou je popis propojeného modelu v stavovém prostoru.

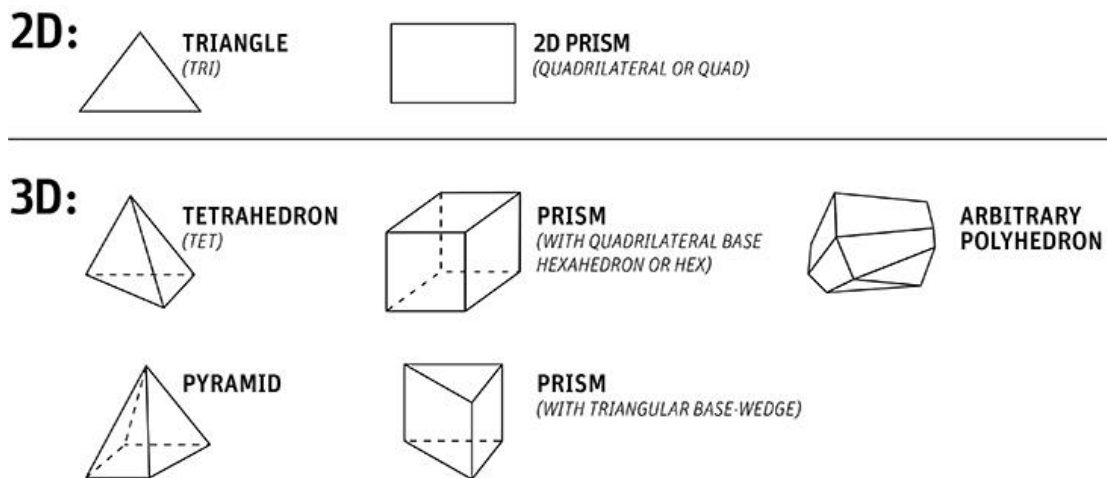
3.5.1 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků (MKP) je numerická metoda pro výpočet přibližného řešení technických úloh, které lze řešit analyticky jen velmi obtížně. Rozsah použití vedl k tomu, že tato metoda je nejen mocným nástrojem pro výpočetní modelování, ale je zároveň velice kvalitním základem pro jiné metody modelování. [20]

MKP je založena na metodě diskretizaci spojitého kontinua neboli redukce matematických rovnic do konečného počtu elementů či uzlů (node). Prvky mohou být jednodimenzionální (1D), dvoudimenzionální (2D) a trojdimenzionální (3D).



Ukázka 2D a 3D prvků je na Obr. 15.



Obr. 15 MKP uzly [21]

Tyto elementy tvoří síť, která nahrazuje kontinuální prvky, tak:

3D prvky mají 3 stupně volnosti a jsou určeny pro modelování objemových těles, které nemají jeden rozměr vůči ostatním zanedbatelný. Výhodou tvorby sítě z těchto prvků je snadná příprava původního CAD modelů.

2D prvky mají 6DOF a tvoří plošnou síť. Tato síť má menší počet uzlů, a tím usnadňují výpočet. Taková síť vyžaduje složitější úpravy modelu.

Hybridní síť kombinuje plošné a objemové sítě a používá se tam, kde je potřeba využít výhod plošné sítě, ale některé prvky modelu jsou výrazně objemové. [22]

Úlohy pak se řeší ve třech fázích:

- Preprocessingu
- Processing
- Postprocessingu

Při preprocessingu se stanoví cíl úlohy, může to být výpočet absolutních hodnot, například statické tuhosti, či numerická modální analýza. Další možností je optimalizační výpočet, kde se pozoruje změna sledované veličiny v závislosti na změně vstupních parametrů. Poslední možností je porovnávací výpočet, kde se řeší změny sledovaných vlastností při různých variantách vstupů.

Dále se určuje obsah modelu, rozhoduje se o prvcích, které lze odstranit, dále se definují vazby mezi jednotlivými částmi modelu. Následně se definují náhrady prvků, které jsou pro výpočet úlohy podstatné, ale jejich geometrický model je však výhodnější nahradit. Nakonec se sestavuje samotná MKP síť a jsou zavedeny okrajové podmínky. [22]



Ve fázi processing probíhá samotný výpočet úlohy. Výpočet je řešen takzvaným řešičem. Volba řešiče pak ovlivňuje celou výpočetní úlohu a v závislosti na klasifikaci úlohy je třeba zvolit vhodný z více než stovky variant.

V poslední fázi postprocessingu se zpracovávají výsledky. Řeší se, zda výsledky dávají smysl, jak je potřeba příště připravit úlohu. V případě úspěšné úlohy pak následuje interpretace výsledků případně jejich export.

3.5.2 Pomocné a vazebné prvky

Pomocné a vazebné prvky umožňují vytvářet pomocné konstrukce pro náhradu komponent, zavedení silových vstupů, vytvoření vazeb mezi jednotlivými sítěmi a prvky modelu, nebo sledování uzlů mimo síť modelu. Prvky jsou definovány dvěma pomocnými uzly, označené také remote pointy. První z nich lze aplikovat na jednu, nebo několik geometrií, které budou při výpočtu řízené druhým uzlem. Dále lze zvolit, jestli ty geometrie můžou být deformovány, nebo ne. Druhý uzel lze umístit libovolně, podle potřebné náhrady. [22] [23]

Mezi prvky se se zavedou vazby:

- Rigid – mezi uzly se zavede absolutně tuhá vazba
- Spring – mezi uzly je vazba s definovanou tuhostí

Ve výsledku mezi uzly vzniknou okrajové podmínky.

3.5.3 Náhrada komponent

Pro snadnější výpočet a větší kvalitu vygenerované sítě je vhodné uvažovat o nahrazení některých komponentů například:

- Rotační ložiska – rotační vazba, spojuje dvě tělesa
- Lineární vedení – posuvná vazba, spojuje dvě tělesa
- Přídavné hmoty – náhrada hmotnosti a momentů setrvačnosti,
- Náhrady pohonů s kuličkovými šrouby – pro modální analýzu je potřeba modelování pohonu pomocí diskretních prvků
- Náhrady pohonů typu pastorek – hřeben – modeluje se pomocí náhradních tuhostí

3.5.4 Numerická modální analýza

Jedním z možných výstupů výpočetní úlohy MKP je numerická modální analýza. Tato metoda slouží k úplnému popisu dynamického chování zkoumané sestavy. Dynamické chování více hmotového tlumeného systému lze popsat rovnicí:

$$M \cdot \ddot{X} + B \cdot \dot{X} + K \cdot X = F \quad (1)$$



Ve které M je maticí hmotnosti, B je maticí tlumení, K je maticí tuhosti, F je maticí silových účinků a X je vektor poloh reálných souřadnic jednotlivých hmot. [24]

Řešením modální analýzy systému popsaného touto rovnicí je matice vlastních čísel, tato úloha v MKP programech se řeší pouze pro netlumené systémy:

$$M \cdot \ddot{X} + K \cdot X = F \quad (2)$$

Transformací do modálních souřadnic lze provést zavedením substituce (3), jejíž zápis pro dvouhmotový systém je dan rovnicí (4), V je matice vlastních vektorů, Q je vektor modálních souřadnic.

$$X = V \cdot Q \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} \\ v_{21} & v_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Dosazením (3) do rovnice (2) vznikne rovnice (5), kterou je nutné vynásobit transponovanou maticí V^T , přičemž vznikne rovnice (6):

$$M \cdot V \cdot \ddot{Q} + K \cdot V \cdot Q = F \quad (5)$$

$$V^T \cdot M \cdot V \cdot \ddot{Q} + V^T \cdot K \cdot V \cdot Q = V^T \cdot F \quad (6)$$

Rovnici (6) je vhodné převést na jiný tvar, toto je možné na základě vztahu (7) a (8).

$$V^T \cdot M \cdot V = I \quad (7)$$

Kde I je jednotková matice.

$$V^T \cdot K \cdot V = \Lambda \quad (8)$$

Kde Λ je spektrální matice vlastních čísel

Převedená rovnice 6 pak má tvar

$$I \cdot \ddot{Q} + \Lambda \cdot Q = F_q \quad (9)$$

kde F_q je matice modálních sil

Platí to, že pro každou modální souřadnici existuje pouze jedno řešení. Rovnice (9) pro jednu souřadnici má tvar:

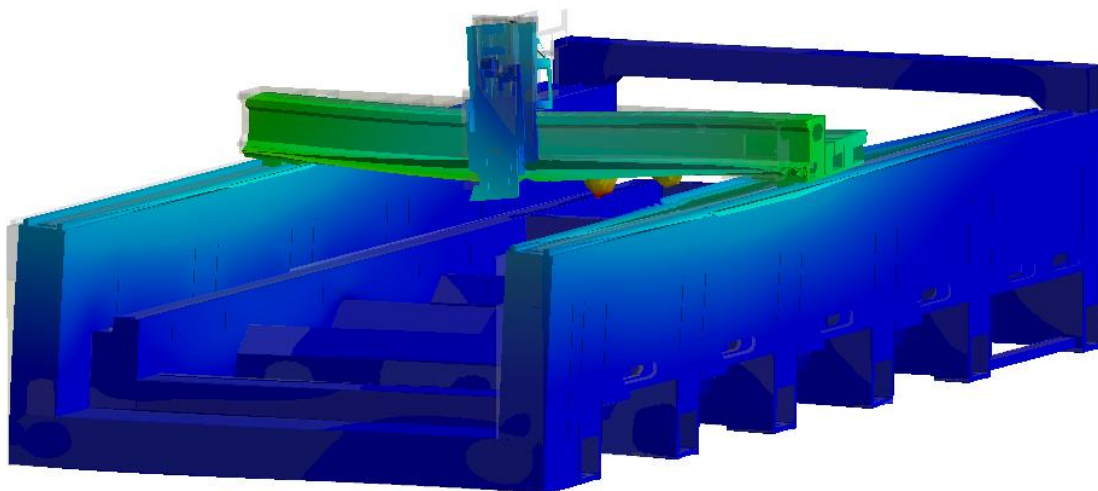
$$\ddot{q}_i \cdot 1 + \lambda_i \cdot q_i = F_{qi} \quad (10)$$



Homogenním řešením této rovnice je vlastní frekvence systému:

$$\Omega_i = \sqrt{\frac{\lambda_i}{1}} \quad (11)$$

Výsledkem řešení numerické modální analýzy z MKP jsou matice vlastních tvarů sestavy V a vektor vlastních frekvencí Ω . Vizualizace vlastních tvarů je na Obr. 16. Deformace mají odlišnou barvu a jsou lehce viditelné v původním modelu.



Obr. 16 Vlastní tvary stroje

Matice normalizovaných vlastních vektorů (vlastních tvarů kmitu) má tvar:

$$V = [V_1, V_2 \dots V_m] = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1m} \\ v_{21} & v_{22} & \dots & v_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{n1} & v_{n2} & \dots & v_{nm} \end{bmatrix} \quad (12)$$

kde n je počet uzlů (node) a m počet vybraných vlastních tvarů.

Vektor vlastních frekvencí je dan vztahem:

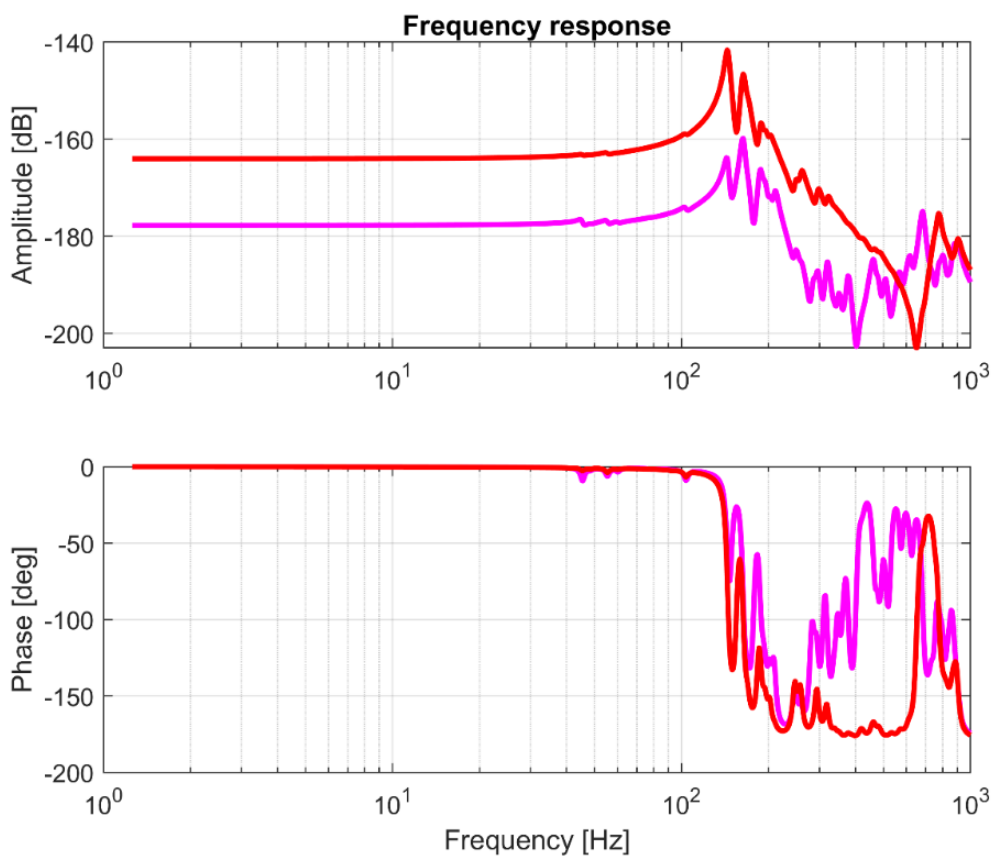
$$\Omega = [\Omega_1, \Omega_2 \dots \Omega_m]^T \quad (13)$$

Nakonec spektrální matici vlastních čísel je daná vztahem:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \Omega_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \Omega_2^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \Omega_m^2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

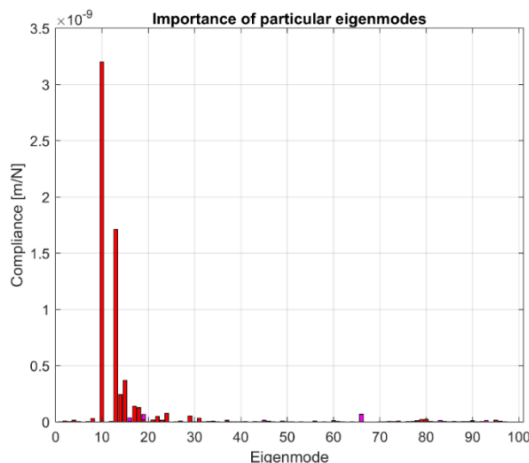
3.5.5 Modální redukce

Modální redukce slouží k snížení počtů stupňů volnosti modelu na vhodný počet a to tím, že se v plných maticích modálního modelu zanedbají řádky a sloupce matic jednotlivých souřadnic příslušné určitému stupni volnosti. To lze provést na základě zkoumání vlivu podílů jednotlivých vlastních tvarů a příslušných jim frekvencí na průběhu přenosové funkce (FRF). Přenosová funkce je charakteristika mechanického systému a uvádí závislost deformaci jednotlivých uzlů na silovém zatížení působícího na systém. V tomto případě přenosová funkce je označovaná jako dynamická poddajnost. Ukázka FRF pro mechanické soustavy jsou na Obr. 17. [25]



Obr. 17 Přenosová funkce dynamické poddajnosti

Na Obr. 18 jsou vyznačené vlastní tvary kmitání, které se významněji podílejí na určité dynamické poddajnosti.



Obr. 18 Význam jednotlivých modů

Vypuštěním modů přenosové funkce, které nejsou významné, vznikne redukovaný model, přitom je ale zachována kvalita původního MKP modelu, který není redukován ve smyslu snižování počtu jeho elementů sítě. Výsledné matice lze převést do stavového prostoru. Dále popis ve stavovém prostoru postačuje vytvořit jen na vlastních vektorech souvisejících s těmi uzly MKP sítě, v nichž jsou přenosové funkce hledány. Obvykle to jsou místa silových zatížení v modelu stroje, jako jsou vedení, motory, nástroje.

3.6 Stavový prostor

Stavový prostor je odlišnou reprezentací vstupů a výstupů dynamického systému. Základní myšlenkou stavového prostoru je, že ze znalostí stavu systému v počátečním čase a časových signálů vstupů do systému lze následně popsat chování dynamického systému ve kterémkoliv časovém okamžiku odlišným od počátečního času. Hlavní výhodou stavového prostoru je převod soustavy diferenciálních rovnic libovolného řádu na soustavu diferenciálních rovnic řádu prvního. Obecně lze stavový prostor časového nezávislého systému popsat soustavou rovnic (15):

$$\begin{aligned} \dot{s} &= A \cdot s + B \cdot u \\ y &= C \cdot s + D \cdot u \end{aligned} \quad (15)$$

Kde s je vektor stavů, A je maticí systému, která je tvořena na základě matice λ a matice ξ modálních útlumů (kterou je možné sestavit dle matice tlumení B v rovnici (1), často je potřeba ji vhodně zvolit, protože fyzikální



tlumení nejsou známa), B je maticí vstupů do stavového prostor, u je vektorem vstupní veličiny.

y je vektorem výstupních veličin ze stavového modelu, které lze zvolit (výběrem z poloh, rychlostí nebo zrychlením nodů modelu).

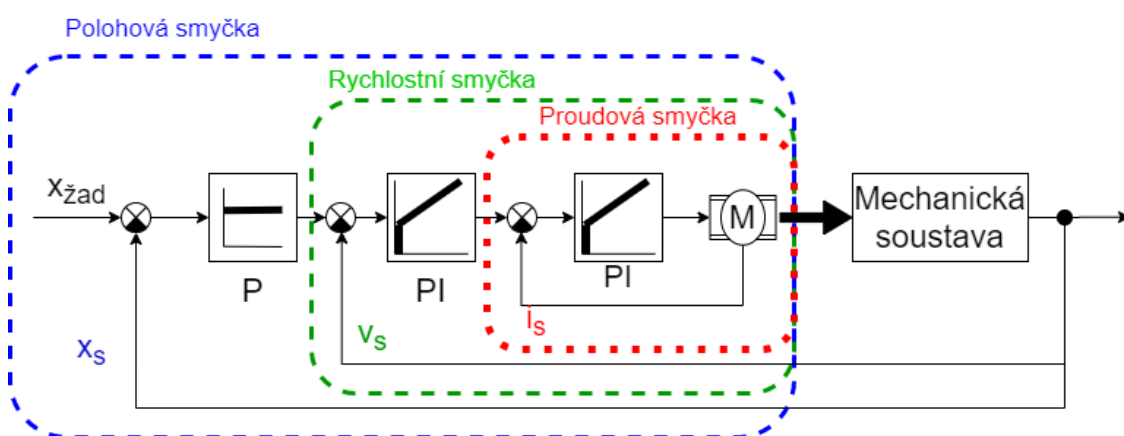
C je matice výstupu stavového prostoru a D je tzv. feedthrough matice a obě jsou dále odvozeny od požadovaného výstupu.

Pro převod mechanické stavby pohonu je potřeba za stavové souřadnice dosadit souřadnice modální. Stavové souřadnice jsou definovány podle předpisu, kde q_i jsou modální souřadnice (16):

$$\begin{aligned} s_i &= q_i \\ s_{(m+i)} &= \dot{q}_i \\ \dot{s}_i &= s_{(m+i)} = \dot{q}_i \\ \dot{s}_{(m+i)} &= \ddot{q}_i \end{aligned} \quad (16)$$

3.7 Kaskádní regulace

U pohonů os výrobních strojů se využívá takzvaného kaskádního uspořádání regulačního obvodu se třemi hierarchicky uspořádanými zpětnými vazbami (proudovou, rychlostní a polohovou). Obecné schéma kaskádní regulace je na Obr. 19.



Obr. 19 Schéma kaskádní regulace

Kde x_z je žádaná hodnota polohy, x_s je skutečná hodnota polohy. Jejich rozdíl se označuje jako regulační odchylka polohy. Stejně jsou definovány hodnoty regulačních odchylek rychlostí a proudů. Skutečné hodnoty polohy a rychlosti se odečítají z odměřování na stroji.



Z obrázku je dále vidět, že u kaskádní regulace výrobních strojů se většinou vyskytnou PI a P regulátory, které mají váhové koeficienty:

- K_p – konstanta proporcionálního zesílení
- T_N – integrační časová konstanta (pouze u PI regulátoru)

P neboli proporcionální regulátor je nejjednodušším typem regulátoru, jeho činnost spočívá v násobení regulační odchylky konstantou zesílení.

PI Proporcionálně – integrační regulátor, jeho výstupním signálem je součet vstupního signálu a jeho integrálu v čase (dle hodnoty integrační časové konstanty), které jsou vynásobeny konstantou proporcionálního zesílení. Tyto koeficienty slouží k ladění regulátoru. Hlavním přínosem PI regulátoru je, že během času díky integraci hodnota regulační odchylky dosáhne nuly.

3.7.1 Proudová zpětná vazba

Proudová smyčka tvoří základ kaskádní regulace. Vstupem do ní je rozdíl signálu požadovaného a skutečného proudu, výstupem je hodnota žádaného napětí na svorkách motoru. Ten je vytvářen pomocí Pulzně šířkové modulace (PWM). Tato modulace zaručuje tvorbu analogového signálu silového napětí na svorkách motoru dle signálu žádaného napětí pomocí střídání obdélníkových pulzů. Takto vytvořené skutečné napětí je vyhlazeno díky vlastnostem cívek v motoru.

Pro kvalitní regulaci je třeba co nejrychleji dosáhnout požadované hodnoty proudu, ta je však omezena indukčností vinutí v motorech a napětím na něm indukovaným. Pro eliminaci těchto vlivů v proudové regulaci se používá PI regulátor, který umožní dosažení nulové hodnoty regulační odchylky.

Proudová regulace je výhradně určena pro potlačení škodlivých elektrických jevů a její ladění je obvykle dáno výrobcem motoru. Neovlivňuje proto přímo dynamické vlastnosti stroje.

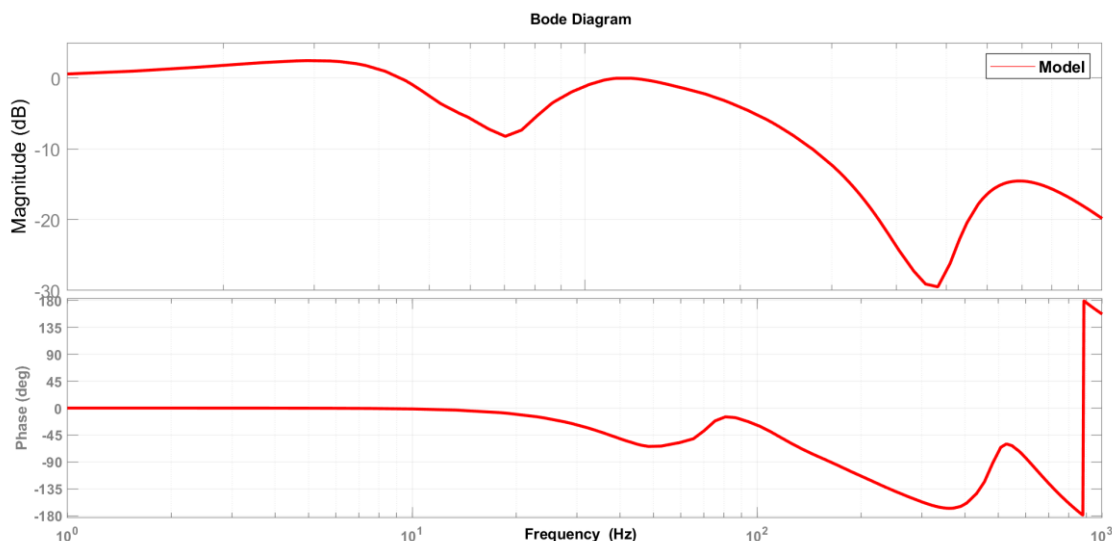
3.7.2 Rychlostní zpětná vazba

Na rozdíl od proudové vazby je rychlostní smyčka již ovlivněna mechanikou stroje a pohonu, přičemž zároveň má podstatný vliv na polohovou smyčku. Vstupem je rozdíl signálu požadované a skutečné rychlosti, výstupem je signál požadovaného proudu.

Obsahuje PI regulátor, při jehož ladění je snaha dosažení maximálního proporcionálního zesílení K_{pV} a minimální hodnoty integrační časové konstanty T_{NV} při dostatečném tlumení přechodových dějů. Při ladění reálného stroje a také pro verifikaci virtuálních modelů se používá Bodeho diagram. Dále lze rychlostní regulaci ověřit odezvou na skok rychlosti a



maximální překmit nesmí přesáhnout 20 %. Do toho se zakresluje zesílení, které je dáno poměrem amplitud vstupního a výstupního signálu. Bode diagram rychlostní smyčky je na Obr. 20



Obr. 20 Bode diagram rychlostní smyčky

Z Bodeho digramu se odečte propustné pásmo rychlostní regulace dané frekvencí, kde dojde k útlumu amplitudy o 3 dB.

Vysoká hodnota propustného pásma je měřítkem kvality rychlostní regulace, čím vyšší je tato hodnota tím lepší dynamické vlastnosti má stroj. [26]

3.7.3 Polohová zpětná vazba

Polohová zpětná vazba je vrcholem hierarchie a je nejdůležitější z celé kaskádní regulace, jelikož regulace polohy je v obráběcích strojích základní potřeba. Vstupem do polohové smyčky je okamžitá odchylka žádané a skutečné polohy z odměřování stroje. Výstupem je hodnota žádané rychlosti.

Za předpokladu kvalitního nastavení proudové a rychlostní smyčky pro její ladění je dostačující použití P regulátoru s rychlostní konstantou K_V . Kvalita se posuzuje měřením odezvy na rampu polohy.

K_V se nastavuje tak, aby průběh regulační odchylky nebyl zakmitaný. Hlavním přínosem celé polohové regulace je dokonalá statická tuhost zaručená vlastností rychlostní regulace. To znamená, že klidová poloha nebo rovnoměrná rychlost pohonu nezávisí na velikosti vnější síly, pokud ta se nemění v čase. [26]



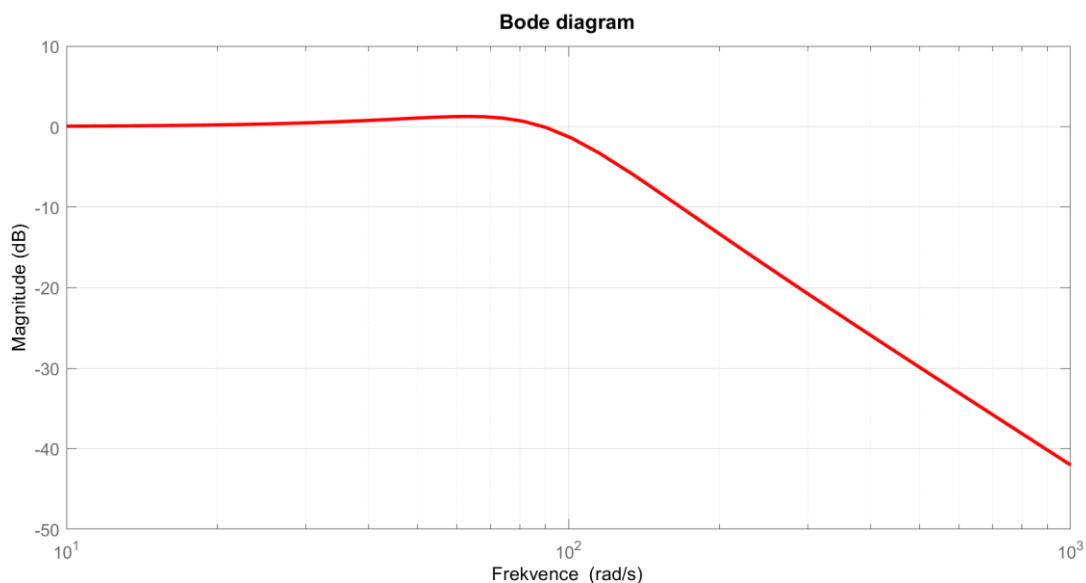
3.7.4 Odměřování

Skutečné hodnoty signálů jsou získány pomocí odměřovacích systémů. Jejich kvalita je velmi důležitá pro pohony s lineárními motory. Rychlostní zpětná vazba se uzavírá z důvodu stability vždy ze snímače na motoru. Současně signály pro rychlostní regulaci jsou získané derivací signálu polohy. Odměřování proto musí být dostatečně jemné a nesmí být zatížené šumem, protože derivace šumy zesiluje.

3.7.5 Filtry

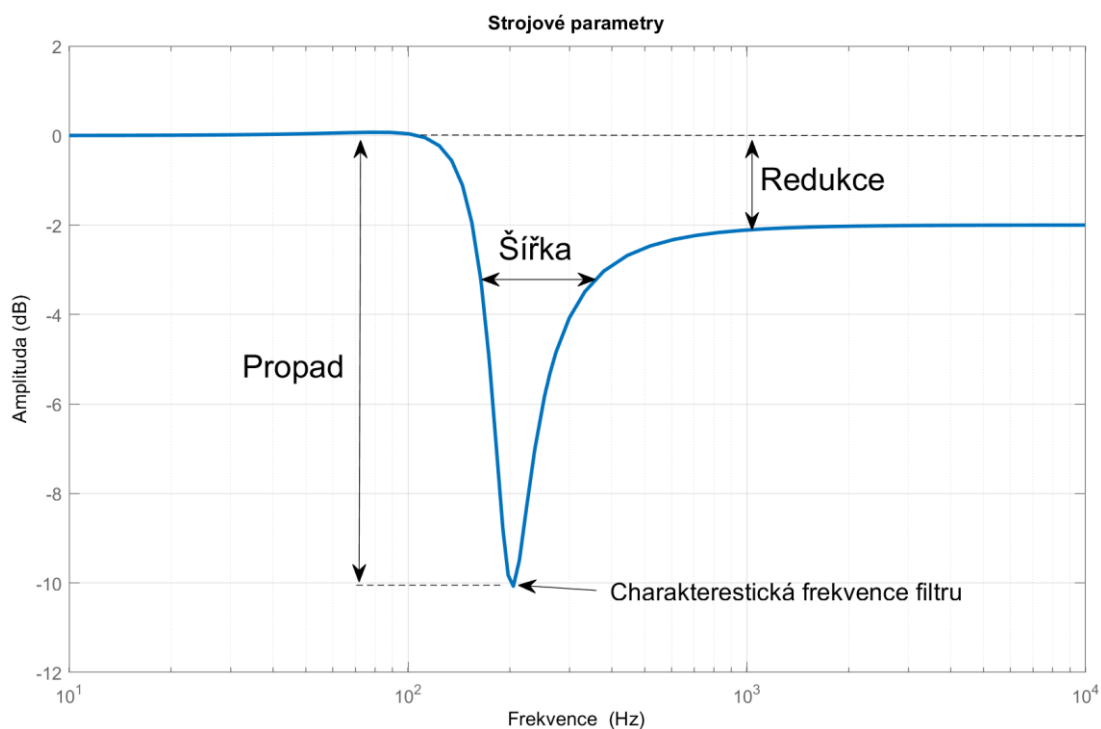
Škodlivé účinky vyvolané nedokonalou stavbou strojů lze v rámci kaskádní regulace dále částečně eliminovat zavedením filtrů před rychlostní nebo proudovou smyčkou. V rámci kaskádní regulace obráběcích strojů se používají zejména dva druhy filtrů.

- Low-pass (dolní propust) sloužící pro potlačení vyšších frekvencí, jeho amplitudová frekvenční charakteristika je zobrazena na Obr. 21



Obr. 21 Filtr typu dolní propust

- Band-stop (pásmová zadrž), tento filtr je určen pro potlačení jedné konkrétní frekvence. Parametry podstatné pro naladění stroje jsou uvedené na Obr. 22



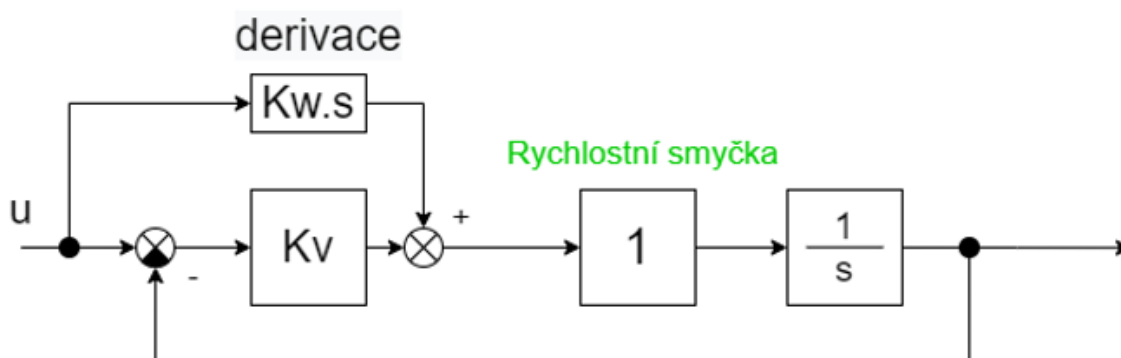
Obr. 22 Strojové parametry filtru pásmová zadrž

Použití filtrů by mělo být až posledním východiskem při ladění pohonů v případě, že již není možné provádět zásahy do hotové mechanické konstrukce. [26]

3.7.6 Feedforwardy

Feedforwardy neboli dopředné vazby, jsou přídavné signály zavedené na vstup rychlostního, resp. proudového regulátoru

Rychlostní feedforward je zavedení přídavného signálu požadované rychlosti na vstup rychlostního regulátoru přímo z řídicího systému, který derivuje signál požadované polohy a vynásobí ho váhovým koeficientem K_W , jak je vidět na Obr. 23 .



Obr. 23 Rychlostní feedforward

$K_W = [0:1]$, přičemž pro ideální regulační obvod, při $K_W = 1$ je polohová odchylka pohonu nulová alespoň při ustálené rychlosti. U kruhové interpolace platí, že při nasazení rychlostního feedforwardu v obou pohonech je nulová chyba poloměru $\Delta R = 0$. [27]

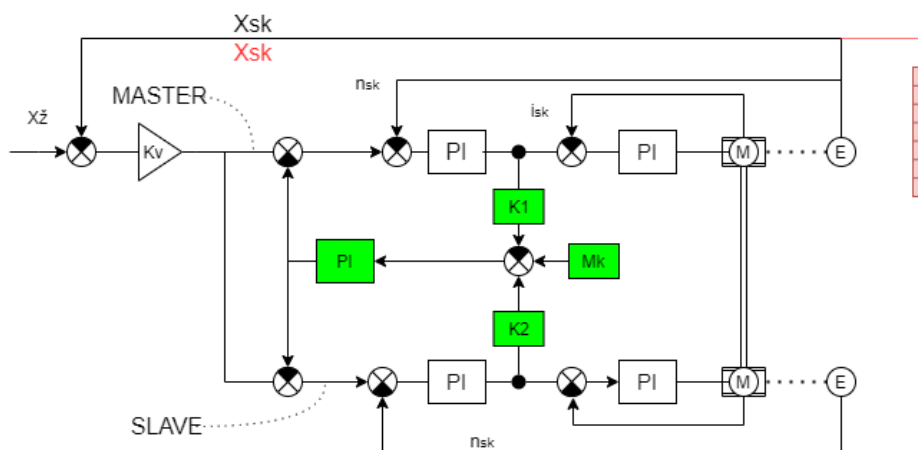
Proudový ("silový") feedforward, kterým je přiváděn signál požadovaného zrychlení přímo na vstup proudového regulátoru. Tím je možno dále zlepšit sledovací schopnost pohonu při požadovaných rychlých změnách rychlosti. Použití proudového feedforwardu je riskantní, protože druhou derivací jsou zvýrazněny nespojitosti a mohou vzniknout nespílitelné nároky na motor. [27]

3.8 Speciální případy řízení

Kaskádní regulace popsaná v předchozí kapitole uvažuje regulaci řízení s jedním pohonem. Existují ale speciální druhy řízení pro pohony s několika motory, které s výjimkou paralelního chodu budou popsány v této kapitole.

3.8.1 Master Slave

Speciálním typem řízení je typ Master – slave. Tento druh řízení se používá primárně pro pohony s převodem pastorek-hřeben. Tento způsob řízení zaručuje pevnou vazbu mezi motory. Při použití několika motorů a volbou tohoto typu řízení je vymezena vůle, toto je zaručeno funkcí elektrického předpětí. Pro tento druh řízení je hlavní motor označen jako Master, má svojí uzavřenou polohovou smyčku z vlastního odměřování. Motor zapojený jako Slave je závislý na motoru Master, který mu posílá signál požadované rychlosti na vstup rychlostní smyčky. Schéma regulace je na Obr. 24. [28]

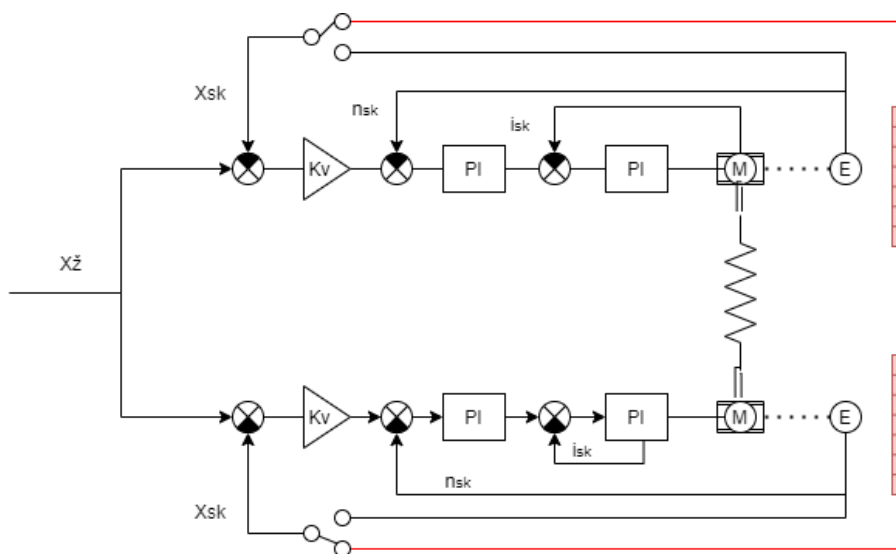


Obr. 24 Schéma řízení Master-Slave

3.8.2 Gantry

Další speciální typem řízení je Gantry, které se používá pro portálové stroje.

Schéma řízení Gantry je na Obr. 25. Tento druh řízení má celou regulační smyčku s vlastním odměřováním pro každý motor.



Obr. 25 Schéma řízení Gantry

Společným vstupem je signál žádané polohy. Řídicí systém vysílá shodné požadavky polohy do obou motorů a neustále vyhodnocuje jejich vzájemnou polohu. Při překročení stanoveného limitu pro odchylku je vzájemná poloha korigována. [28]

Jedním z důvodů, proč se Gantry řízení používá pro stroje s portálovou konstrukcí, je jejich symetrická stavba vedoucí k podobnému nastavení

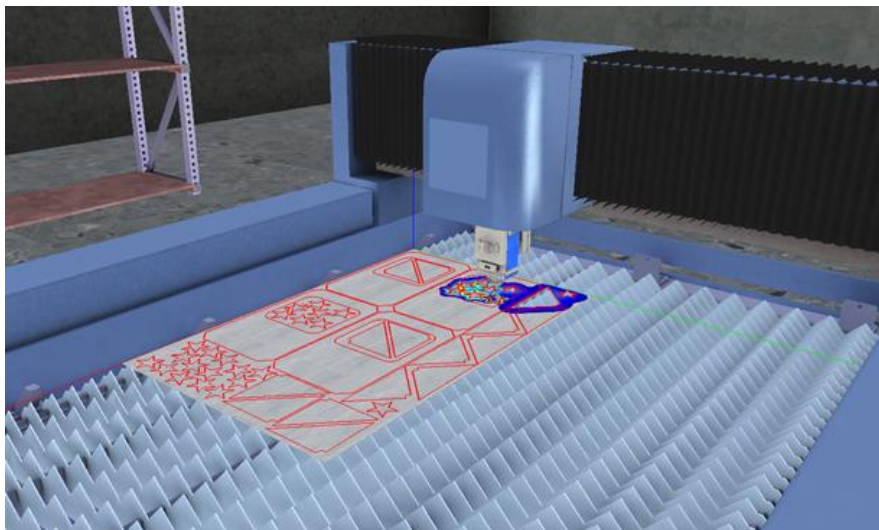


regulačních konstant. Ze schématu je patrná pružná vazba mezi motory, která reprezentuje poddajnost portálu, za provozu dojde k jejímu vyztužení.

3.9 Interakce obrobku a nástroje

Další úroveň virtuálního modelování je modelování interakce obrobku a nástroje. Obecně platí, že tato úroveň se používá pro třískové obrábění. Pro laserové stroje však existuje řešení podobné.

Společnost *Lantek* a *Vicomtech* vyvíjí 3D simulační software *BeroSim*, který dovoluje grafické a interaktivní výpočty toho, jak zdroje tepla působí na plech při řezání laserem nebo plazmou. Toto poskytuje informativní přehled o teplotních deformacích. [29] Pracovní prostředí programu je na Obr. 26.



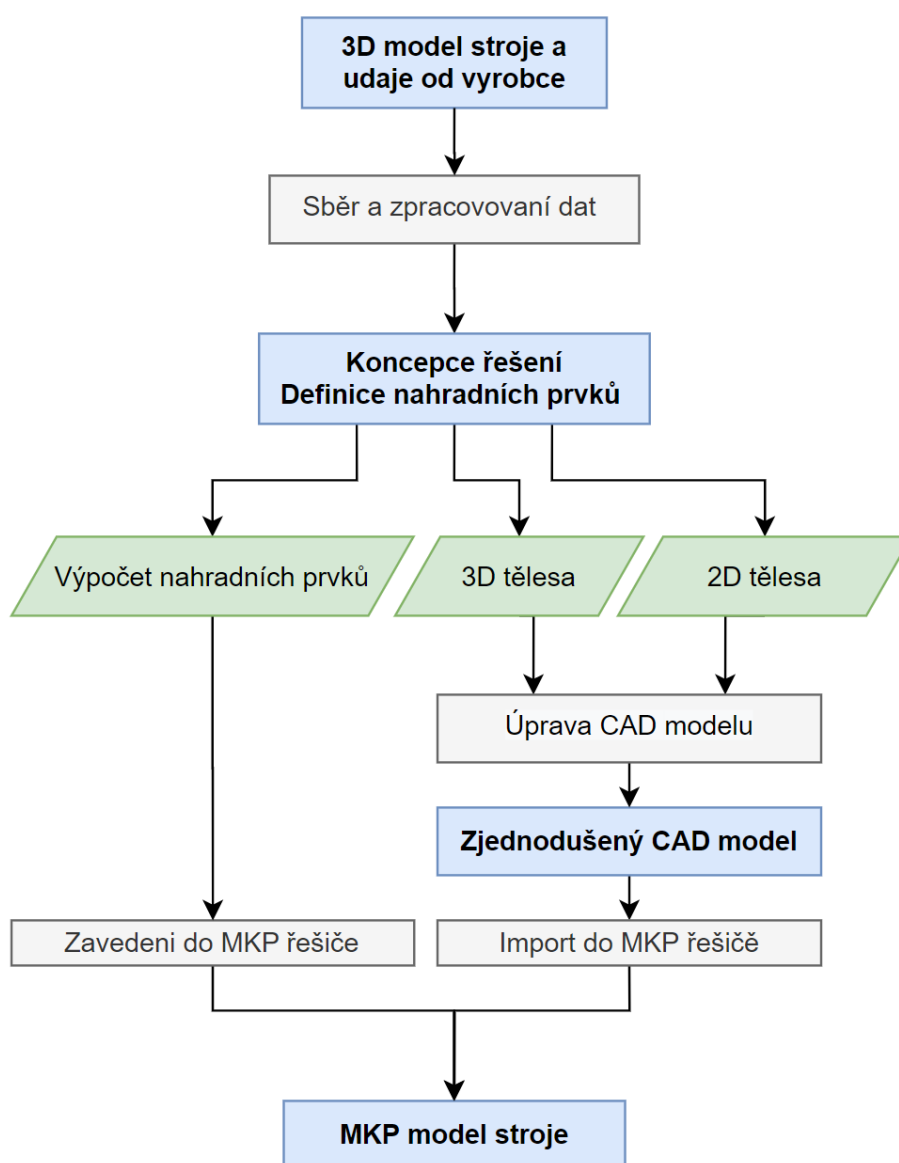
Obr. 26 Simulace v *Berosim* [29]

Výsledná data ze simulace umožňuje optimalizovat vygenerovanou dráhu pojezdu nástroje z hlediska teplotních deformací. Výslednou optimalizovanou dráhu lze poslat na předchozí úroveň propojeného modelu a provést již zmíněné simulace.



4. Tvorba propojeného modelu

V řešební části byly popsány současné možnosti a omezení při modelování CNC laserových palicích strojů. Pro tuto práci bylo potřeba vytvořit model nosné struktury stroje, následně tento model podrobit numerické modální analýze a na základě získaných dynamických vlastností převést model do stavového prostoru, kde ho následně propojit s modelem regulace pohonu. Proces tvorby MKP modelu je na Obr. 27

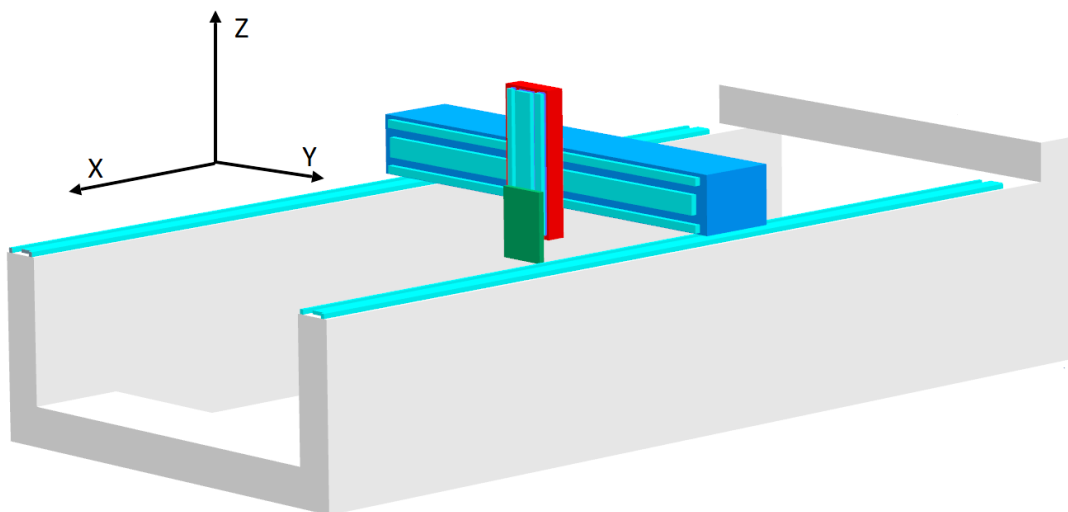


Obr. 27 Schéma tvorby MKP modelu



4.1 Koncepce řešení

Pro tvorbu modelu nosné struktury stroje výrobce Vanad 2000 a.s. poskytnul 3D model sestavy laserového stroje Kompakt laser. Schematicky lze zobrazit sestavy stroje, které budou importované pro další úpravy, na Obr. 28. Souřadnicový systém odpovídá označení pohyblivých os stroje.



Obr. 28 Schematicke zobrazení stroje a os

Budou importované celkem tři podsestavy:

- Rám – označen bílou barvou, složen z lože s portálem, nepohyblivý.
- Příčník – označen modrou barvou
- Support – složen ze dvou částí, první pohyblivá ve směru Y je označena červenou barvou, druhá pohyblivá ve směru Z je nosičem laserové hlavy umístěné na desce a je označena zelenou barvou.

Výsledný model by měl umožnit vytvořit v MKP síť, která je tvořena co nejmenším počtem elementů. Z těchto důvodů byla zvolena hybridní síť z 3D objemových a 2D skořepinových elementů. K tomu bylo potřeba původní 3D CAD model zjednodušit. Každé zjednodušení však znamená odchylku od skutečnosti, takže je třeba vyhodnotit, jak zjednodušení ovlivňuje výsledné řešení a zda je to relevantní. Podrobný popis uprav pro zjednodušení je v dalších podkapitolách.



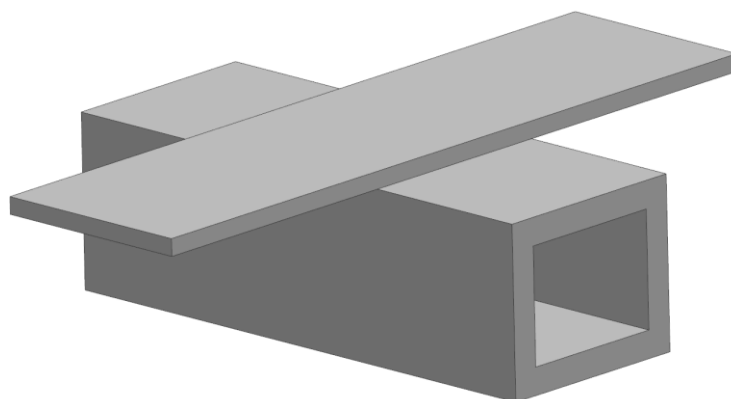
4.2 Úprava 3D modelu

Pro zjednodušení původního 3D modelu byl zvolen program *NX12* od firmy *Siemens*. Tento program podporuje různá pokročile funkce pro zjednodušení dílů a dále umožňuje snadný import zjednodušeného modelů do MKP řešiče *Ansys*.

Model obsahoval velký počet tenkostěnných svařených 3D těles, a proto bylo uvažováno, že v MKP řešiči bude použita hybridní síť.

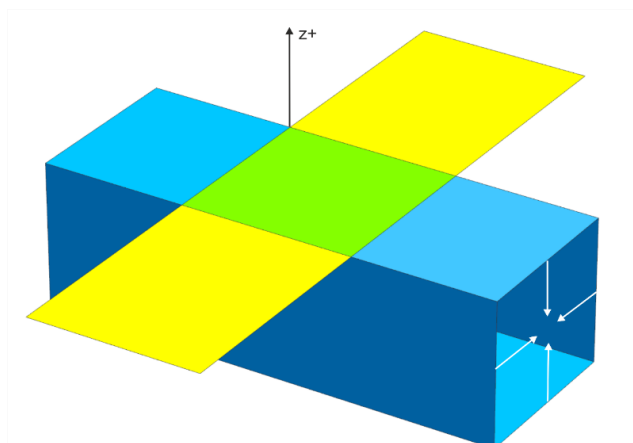
Tenkostěnná 3D tělesa tak bylo třeba nahradit referenčními plochami. Vzniklým plochám v prostředí MKP bude následně přidělena tloušťka a směr jejího růstu. Po vygenerování sítě, vznikne topologie, která se musí shodovat s topologií původního objemového tělesa.

Toto lze ukázat na sestavě z Obr. 29, ve které je plechový díl o tloušťce 5 mm upevněn na profilovém tělese s tloušťkou stěn 8 mm. Jako náhradní plochy bude vhodné vybrat vnější stěny profilového tělesa a dolní stěnu plechového dílu.



Obr. 29 Ukázka tvorby plošného modelu

Pak náhradní plošné těleso je na Obr. 30, kde modrou barvou jsou označeny plochy, kterým musí přiřadit tloušťka 8 mm ve směru bílých šipek, žlutým plochám se má přiřadit tloušťka 5 mm ve směru +Z. Zelené ploše se musí přiřadit tloušťka 13 mm ve směru +Z, s tím že bude mít odstup -8 mm. Tím se zachová topologie původní sestavy.

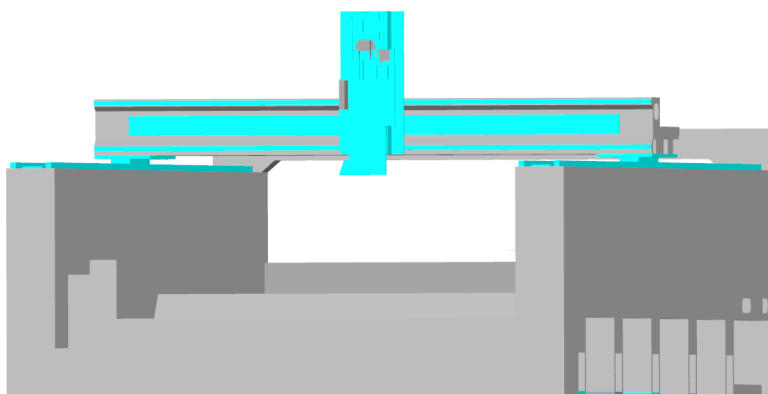


Obr. 30 Modelování plosných teles na vnejšek

Hodně se používá modelování na střednici, v tomto případě se náhradní plocha vytváří v sečné rovině uprostřed nejmenší stěny tenkostěného 3D tělesa. Toto je vhodné pro náhradu žeber, nebo stejných těl, které jsou od sebe umístěny v konstantní vzdálenosti.

Poslední metoda byla použita pro tělesa, kde původní objemová tělesa byla v kontaktu a jedno je vhodné nahradit referenční plochou. Referenční nahrazení musí mít s objemovým tělesem dostatečnou plochu kontaktu. Bývá vhodné v místě kontaktu dále zmenšit objemové těleso a při tvorbě sítě pak zvolit hodnotu tloušťky jako součet tloušťky plošného dílu a odebraného materiálu.

Je zřejmé, že přístupů k tvorbě takových modelů je více, nejdůležitější podstatou je korektní nahrazení topologie původního tělesa. Výsledný geometrický model je na Obr. 31



Obr. 31 Výsledný geometrický model



4.3 Import

Modely zjednodušené dle postupu z předchozí kapitoly byly importované do *Ansysu* pomocí bloku *DesignModeler*. Jednotlivá tělesa podsestav jsou po importu spojena. *Ansys* však neumožňuje vytvořit síť pro sestavy, kde jsou objemové a plošné prvky spolu, proto je potřeba je oddělit a tím vznikne 6 podsestav, které je třeba mezi sebou provázat pomocí vazebních rovnic.

4.4 Náhrada vazeb modelu

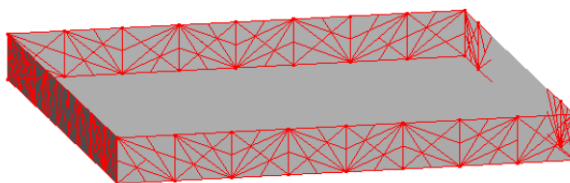
Importovaný model z předchozího kroku je potřeba doplnit o vazby, které zanechají v modelu stejný počet stupňů volnosti jako u reálného modelu a provést další náhrady.

4.4.1 Vazby mezi referenčními plochami a objemovými tělesy

Jako první se musí nahradit vazba mezi prvky sestav, odstraněná po importu v *DesignModeleru*. Proto je třeba vytvořit pevnou vazbu typu *bonded*. Ta se umístí mezi plochy původního kontaktu plošných a objemových těles. Poté se zvolí metoda formulace na *MPC (Multi Point Constraint)*.

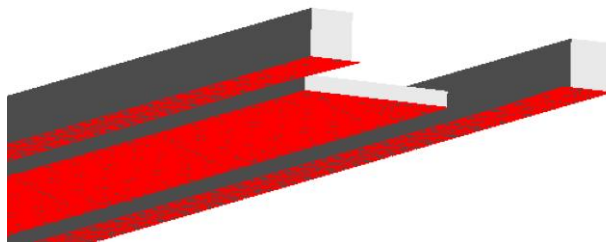
MPC je metodou vazbových rovnic pro spojení všech uzlů sítě na rozhraní svazovaných těles a svazuje tím všechny stupně volnosti. Tato vazba dále nemá vliv na vlastnosti povrchu, na které je napojena. Dále umožňuje snadnou kontrolu při ověření správnosti přípravy úlohy. [23]

Ukázka *MPC* pro náhradu kontaktu objemových podpěr lože s referenčními plošnými náhradami je na Obr. 32. Tato vazba byla pak použita pro všechny podpěry a plošná tělesa lože.



Obr. 32 Podpěra a MPC rovnice v místě plošného tělesa

Obdobně byly již na plošná tělesa lože upevněny sekundární díly motoru a kolejnice lineárních vedení viz. Toto bylo provedeno pro osy: X1, X2, Y a pouze pro kolejnice v ose Z viz. Obr. 33



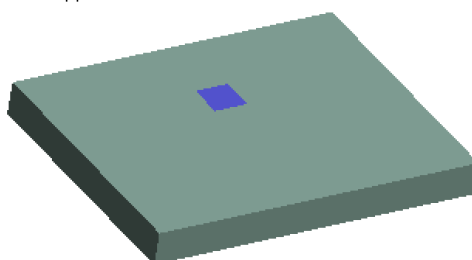
Obr. 33 MPC vazby kolejnic

4.4.2 Náhrada uložení

Reálná sestava lože je uložena na 12 patkách, které jsou vnořené do podpěr. Pro náhradu uložení patky byly vytvořené náhradní plochy.

V těchto plochách byla vytvořena absolutně tuhá vazba typu *Fixed Support*, jak je vidět na Obr. 34. Tím sestava lože byla kompletně upevněna a neměla žádné stupně volnosti, což je totožné s realitou.

■ Fixed Support



Obr. 34 Pevná vazba pro náhradu uložení

4.4.3 Náhrada pohonu v ose Z

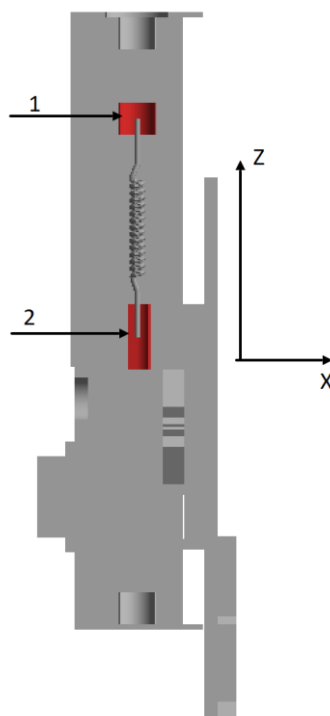
S výjimkou pohonů s lineárními motory je pro výpočet modální analýzy potřeba provést náhradu pohonů. Pohon laserové pracovní hlavy v ose Z je výrobcem Vanad plánován ve variantě sestavy servomotoru a lineární jednotky s KŠ. Tato lineární jednotka představuje kompletní modulární řešení od jednoho výrobce pohonu.

Pro nahrazení pohonu s KŠ se často používá diskrétní model s 1D prvky, k jeho tvorbě jsou potřebné technické údaje pro výpočet náhradní tuhosti jednotlivých komponent. Výrobce Vanad a.s. poskytl některé údaje k použité lineární jednotce. Údaje však nebyly dostatečné pro vytvoření náhradního modelu, a nejsou uvedené ani výrobcem jednotky.

Jak již plyne z rešeršní části této práce, modelovaný stroj je určen pro řezání ve dvourozměrném prostoru, pro tyto účely se nepředpokládá velká pohyblivost v ose Z, naopak je kladen důraz na konstantní vzdálenost mezi čočkou a obrobkem.

Z těchto důvodů bylo zvoleno kompromisní řešení s náhradou pohonu v ose pružnou vazbou s tuhostí $k_{pz} = 2,7 \cdot 10^{11} [N/mm]$.

Pro její umístění byly vytvořené dva remote pointy. První byl vytvořen v těžišti plochy umístění ložiska v domečku pro uchycení motoru. Druhý byl vytvořen v okolí těžišti plochy uchycení kuličkové matice v její domečku, tak aby byl přesně pod prvním remote pointem viz. Obr. 35



Obr. 35 Náhrada pohonu osy Z

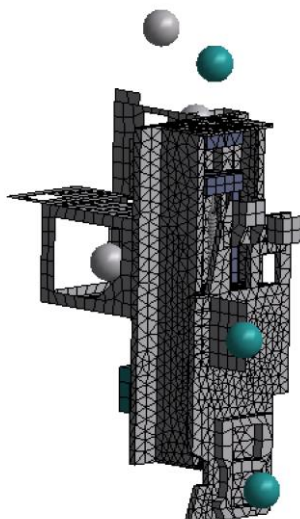
Servomotor a kuličkový šroub budou nahrazeny hmotnými body. Tyto náhrady jsou popsány v další podkapitole.

4.4.4 Náhrada hmot

Hmotnosti těles jsou podstatné pro modální analýzu. Náhrada hmot se primárně týkala sestavy supportu, kde agregáty a laserová hlava tvořily polovinu pohyblivých hmot v ose Z.



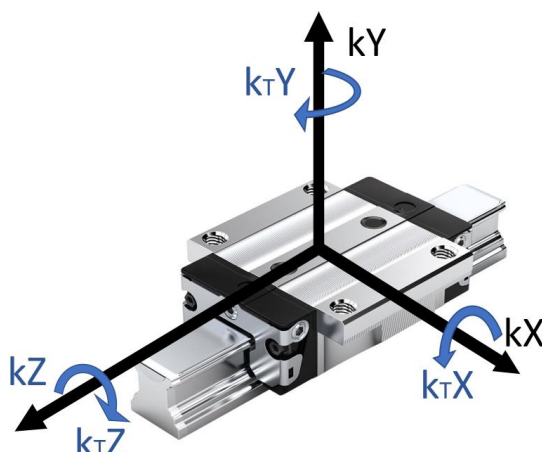
Výrobce poskytl přesné hodnoty hmotnosti jednotlivých komponent sestavy supportu. Příslušná těžiště pak byla odečtená z geometrického modelu. Tím byly nahrazeny agregáty a laserová hlava. Dále byl nahrazen kuličkový šroub, a to tak že z katalogových údajů byla vypočtena náhradní hmotnost a umístěna v jeho těžišti. Celková sestava supportu včetně náhradních hmotných bodu je na Obr. 36



Obr. 36 Model supportu

4.4.5 Náhrada lineárních vedení

Lineární vedení v osách X , $X1$, Y , Z spojují podsestavy modelu, a je třeba je nahradit. V MKP modelu, je potřeba vytvořit dvojici remote pointů pro každý z vozíků. První remote point bude vytvořen ve středu plochy, která vznikla promítnutím ocelové části vozíku na rovinu jeho původní umístění na pohyblivé podsestavě. Druhý vzniká promítnutím stejné plochy na rovinu kolejnice. V remote pointech vozíku byly následně zavedeny náhradní souřadnicové systémy, tak aby byly totožné se souřadnicovým systémem na Obr. 37, kde k_X , k_Y , k_Z označují, jak příslušnou osu, tak i tuhosti v pojmenovaných směrech. k_{TX} , k_{TY} , k_{TZ} jsou torzní tuhosti. Vozíky jsou pohyblivé v ose k_Z



Obr. 37 Souradnicovy systém vozíku lineárního vedení

Pro výpočet náhradní tuhosti vozíku lineárního vedení v příslušných katalozích se najdou použité modely a odečtou se rozměry vozíků. Ve stejných katalozích se najdou diagramy tuhosti vozíku a z lineární části diagramu se odečtou tuhosti při zatížení:

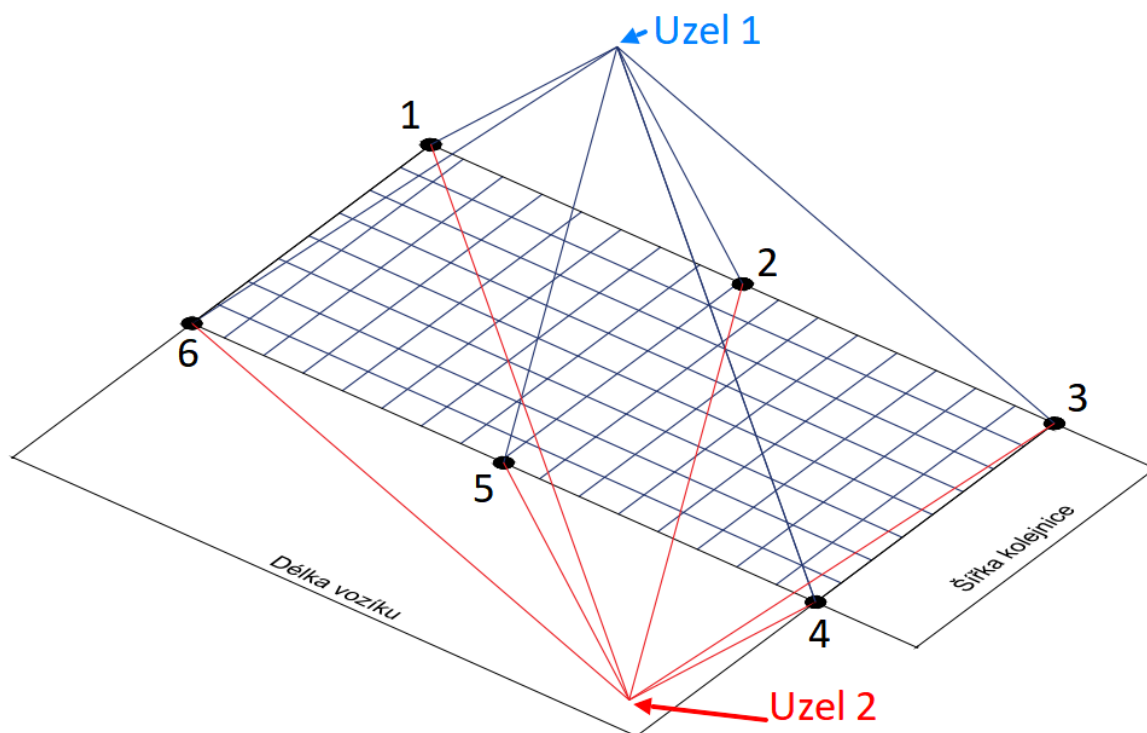
- tlakem
- tahem
- bočním zatížením

Průměrováním odečtených hodnot pro tah a tlak je získána náhradní tuhost pro směr k_x , k_y vozíku. Výsledné hodnoty jsou v Tab. 1

Tab. 1 Náhradní tuhosti vozíku lineárního vedení

Tuhosti odečtené z katalogu		
Parametr	k_x	k_y
Jednotky	[N/mm]	[N/mm]
Osa stroje X	417000	683000
Osa stroje Y	303000	359000
Osa stroje Z	200000	264000

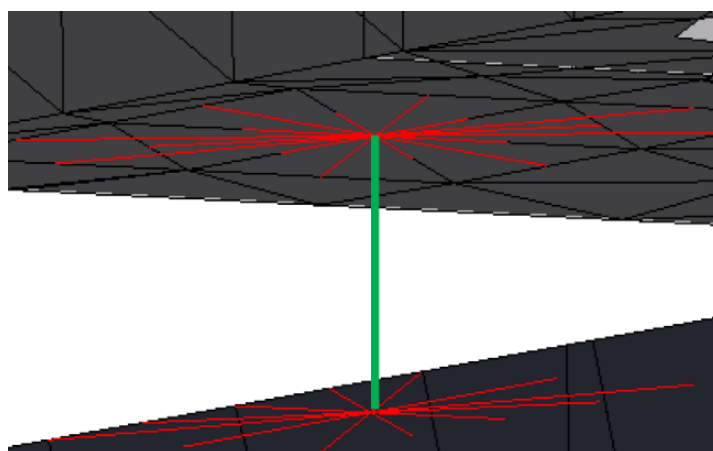
Remote pointy jsou dále použité pro tvorbu submodelu vozíku. Tento submodel je na Obr. 38. V submodelu jsou 2 uzly, které jsou umístěny v remote pointech. Dále v submodelu jsou dvě skořepiny umístěných na sobě, každá je propojena buď s uzlem 1 nebo uzlem 2 pomocí vazebních rovnic. Pro zjednodušení vazební rovnice jsou zobrazené pouze v 6 místech sítě. Mezi dvě skořepiny v šesti místech jsou zavedené dvojice pružin s nulovou délkou. V každém místě je jedna pružina pro směr k_x a jedna pro směr k_y .



Obr. 38 Submodel vozíku

Hodnoty těchto tuhostí jsou měrné hodnoty tuhosti vypočtené z katalogových hodnot výrobce vozíků pro svislou a boční složku tuhosti. Tím vznikne matice 12×12 . Dále se provede Substructuring. Systém se zredukuje na super element s maticovým popisem tuhosti (Matrix27) obsahující diagonální prvky tuhosti (dvě translační a trojici torzních tuhostí).

Ukázka výsledného prvku Matrix 27 je na Obr. 39



Obr. 39 Prvek Matrix27



4.5 Materiály modelu

Firma Vanad poskytla informaci k materiálům použitým v konstrukci stroje VANAD. Jsou použité dva materiály. U lože je použita ocel, a pro support a příčnák jsou zvolené hliníkové slitiny. V modelu byli zanechány modely sekundárních a primárních dílů lineárních motorů. Tyto prvky nemají mít vliv na tuhost stroje, ale jejich velikost je dostatečná, aby při špatné volbě materiálu došlo k chybám v řešení. Bylo pro to potřeba nadefinovat jejich náhradní materiálové vlastnosti: hustota byla vypočtena z katalogových údajů motoru, modul pružnosti byl vybrán řadové nižší než u kovových materiálu. Celkový seznam použitých materiálu je v Tab. 2

Tab. 2 Materiálové parametry modelu

Parametr	Hustota	Youngův modul pružnosti	Poissonova konstanta
Označení	ρ	E	ν
Jednotky	$[kg/m^3]$	$[Pa]$	$[-]$
Materiál	Hodnoty		
Ocel	7850	$2 \cdot 10^{11}$	0,3
Hliník	2770	$7 \cdot 10^{10}$	0,3
Primár	3800	$2 \cdot 10^8$	0,3
Sekundár	5870	$2 \cdot 10^8$	0,3

4.6 Modální analýza

Výpočetní MKP model získaný z předchozí kapitoly je již připraven k provedení modální analýzy v MKP řešiči. Výsledky analýzy by však byly nepoužitelné pro regulaci. Před tím je potřeba zvolit polohu, ve které bude stroj zkoumán. Pro následné propojení MKP modelu s modelem regulaci ve stavovém prostoru jsou podstatné jen několik míst, v jejich uzlech MKP sítě budou vytvořené remote pointy. Nakonec je potřeba zvolit velikost a druh sítě, která bude pro výpočet optimální.

Pro analýzu byla vybraná poloha, která byla nejhorší z hlediska dynamických vlastností, a to uprostřed zdvihu v osách X1, X2 a uprostřed pojezdu v ose Y. Poloha v ose Z byla vybrána jako vzdálenost laserové čočky od doporučené tloušťky plechu, tedy 15 mm od pracovního stolu.



Remote pointy jsou vytvořené v následujících uzlech:

Uzly pro náhradu odměřování v osách X1, X2, Y:

Jsou označené jako „jezdec“ a „pravítko“, z nich se odečítají regulační odchylky polohy a rychlosti. Jsou umístěné poblíž remote pointů příslušných vozíků lineárního vedení.

Uzly pro zavedení silových vstupů:

První z uzlů jsou označené jako „primár“, jsou umístěné ve středu ploch primárních dílů lineárních motoru, které leží proti sekundárním dílům.

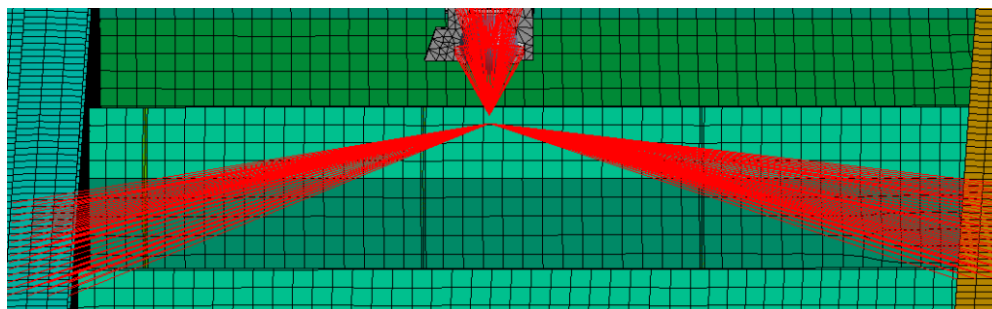
Druhé jsou označené jako „sekundár“, jsou umístěné ve středu ploch, vzniklých promítnutím stěn primárních dílů na sekundární.

Uzly pro posouzení kvality dráhového řízení:

„Nástroj“ – umístěný v místě špičky čočky laserové řezné hlavy, odpovídající zvolené poloze stroje.

„Stůl“ – model pracovního roštu nebyl poskytnut. Pro jeho reprezentaci byla vybrána poloha pod uzlem „Nástroj“ ve vzdálenosti 15 mm. Pro omezení plochy, kde jsou vytvářeny MPC rovnice, byla zvolena vzdálenost 250 mm v obou směrech os X1 a X2 od uzlu nástroje.

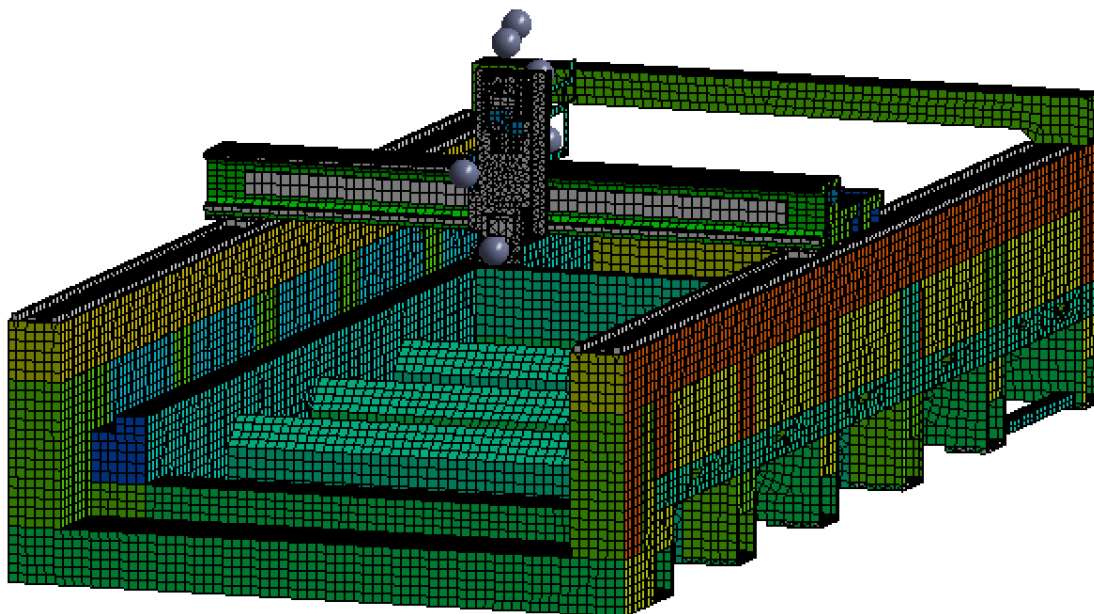
Remote pointy „Nástroj“ a „Stůl“ jsou na Obr. 40.



Obr. 40 Uzly nástroje a stolu

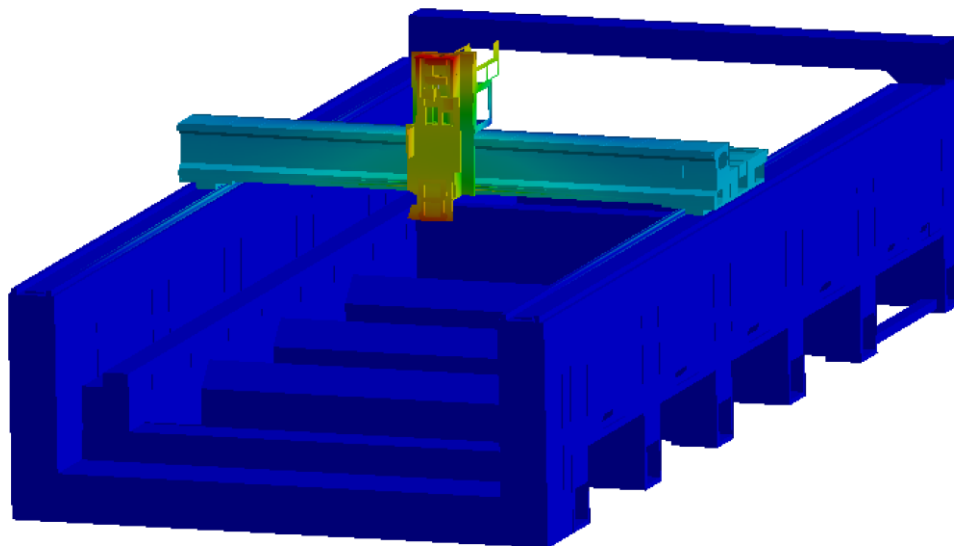
Pro použití MKP modelu v modelu regulace je potřeba vyexportovat mody, alespoň tak velké hodnoty vlastní frekvence, u které je předpokládáno ovlivnění rychlostní regulace. Pro tento model byla zvolena hodnota vlastní frekvence 500 Hz.

Byla vytvořená MKP síť, velikost elementu sítě byla stanovena na 35 mm. Počet elementů 68184, počet uzlů 95840. Pro definovanou úlohu byl stanoven počet modů pro výpočet na hodnotu 450, Výsledný výpočetní model včetně MKP sítě je na Obr. 41



Obr. 41 Model s vytvořenou MKP sítí

Ukázka jednoho z výsledných vlastních tvarů je na Obr. 42. Kde je vidět průhyb příčnicků, a výrazně deformace supportu.



Obr. 42 Vlastní tvar



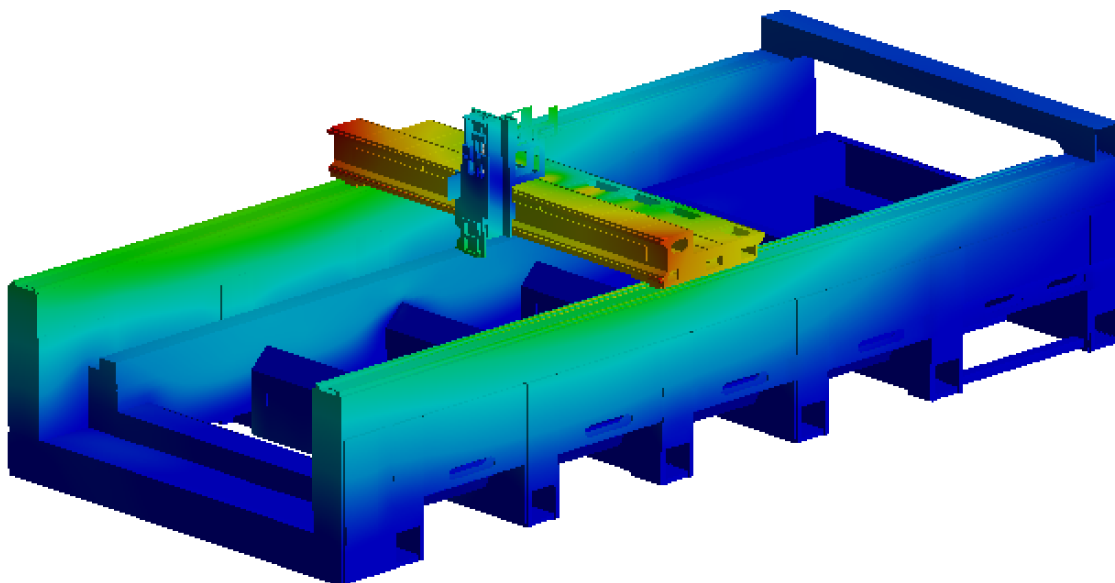
4.7 Výběr důležitých módů

Výsledkem modální analýzy jsou vektor vlastní frekvencí a vlastní tvary, pro uzly vybrané v předchozí kapitole. Celkem bylo vypočteno a exportováno 450 módů, tzn. vlastních tvarů a příslušných vlastní frekvencí. Maximální hodnota vlastní frekvence byla 565,5 Hz.

Tyto data v sobě obsahují velký počet módů, které z hlediska dynamických vlastností nejsou významné. Jsou to módy, kde dochází ke kmitání tenkých plechů, které téměř nemají vliv na okolí exportovaných uzlů.

Proto byla provedena analýza vlivu jednotlivých vlastních tvarů na mechanickou stavbu a exportované uzly

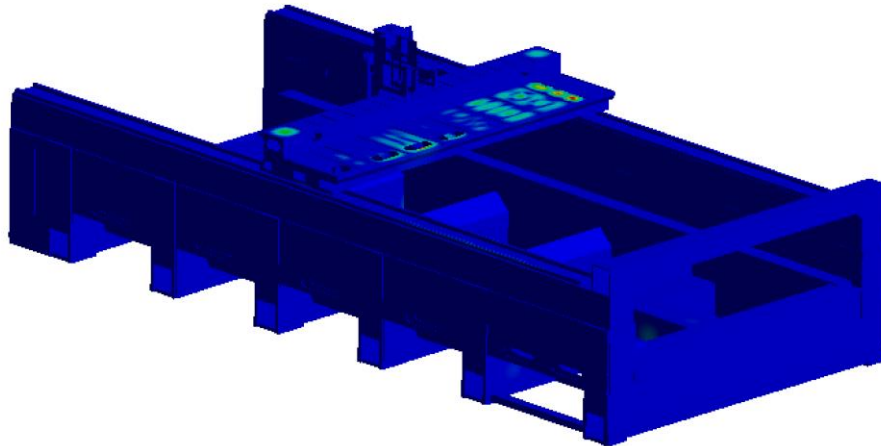
Například na Obr. 43 je vidět vlastní tvar, který odpovídá deformaci lože modelu, dále se výrazně deformuje příčník a support. Tyto deformace jsou v nosné struktuře, a zároveň jsou výrazné v exportovaných bodech.



Obr. 43 Významný vlastní tvar



Naopak na Obr. 44 je vidět, že vlastní tvar odpovídá deformací v tenkém plechu, která se neprojeví na nosné struktuře stroje, ani na exportovaných bodech. Proto takové mody lze vypustit.

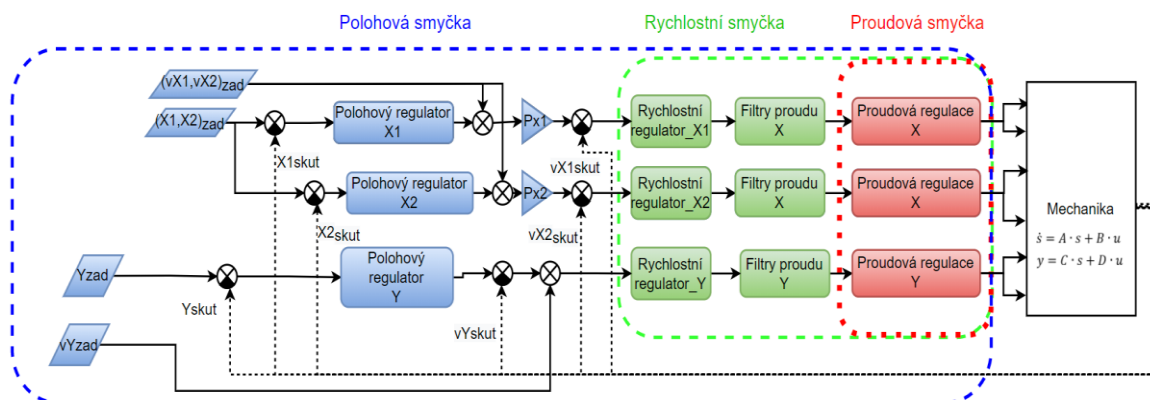


Obr. 44 Vlastní tvar k vypuštění

Celkový počet exportovaných modů byl redukován z 450 na 150. Z těchto exportovaných uzlů byl vytvořen state-space model nosné struktury stroje, který odpovídá definici stavového popisu uvedené v rešeršní části této práce. Bylo použito modální tlumení 10 %.

5. Propojený model s regulací

Z blokových schémat popsaných v rešeršní části práce (Obr. 19 a Obr. 25) bylo odvozeno schéma pro modelovaný stroj. Zejména Gantry řízení os X1, X2 a klasického kaskádního uspořádání osy Y. Náhradní schéma propojeného modelu je na Obr. 45



Obr. 45 Schéma modelu os X1, X2, Y

Je založeno na několika submodelech, které tvoří příslušné regulační smyčky.

Submodely jsou:

- *Mechanika*
- *Proudová regulace*
- *Filtry proudu*
- *Rychlostní regulátor*
- *Polohový regulátor*

Schema bylo vytvořeno v Simulinku a je přílohou této práce:

Propojení modelu se provádí skript *Regulace_sestaveni.m* a řízení se provádí pomocí skriptu *Simulace_rizeni.m*. Výsledné parametry popsané v této kapitole jsou pak brány jako referenční výchozí varianta pro analýzy z kapitoly 7.

5.1 Proudová regulace a její ladění

Proporcionální konstanta zesílení stejná jako časová konstanta motoru jsou určeny výrobcem motoru. Pro tento model byla zvolena náhrada s názvem *PR*, která je daná součinem přenosových funkcí proudové smyčky *PV* přenosovou funkcí dopravního zpoždění *PWM*.

$$PR = PV \cdot PWM \quad (17)$$



Náhrada proudové smyčky PV byla vytvořena pomocí filtrů typu Dolní propust druhého řádu a její přenosová funkce má tvar:

$$PV = \frac{1}{\left(\frac{1}{\Omega_p}\right)^2 \cdot s^2 + \frac{2 \cdot \zeta_p}{\Omega_p} \cdot s + 1} \quad (18)$$

Kde Ω_p je charakteristická frekvence pro filtr typu Dolní propust druhého řádu.

Přenosová funkce pro náhradu dopravního zpoždění PWM je tvořena Padeho rozvojem druhého řádu a má tvar:

$$PWM = \frac{\left(\frac{T_{PWM}}{12}\right)^2 \cdot s^2 - \left(\frac{f_{PWM}}{2}\right) \cdot s + 1}{\left(\frac{T_{PWM}}{12}\right)^2 \cdot s^2 + \left(\frac{T_{PWM}}{2}\right) \cdot s + 1} \quad (19)$$

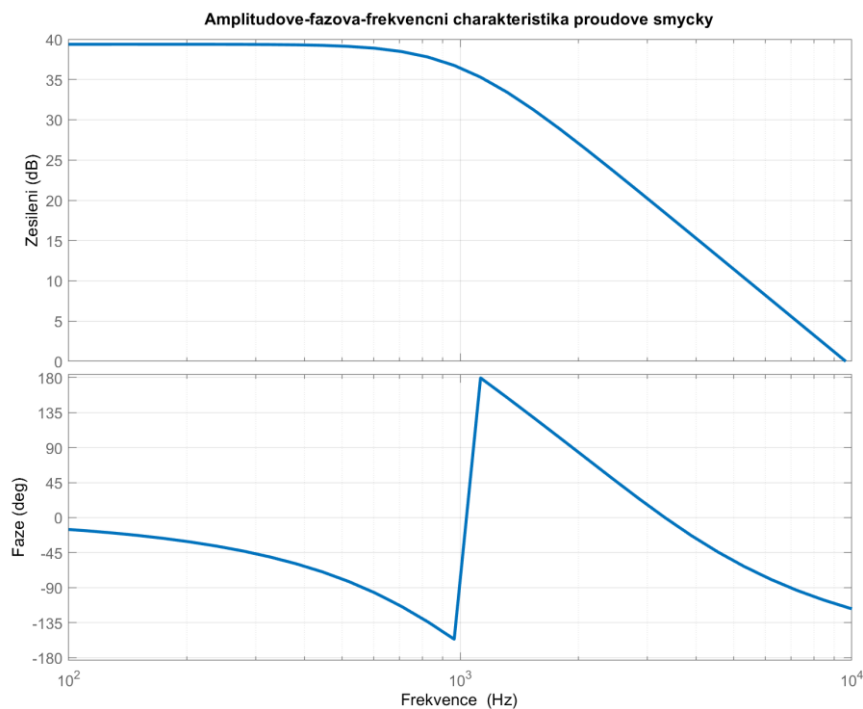
Kde $T_{PWM} = \frac{1}{f_{PWM}}$ je perioda spínání PWM, a f_{PWM} je frekvence spínání PWM.

Parametry pro náhradu jsou uvedené v Tab. 3. Jsou odvozeny z literatury [26]. Hodnota K_M je motorová konstanta a je totožná pro obě osy, jelikož jsou použity motory jedné řady, které mají stejné konstanty [15] Proto smyčky regulovaných os se stejnými motory mají také stejné naladění proudové regulace, které je uvedeno v Tab. 3

Tab. 3 Parametry pro náhradu proudové regulace

Parametr	Označení	Jednotky	Osy X1, X2,Y
Charakteristická frekvence filtrů typu D. P	Ω_p	[Hz]	1000
Frekvence spínání PWM	f_{PWM}	[Hz]	5000
Perioda spínání PWM	T_{PWM}	[s]	0,0002
Motorová konstanta	K_M	[N/A]	93

Výsledná přenosová funkce PR pro obě osy je na Obr. 46



Obr. 46 Proudová smyčka pro osy X1, X2, Y

5.2 Rychlostní regulace a její ladění

Vstupní signály do rychlostní regulace:

- signály požadované rychlosti ' v_{X12_zad} ', ' v_{Y_zad} ',

Parametry rychlostních regulátorů X1, X2, Y:

- proporcionální zesílení K_{PV}
- časové integrační konstanty T_{NV}
- nastavení proudových filtrů

Výstupní signály z rychlostní regulace:

- signály skutečné rychlosti ' v_{X1_skut} ', ' v_{X2_skut} ', ' v_{Y_skut} ',

Provedené analýzy:

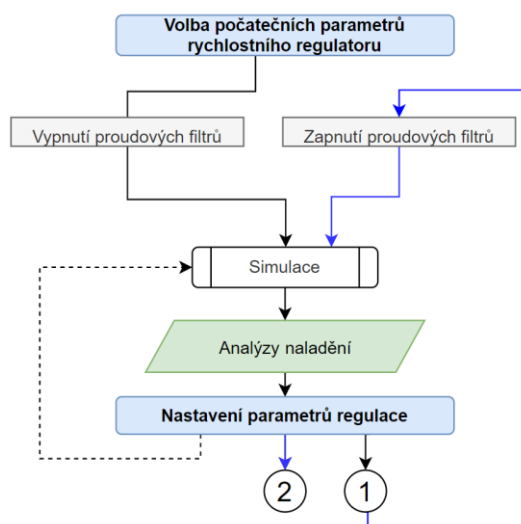
- amplitudově-fázová frekvenční charakteristika (přenosová funkce mezi žádanou a skutečnou rychlostí)
- odezvy na skok rychlostí v osách X1, X2, Y

Z amplitudově-fázové frekvenční charakteristiky se posuzují dvě vlastnosti:

1. Maximální zesílení rychlostní regulace, která nemá překročit hodnotu 2 dB
2. Propustné pásmo, které odpovídá hodnotě frekvencí, na které hodnota zesílení dosáhne -3 dB.

Z průběhu odezvy na skok rychlosti se posuzuje stabilita regulátoru, a překmit odezvy na skok, který má být v rozmezí 20 až 25 %.

Proces ladění rychlostní regulace je na Obr. 50 Na začátku jsou zvolené nějaké malá hodnota proporcionálního zesílení K_{PV} , a velká hodnota integrační časové konstanty T_{NV} . Dále budou vypnuté proudové filtry.



Obr. 47 Proces ladění rychlostní regulace,

Pak proběhne simulace, po které jsou provedeny analýzy naladění regulátoru. Když z analýz je patrna možnost lepšího naladění regulátoru, budou nastaveny nové parametry regulace a simulace a analýzy budou provedeny znovu. Tento proces se opakuje až do stavu (1), kde regulace bude na mezi stability nebo překročení kritérii analýz.

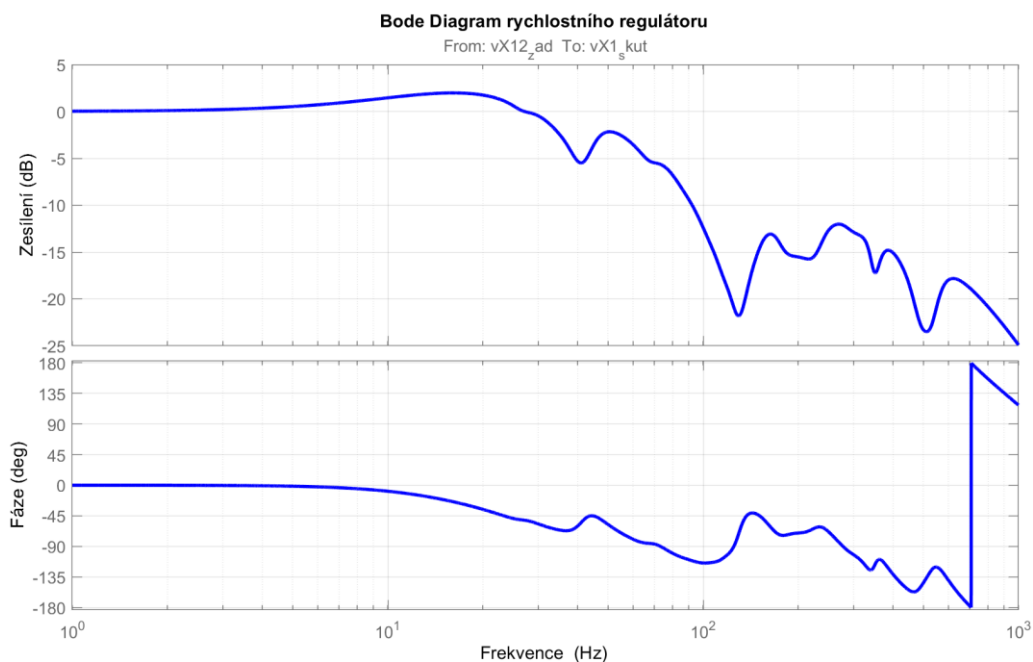
Následně budou zapnuty proudové filtry, a cyklus simulace analýz a nastavení proběhne znovu až do toho stavu kde regulace bude dobře naladěna. Výsledné strojové parametry filtrů jsou v Tab. 4



Tab. 4 Parametry filtrů

Parametry filtrů		Frekvence[Hz]	Šířka[Hz]	Propad[dB]
Nastavení filtru 1	X1 a X2	180	100	-5
	Y	300	200	-3
Nastavení filtru 2	X1 a X2	350	50	-3
	Y	422	100	-3
Nastavení filtru 3	X1 a X2	490	100	-5
	Y	565	200	-8
Nastavení filtru 4	X1 a X2	527	120	-8
	Y	0	0	0

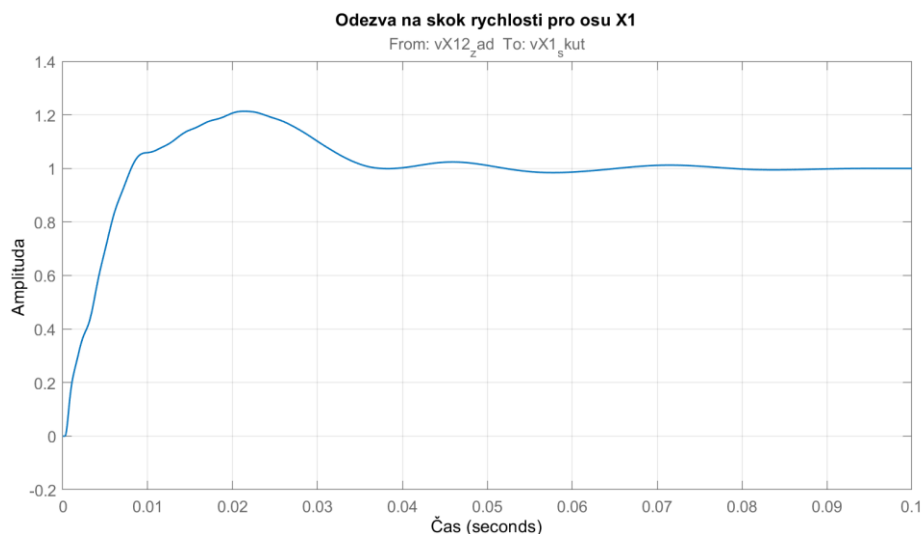
Výsledná amplitudově-fázová frekvenční charakteristika pro osu X1 je na Obr. 48



Obr. 48 Amplitudově-fázová frekvenční charakteristika osy X1

Průběh amplitudově-fázové frekvenční charakteristiky pro osu X2 byl lehce odlišný, toto je způsobeno lehkou nesymetrií geometrickeho 3D modelu příčníku. Tento rozdíl je však dostatečně malý pro jeho zanedbaní.

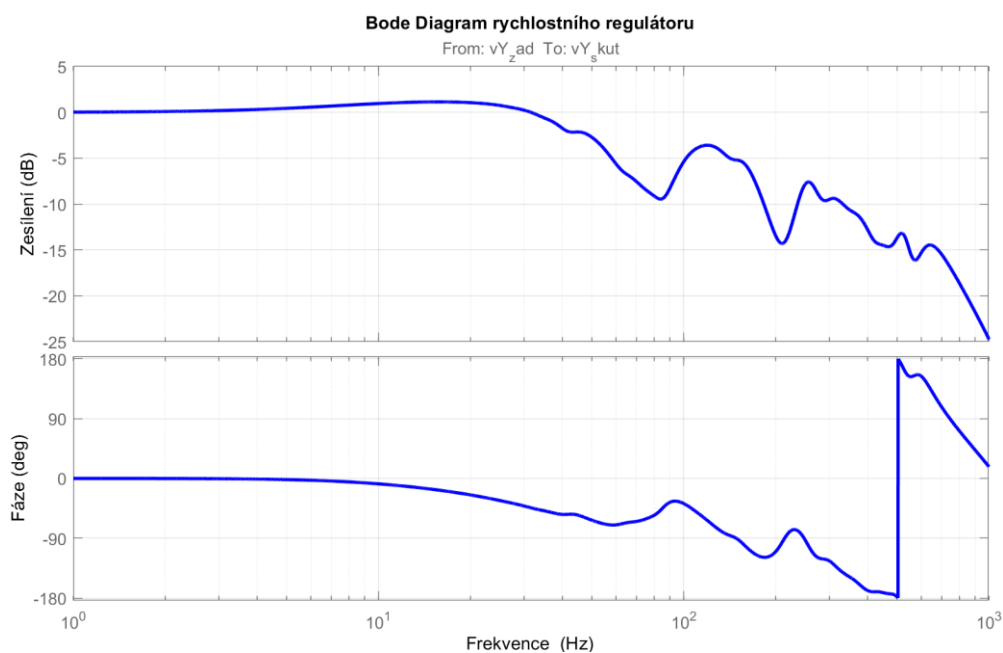
Průběh odezvy na skok rychlosti v ose X1 je na Obr. 49. Průběh odezvy v ose X2 byl téměř stejný.



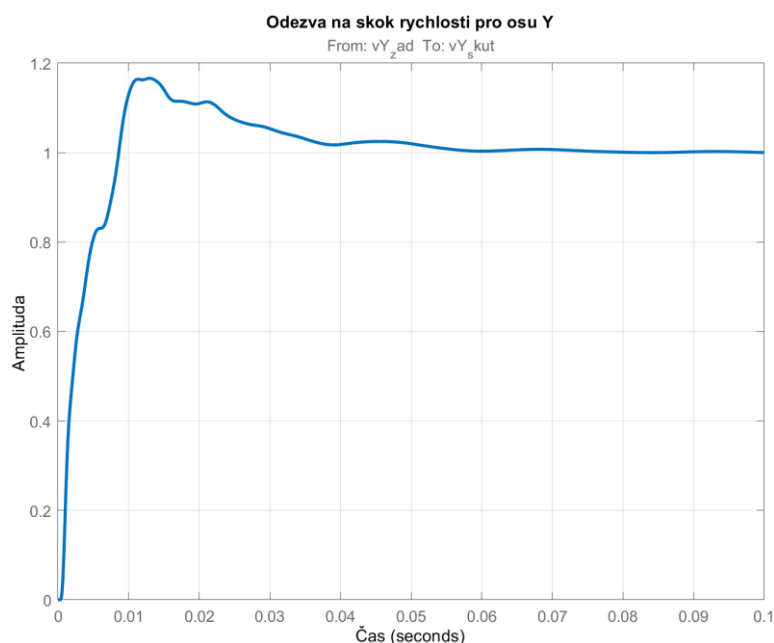
Obr. 49 Odezva na skok rychlosti v ose X

Nastavení rychlostního regulátoru splňují veškerá kritéria analýz. Regulace os X1, X2 byla jen mírně ovlivněna zapnutím filtrů. Volba vyšší hodnoty K_{PV} již vedla k příliš velkému zesílení v přenosu rychlostního regulátoru nad 2 dB a téměř neměla vliv na velikost propustného pásma. Pak již malá změna T_{NV} vedla buď k zakmitání systému, nebo poklesu zesílení v přenosu na příliš malou hodnotu. Při ladění osy Y filtry měly vyšší dopad na kvalitu regulace.

Výsledná amplitudově-fázová frekvenční charakteristika pro osu Y je na Obr. 50, a odezva na skok rychlosti na Obr. 51.



Obr. 50 Amplitudově-fázová frekvenční charakteristika osy Y



Obr. 51 Odezva na skok rychlosti v ose Y

Výsledné parametry rychlostních regulátorů jsou v Tab. 5.

Tab. 5 Parametry rychlostních regulátorů

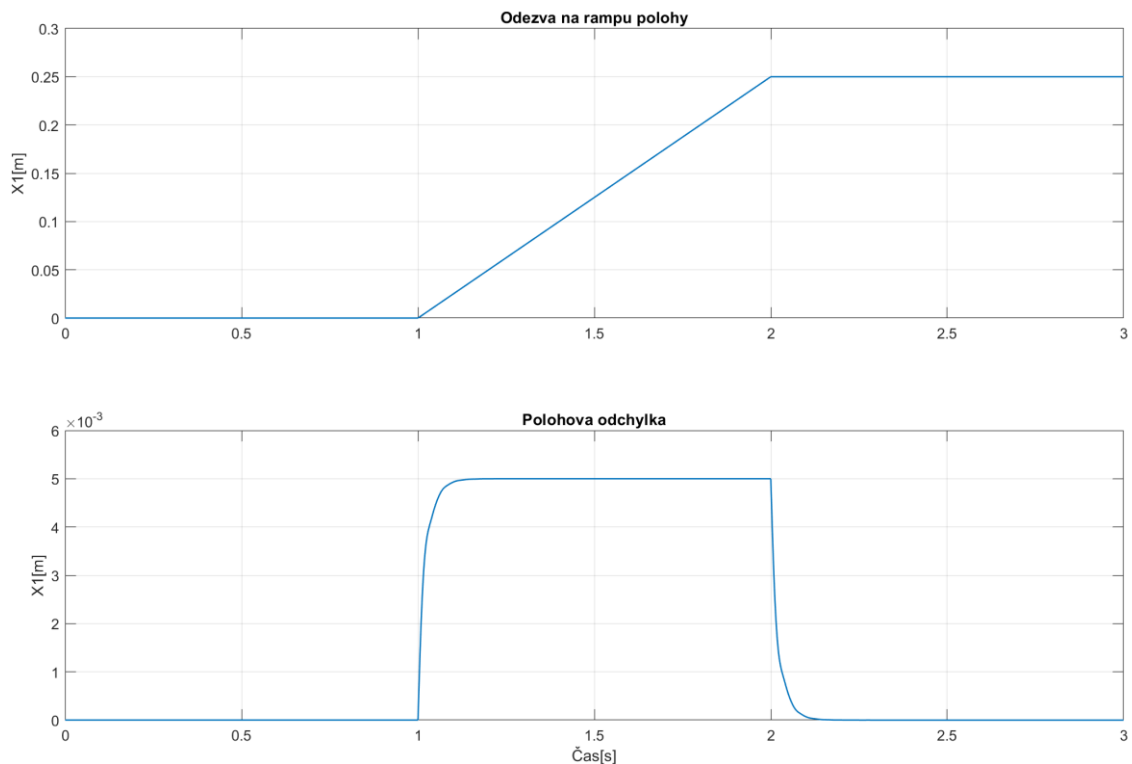
Parametr	Značka	Jednotky	Osy X1, X2	Osa Y
Proporcionální zesílení	K_{pv}	[s]	140	190
Časová integrační konstanta	T_{ni}	[s]	0,01	0,018
Propustné pásmo	PP	[Hz]	35	51,2
Překmit odezvy na skok		[%]	21	16
Maximální zesílení		[dB]	1,9	2

5.3 Polohová regulace a její ladění

Pro ladění polohové regulace je použit vstupní signál rampy polohy. Uvažovala se běžná hodnota rychlostí řezání pro laserové stroje poskytnuta výrobcem, která je 15 m/min.

Rampa polohy pak byla vymodelována tak, aby start nastal v čase 1 sekunda a zastavení v čase simulace 2 sekundy. Zbýlý čas činil 1 sekundu a je uvažován pro případné dokmitání systému po zastavení. Průběh polohové odchylky byl měl být hladký a nezakmitávaný.

Výsledný průběh rampy polohy a pólové regulační odchylky v ose X1 je na Obr. 52. Podobný průběh byl dosažen pro další dvě řízené osy.



Obr. 52 Odezva na rampu polohy

Výsledné hodnoty zesílení pro jednotlivé osy jsou Tab. 6

Tab. 6 Parametry polohového regulátoru

Parametr	Značka	Jednotka	Osy X1, X2	Osa Y
Rychlostní konstanta	Kv	[1/s]	60	75

Dále byly odečteny hodnoty statické tuhosti v uzlu nástroje, po připojení regulace. Toto je běžnou praxí při posuzování statických vlastností strojů pro třískové obrábění, kde nástroj je namáhán řeznými silami, které ovlivňují chování stroje při obrábění. Pro laserové stroje, kde se síly od obrábění nevyskytují, tato charakteristika nepřináší důležité informace k posuzování vlastností stroje. Lze ji však použít jako nástroj pro analýzu přínosu jednotlivých komponent stroje, která bude popsána v kapitole 7. Hodnoty statické tuhosti v místě nástroje referenčního modelu jsou v Tab. 7

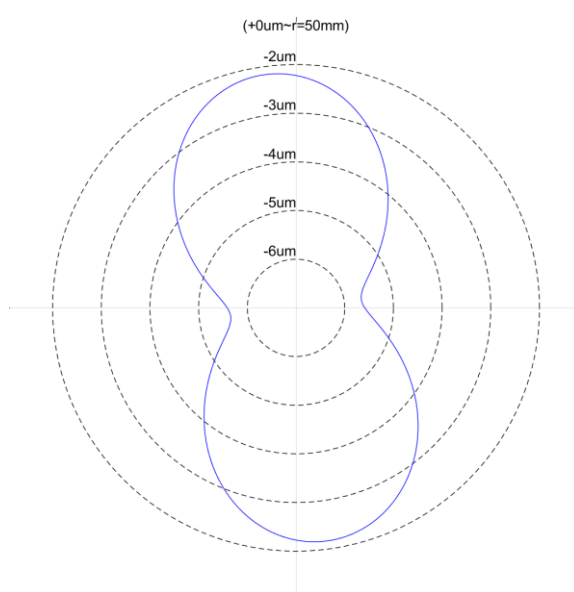
Tab. 7 Statická tuhost

Parametr	Značka	Jednotka	Osa X	Osa Y	Osa Z
Statická tuhost	$Kstat$	[N/ μm]	1,92	5,87	4,22



6. Simulace řízení

K dispozici nebyla dostupná data z interpolátoru reálného řídicího systému, byly však vygenerované signály žádaných poloh pro kruhovou interpolaci s konstantní řeznou rychlostí. Dále byla odečtena odchylka kruhovitosti. Na základě průběhu této odchylky bude provedeno vyhodnocení kvality dráhového řízení pro modelovaný stroj. Byla vygenerovaná dráha pro pojezd kruhovou interpolací na poloměru 50 mm za již zmíněné rychlosti 15 m/min. Výsledná odchylka kruhovitostí je pak na Obr. 53.



Obr. 53 Odchylka kruhovitostí

Z výsledného průběhu jsou patrné minimální odchylky kruhovitosti v řádech 5 mikrometrů. Tyto simulované odchylky od kruhovitosti postrádají typické chyby, které se běžně objevují při měřeních. To je způsobeno zejména neúplností modelu stroje, v němž chybí např. modely pasivních odporů nebo zdroje vibrací. Samotná kruhová interpolaci budí stroj na frekvenci přibližně 1 Hz, a nestačí na vybuzení stroje (dynamická odezva na této frekvenci je velmi kvalitní). Proto není tento test zcela vhodný pro hodnocení kvality dráhového řízení. Lepší test by byl např. řezání tvaru s ostrými rohy (čtverce), pro něj však nejsou k dispozici interpolované signály žádaných poloh.

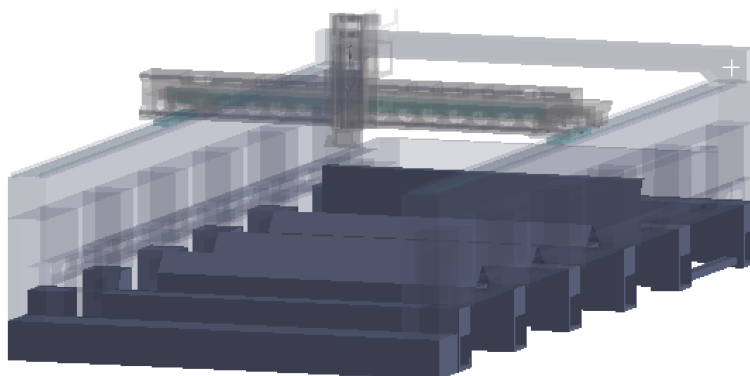


7. Citlivostní analýza

V této kapitole je popsána citlivostní analýza statické a dynamické poddajnosti na tuhosti jednotlivých hlavních dílů nosné konstrukce stroje.

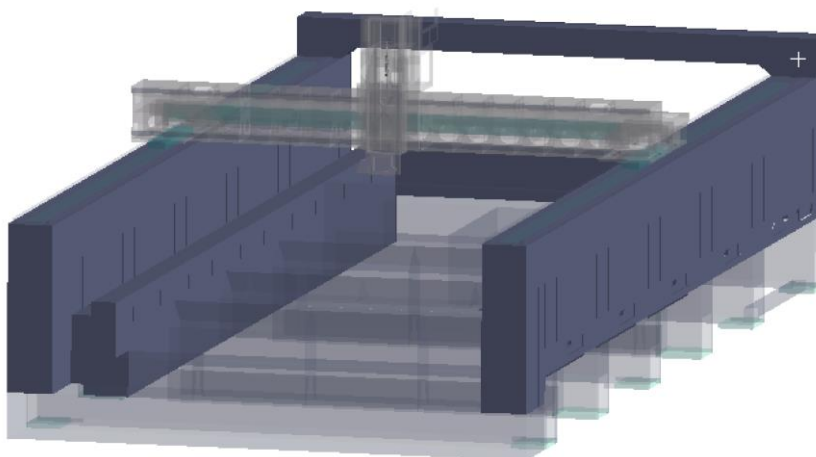
Pro citlivostní analýzu bylo potřeba postupně vyztužit jednotlivé části referenčního modelu a pro každou znovu provést výpočet úlohy modální analýzy. Stejně tak pro každý export výsledku modální analýzy bylo potřeba provést vypuštění vlastních tvarů a popis ve stavovém prostoru. Celkem vznikly čtyři nové modely mechanické stavby stroje:

Model s vyztuženou dolní částí lože označený dále jako *Varianta 1*, vyztužená část znázorněna na Obr. 54



Obr. 54 Vyztužená dolní část lože

Model s vyztuženou horní částí lože označený dále jako *Varianta 2* viz Obr. 55



Obr. 55 Vyztužená horní část lože

Model s vyztuženým příčným nosníkem označený dále jako *Varianta 3*

Model s vyztuženým supportem označený dále jako *Varianta 4*



Pro každý nový model bylo provedeno propojení s modelem regulace, kde bylo provedeno ladění parametru rychlostní a polohové regulace, včetně implementace proudových filtrů. Dosažené parametry regulace pro všechny výpočetní varianty jsou v Tab. 8

Tab. 8 Dosažené parametry regulace pro citlivostní analýzu.

Model	Referenční		Varianta 1		Varianta 2		Varianta 3		Varianta 4	
Parametr/Osa	X1 X2	Y	X1 X2	Y	X1 X2	Y	X1 X2	Y	X1 X2	Y
Kpv [1/s]	140	190	280	220	360	180	600	250	300	500
Tnv [s]	0,01	0,018	0,009	0,01	0,014	0,011	0,015	0,011	0,01	0,009
PP [Hz]	37	52,3	41	79	40	78	43,7	62,2	33	55,4
$Prekmit$ [%]	1,97	1,82	1,85	1,63	2	1,4	1,3	1,95	1,9	1,61
$Maximální zesílení$ [dB]	22	24	15	16	18	14	20	17	18	24
Kv [1/s]	50	60	80	110	80	100	100	120	60	75

Dále jsou v Tab. 9 vypočtené hodnoty statické tuhosti v místě nástroje.

Tab. 9 Hodnoty statické tuhosti výpočetních variant

Statická tuhost v místě nástroje K_{stat} [N/ μ m]			
Směr	«X»	«Y»	«Z»
Referenční varianta	1,92	5,87	4,22
Varianta 1	4,08	65,72	4,8
Varianta 2	1,79	57,3	5,1
Varianta 3	2,13	12,76	24,67
Varianta 4	4,86	9,5	4,66

Nakonec v Tab. 10 jsou maximální a minimální hodnoty odchylky kruhovitosti stroje, odečtené z průběhu simulací kruhové interpolace.

Tab. 10 Odchylky kruhovitosti výpočetních variant

Odchylka kruhovitosti ΔR [μ m]					
Model	Referenční varianta	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3	Varianta 4
Maximální hodnota	-1,7	-0,9	0,2	1,2	-4
Minimalní hodnota	-5,2	-10,5	-4,5	-0,5	-8,5



7.1 Vyhodnocení

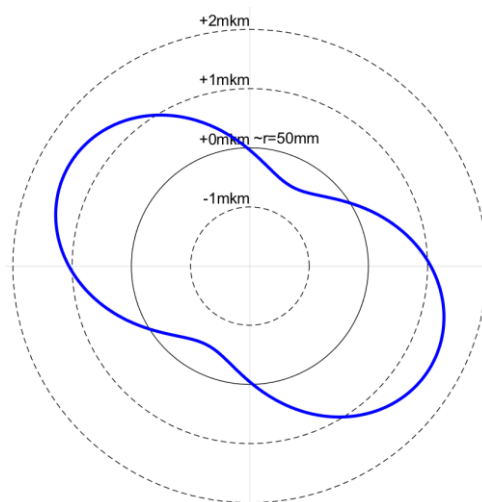
Analýza přínosu jednotlivých komponent bude provedena pomocí těchto kritérií:

- Přesnost dráhového řízení při simulace kruhové interpolace
- Maximální dosažené hodnoty propustného pásma rychlostního regulátoru
- Maximální dosažené hodnoty rychlostní konstanty polohového regulátoru
- Statická tuhost v místě nástroje

Přesnost dráhového řízení při simulace kruhové interpolace je z hlediska uživatele často kritériem, který má největší význam. Proto byla tato přesnost použita jako základní kritérium hodnocení jednotlivých variant.

Byl graficky posouzen průběh odchyly kruhovitosti, ten byl tvarově velice podobný pro všechny varianty. Varianta 3 vykazovala jak maximální, tak i minimální hodnotu odchyly od kruhovitosti nejbliž nule (viz Tab. 9).

Podle tohoto kritéria byla za nejlepší variantu zvolena Varianta 3. Průběh její odchyly kruhovitosti je na Obr. 56



Obr. 56 Nejmenší odchyly kruhovitosti při vyztuženým supportu

Toto hodnocení však není plně vypovídající, protože určení skutečných drah při kruhové interpolaci je zatíženo značnou nepřesností popsanou v kapitole 6. Proto bylo pro vyhodnocení použito i několik dalších kritérií.

Jako první z nich bylo provedeno porovnání výpočetních variant vůči referenční podle velikosti propustného pásma rychlostního regulátoru. Výsledné hodnoty pro vyhodnocení variant je v Tab. 11



Tab. 11 Porovnaní výpočetních a referenčních variant dle velikosti propustného pásma

Rozdíl mezi výpočetním a referenčním modelem [%]				
Model	Varianta 1	Varianta 2	Varianta3	Varianta 4
Osy X1, X2	10,8	8,1	16	-11
Osa Y	51	49	18,9	5,9

Z tabulky je vidět, že nejhorší změna propustného pásma rychlostního regulátoru byla u Varianty 4, kde dokonce došlo k zmenšení propustného pásma v osách X1, X2.

Mezi Variantami 1 a 2 je minimální rozdíl, a lze je vyhodnotit jako značné zlepšení pro osu Y, kde došlo k zvětšení propustného pásma až o 50 %

Pro osu X je nejlepší Varianta 3, kde bylo dosaženo nárůstu 16 % vůči referenční variantě.

Stejným způsobem byly porovnány varianty dle kritéria největší hodnoty rychlostní konstanty polohového regulátoru. Hodnoty pro vyhodnocení jsou v Tab. 12

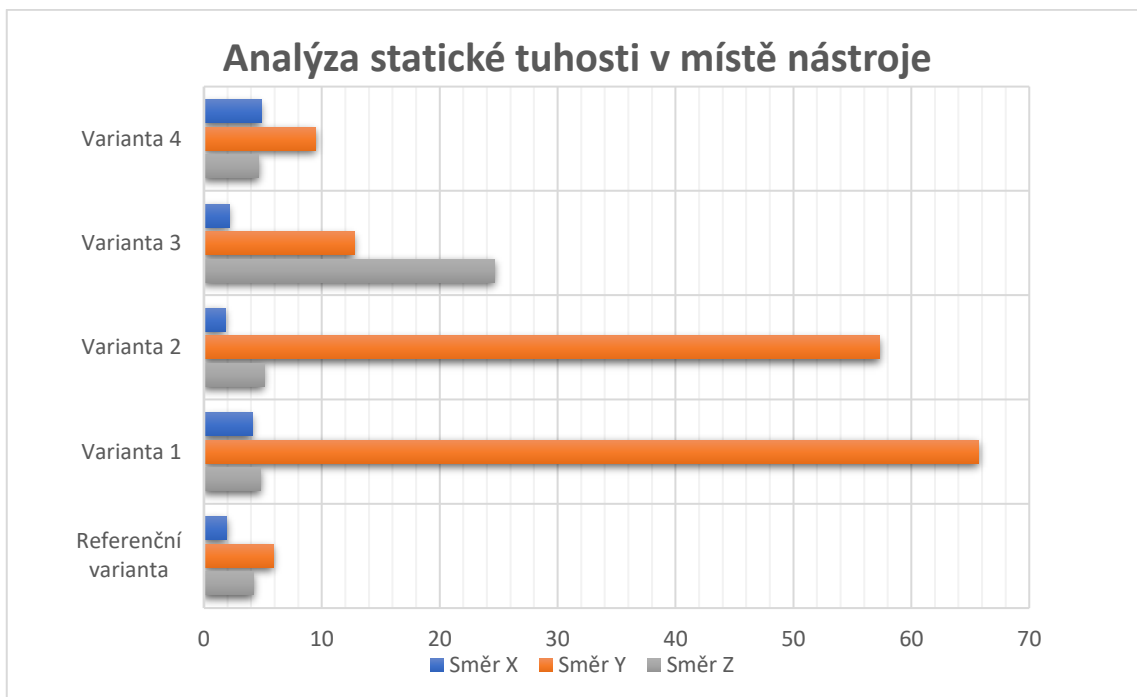
Tab. 12 Porovnaní variant podle rychlostní konstanty polohových regulátoru

Rozdíl mezi výpočetním a referenčním modelem [%]				
Model	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3	Varianta 4
Osy X1, X2	60	60	100	20
Osa Y	83	66	100	25

Zde je vidět, že se pro všechny varianty dopadlo dosáhnout větší hodnoty zesílení polohového regulátoru. Nejmenší dopad měla Varianta 4. Varianty 1 a Varianta 2 dopadli podobně v osách X1, X2, pro osu Y dosáhla Varianta 1 lepšího výsledku.

Nejlepší Variantou však byla Varianta 3, kde pro obě osy bylo dosaženo dvojnásobných hodnot rychlostní konstanty.

Analýza statické tuhosti v místě nástroje pro strojní osy je kritériem s nejmenší vahou při vyhodnocení dopadu na regulaci. Graf statické tuhosti v místě nástroje pro strojní osy X, Y, Z je na Obr. 57.



Obr. 57 Graf pro porovnání statické tuhosti

Hodnoty pro vyhodnocení podle statické tuhosti jsou v Tab. 12

Tab. 13 Porovnání variant podle statické tuhosti v místě nástroje

Rozdíl mezi výpočetním a referenčním modelem [%]				
Osy	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3	Varianta 4
X	212,50	93,23	110,94	253,13
Y	1119,59	976,15	217,38	161,84
Z	113,74	120,85	584,60	110,43

Z grafu je opět patrná podobnost Variant 1 a 2. Obě varianty tak měly velký nárůst statické tuhosti ve směru Y stroje, avšak neměly výrazný vliv na statickou tuhost v jiných směrech. Pro statickou tuhost v ose Z byla nejlepší varianta s vyztuženým s příčnickem. Zlepšení statické tuhosti oproti referenční variantě ve všech třech strojových osách bylo dosaženo u Varianty 3. Která byla vyhodnocena podle toho kritéria jako nejlepší.

Při vyhodnocení podle všech čtyř kritérií současně byla zvolena nejlepší Varianta 3, tedy varianta, kde byl vyztužen příčnick. Vyztužení příčnicku tak má největší potenciál na zlepšení vlastností stroje a jeho regulace (zvláště pokud se jako problémová projeví osa X). Případné úpravy konstrukce by se měly zaměřit právě na tento díl. Dalším doporučením je možné vyztužení konstrukce lože (Varianta 1 a 2), především pokud se jako problémová projeví osa Y.



8. Závěr

Tato diplomová práce se zabývala tvorbou virtuálního modelu stroje propojením modelů nosné struktury, pohonů a regulace. Tento model byl pak použit pro analýzu statických a modálních vlastností stroje.

Byla vypracována rešerše nabídky laserových palicích strojů pro 2D řezání od firmy Vanad a konkurenčních výrobců. Byla určena společná konstrukční provedení a komponenty. V druhé části rešerše byly zpracovány současné postupy a metody virtuálního modelování strojů a obrábění. Tak byly probrány teoretické základy modelování mechanické stavby stroje a pohonu metodou konečných prvků s využitím modální analýzy pro určení dynamických vlastností stroje. Dál byly probrány základy regulace a možnosti simulace dráhového řízení.

V praktické části byly teoretické dovednosti z rešeršní části použity pro stanovení postupu tvorby propojeného modelu laserového palicího stroje Vanad Kompakt laser. Tak byl vytvořen model nosné struktury stroje a pohonu s hybridní sítí, tento model byl podroben numerické modální analýze. Exportované výsledky modální analýzy byly použity při popisu dynamických vlastností ve stavovém prostoru. Tento model byl následně propojen s modelem kaskádní regulace. Výsledný model byl použit pro simulace možnosti nastavení pohonu a analýzu statických a dynamických vlastností stroje. Byly určeny hraniční hodnoty nastavení parametrů regulace, kde byla regulace posouzena jako vhodně naladěná. Byla provedena simulace dráhového řízení pomocí kruhové interpolace. Dosažené parametry regulace lze doporučit jako výchozí při ladění regulace na reálném stroji a jsou prvním přínosem této práce.

V rámci hodnocení statických a dynamických vlastností modelu stroje byla provedena analýza citlivosti těchto parametrů na tuhost jednotlivých částí stroje. Výše popsany výsledný model byl použit jako referenční. Stejným postupem byly vytvořeny další čtyři modely s určitou částí vyztuženou. Výsledky těchto analýz ukazují, že případné vyztužení příčnicku stroje má největší potenciál ke zlepšení jak nastavení regulace, tak i výsledné kvality dráhového řízení.



Seznam literatury

- [1] Řezání tenkých plechů vláknovým laserem. MMspektrum: MM [online]. 2011, 2011(110416), 1 [cit. 2020-10-01]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/rezani-tenkych-plechu-vlaknovym-laserem.html>
- [2] KATALOGOVÝ LIST: LASEROVÝ ŘEZACÍ STROJ Vanad KOMPAKT Laser. In: Vanad [online]. Golčův Jeníkov: Vanad, 2020 [cit. 2020-10-01]. Dostupné z: https://vanad.cz/public/dokumenty/cs_ke-stazeni/Vanad-Lasers-cz---web.pdf
- [3] TruLaser 1030 fiber. Trumpf [online]. .: ., 2020 [cit. 2020-10-01]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/stroje-systemy/2d-laserove-rezaci-stroje/trulaser-1030-fiber/
- [4] Brožura Lynx FL. In: Newtech [online]. www.newtech.cz: www.newtech.cz, 2018 [cit. 2020-10-01]. Dostupné z: <https://www.newtech.cz/files/produkty/LYNX-FL/brozura-Lynx-2018-eng.pdf>
- [5] Official catalogue Eagle. In: Eagle-group.eu [online]. Wałcz: Eagle-group, 2020 [cit. 2020-10-01]. Dostupné z: <https://eagle-group.eu/files/eagle/download/catalogs/EAGLE%20official%20brochure%202020.pdf>
- [6] Nukon NF Pro. Nukon [online]. .: ., 2019 [cit. 2020-10-01]. Dostupné z: <https://www.nukon.com.tr/nf-pro-s92.html?lang=en>
- [7] Fiber laser cutting machines Bodor: P SERIES. Bodor [online]. .: ., 2020 [cit. 2020-10-01]. Dostupné z: <https://www.bodor.com/en/fiber-laser-cutting-machine/fiber-laser-metal-sheet-cutting-machines/p.html>
- [8] CNC LASERY: Laser GA. GWEIKE laser [online]. .: ., 2020 [cit. 2020-10-01]. Dostupné z: <https://www.cnc-laser.cz/laser-ga.html>
- [9] CNC LASER RAPTOR. Raptor-Cnc [online]. .: . [cit. 2020]. Dostupné z: <https://www.raptor-cnc.com/cnc-laser.html>
- [10] HAVALA, Jakub. DESIGN LASEROVÉHO ŘEZACÍHO STROJE [online]. Brno, 2018 [cit. 01.10.2020]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=193732. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VUT V BRNĚ.



- [11] MAREK, Jiří a Petr BLECHA. Konstrukce CNC obráběcích strojů. Vyd. 2., přeprac. a rozš. Praha: MM Publishing, 2010. MM speciál. ISBN 978-80-254-7980-3.
- [12] Linear guides. In: Bosch Rexroth [online]. Česká Republika: Bosch Rexroth, 2020 [cit. 2020-10-01]. Dostupné z: <https://www.boschrexroth.com/cs/cz/produkty/skupiny-produktu/linearni-technika/linear-guides#>
- [13] Kompletní systém HPLS. In: E-konstrukter [online]. e-konstrukter.cz: e-konstrukter.cz, 2017 [cit. 2020-10-01]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/files/gallery/wittenstein-alpha.png>
- [14] Loziskove-jednotky-na-podporu-kulickovych-sroubu. In: Coroll [online]. .: ., . [cit. .]. Dostupné z: https://www.coroll.cz/files/kulickove_srouby/332-loziskove-jednotky-na-podporu-kulickovych-sroubu.jpg
- [15] TL Series Iron Core. In: Www.tecnotion.com [Katalog]. tecnotion: tecnotion, 2020 [cit. 2020-10-01]. Dostupné z: <https://www.tecnotion.com/products/iron-core/tl-series.html>
- [16] KOLAR, Petr, Matej SULITKA, Vojtech MATYSKA a Petr FOJTU. OPTIMIZATION OF FIVE-AXIS FINISH MILLING USING A VIRTUAL MACHINE TOOL. MM Science Journal [online]. 2019, 2019(05), 3534-3543 [cit. 2020-12-09]. ISSN 18031269. Dostupné z: doi:10.17973/MMSJ.2019_12_2019037
- [17] Linear (G1) and native B-Spline interpolation. In: Researchgate [online]. researchgate: researchgate, 2014 [cit. 2020-10-01]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Linear-G1-and-native-B-Spline-interpolation_fig1_265683695
- [18] Závěrečná zpráva projektu 1.4.3 za rok 2009: V-09-052. Praha, 2009. Závěrečná práce projektu. ČVUT v Praze.
- [19] Cesty ke zvýšení efektivnosti navrhování obráběcích strojů. Technický týdeník [online]. 2015, 2015(2015), 1 [cit. 2020-10-01]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/ze-zivota-vyzkumneho-centra/cesty-ke-zvyseni-efektivnosti-navrhovani-obrabecich-stroju-1_32373.html



- [20] ŠPANIEL, Miroslav a Zdeněk HORÁK. Úvod do metody konečných prvků. V Praze: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-01-04665-4.
- [21] Common Types of Mesh. In: Ansys. [online]. ansys: ansys, 2020 [cit. 2020-10-01]. Dostupné z: <https://www.ansys.com/products/platform/ansys-meshing>
- [22] SULITKA, Matěj a Petr KOLÁŘ. Modelování strojů a jejich uzlů metodou konečných prvků: Úvod a preprocessing úlohy. RCMT, 2017.
- [23] ANSYS Mechanical APDL Element Reference [online]. [cit. 2021-01-05].
- [24] MATYSKA, Vojtěch. Pohony výrobních strojů – servomechanismy II: Výukové materiály RCMT. Praha, 2018.
- [25] Závěrečná práce projektu 1.4.3 [online]. 2007 [cit. 2020-10-01]. Závěrečná práce projektu. ČVUT v Praze.
- [26] SOUČEK, Pavel. Pohony výrobních zařízení: servomechanismy. Dot. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-010-1159-3.
- [27] SOUČEK, Pavel. Servomechanismy ve výrobních strojích. Vydavatelství ČVUT 2004,. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-010-2902-6.
- [28] JIŘÍ, Šveda. Pohony výrobních strojů – servomechanismy III.: Výukové materiály RCMT. Praha, 2020.
- [29] 3D simulation to sheet metal cutting heat processes with BeroSim. In: Lantek [online]. Lantek: Lantek, 2018 [cit. 2020-10-01]. Dostupné z: <https://www.lantek.com/ca/news/lantek-and-vicomtech-bring-interactive-3d-simulation-to-sheet-metal-cutting-heat-processes-with-berosim>

Seznam obrázků

Obr. 1 Stroj Kompakt laser [2].....	14
Obr. 2 Varianty provedení roštů [2]	14
Obr. 3 Miron laser [2]	15
Obr. 4 TruLaser 1030 fiber [3]	16
Obr. 5 LYNX FL [4]	16
Obr. 6 Konstrukční uspořádání laserových strojů [10]	18
Obr. 7 Lineární vedení [12]	20
Obr. 8 Pohon s převodovkou a vloženým převodem s pastorkem s hřebenem [13]	21



Obr. 9 Kuličkový šroub 1, kuličková matice 2 a domečky ložisek kuličkového šroubu 3 [14].....	22
Obr. 10 Lineární motor [15].....	23
Obr. 11 Užité vlastnosti strojů	24
Obr. 12 Řetězec virtuálního a reálného obrábění.....	25
Obr. 13 Úrovně virtuálního modelování	26
Obr. 14 Tolerance dráhy pojezdu nástroje [17].....	27
Obr. 15 MKP uzly [21].....	31
Obr. 16 Vlastní tvary stroje	34
Obr. 17 Přenosová funkce dynamické poddajnosti	35
Obr. 18 Význam jednotlivých modů	36
Obr. 19 Schéma kaskádní regulace.....	37
Obr. 20 Bode diagram rychlostní smyčky.....	39
Obr. 21 Filtr typu dolní propust.....	40
Obr. 22 Strojové parametry filtru pásmová zádrž	41
Obr. 23 Rychlostní feedforward	42
Obr. 24 Schéma řízení Master-Slave	43
Obr. 25 Schéma řízení Gantry	43
Obr. 26 Simulace v <i>Berosim</i> [29].....	44
Obr. 27 Schéma tvorby MKP modelu	45
Obr. 28 Schematické zobrazení stroje a os.....	46
Obr. 29 Ukázka tvorby plošného modelu	47
Obr. 30 Modelování plosných těles na vnějšek	48
Obr. 31 Výsledný geometrický model.....	48
Obr. 32 Podpěra a MPC rovnice v místě plošného tělesa.....	49
Obr. 33 MPC vazby kolejnic.....	50
Obr. 34 Pevná vazba pro náhradu uložení.....	50
Obr. 35 Náhrada pohonu osy Z	51
Obr. 36 Model supportu	52
Obr. 37 Souradnicový systém vozíku lineárního vedení.....	53
Obr. 38 Submodel vozíku.....	54
Obr. 39 Prvek Matrix27.....	54
Obr. 40 Uzly nástroje a stolu.....	56
Obr. 41 Model s vytvořenou MKP sítí.....	57
Obr. 42 Vlastní tvar	57
Obr. 43 Významný vlastní tvar	58
Obr. 44 Vlastní tvar k vypuštění.....	59
Obr. 45 Schéma modelu os X1, X2, Y	60
Obr. 46 Proudová smyčka pro osy X1, X2, Y	62
Obr. 47 Proces ladění rychlostní regulace,	63
Obr. 48 Amplitudově-fázová frekvenční charakteristika osy X1	64
Obr. 49 Odezva na skok rychlosti v ose X.....	65



Obr. 50 Amplitudově-fázová frekvenční charakteristika osy Y	65
Obr. 51 Odezva na skok rychlosti v ose Y	66
Obr. 52 Odezva na rampu polohy	67
Obr. 53 Odchylka kruhovitostí	68
Obr. 54 Vyztužená dolní část lože	69
Obr. 55 Vyztužená horní část lože	69
Obr. 56 Nejmenší odchylka kruhovitosti při vyztuženém supportu	71
Obr. 57 Graf pro porovnání statické tuhosti	73

Seznam tabulek

Tab. 1 Náhradní tuhosti vozíku lineárního vedení	53
Tab. 2 Materiálové parametry modelu	55
Tab. 3 Parametry pro náhradu proudové regulace	61
Tab. 4 Parametry filtrů	64
Tab. 5 Parametry rychlostních regulátorů	66
Tab. 6 Parametry polohového regulátoru	67
Tab. 7 Statická tuhost	67
Tab. 8 Dosažené parametry regulace pro citlivostní analýzu	70
Tab. 9 Hodnoty statické tuhosti výpočetních variant	70
Tab. 10 Odchylky kruhovitosti výpočetních variant	70
Tab. 11 Porovnání výpočetních a referenčních variant dle velikosti propustného pásma	72
Tab. 12 Porovnání variant podle rychlostní konstanty polohových regulátoru	72
Tab. 13 Porovnání variant podle statické tuhosti v místě nástroje	73

Seznam použitého softwaru

ANSYS Workbench 2020 R2

Matlab R2020b

Microsoft Office 365

Siemens NX 12

Draw io



Seznam textových a grafických příloh

Příloha 1: Schéma propojeného modelu vytvořené v prostředí Simulink

Příloha 2: Spouštěcí skript pro připojení regulace a odečet statické tuhosti

Příloha 3: Spouštěcí skript pro simulace rampy polohy a kruhové interpolace

Seznam elektronických přílohy (CD)

Text diplomové práce v PDF:

F2-DP-2021-Kosenko-Alexander-Kosenko__text__DP.pdf

Zadaní diplomové práce v PDF:

F2-DP-2021-Kosenko-Alexander-priloha-Kosenko__zadani.pdf

Propojený model stroje v Simulinku:

F2-DP-2021-Kosenko-Alexander-priloha-Vanad__regulace.slx

Spouštěcí skript pro připojení regulace a odečet statické tuhosti v Matlabu:

F2-DP-2021-Kosenko-Alexander-priloha-Regulace__sestaveni.m

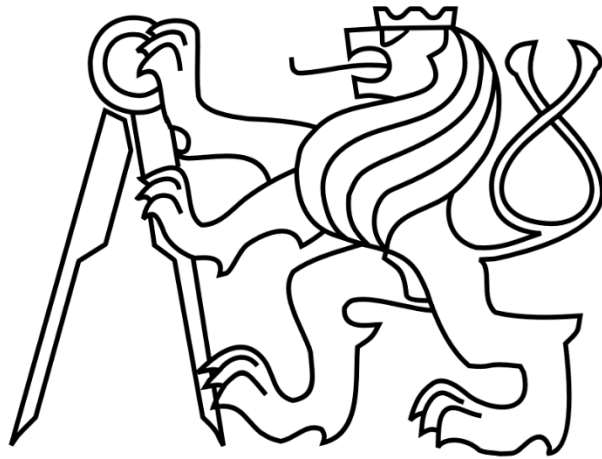
Spouštěcí skript pro simulace rampy polohy a kruhové interpolace v Matlabu:

F2-DP-2021-Kosenko-Alexander-priloha-Simulace__rizeni.m

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení

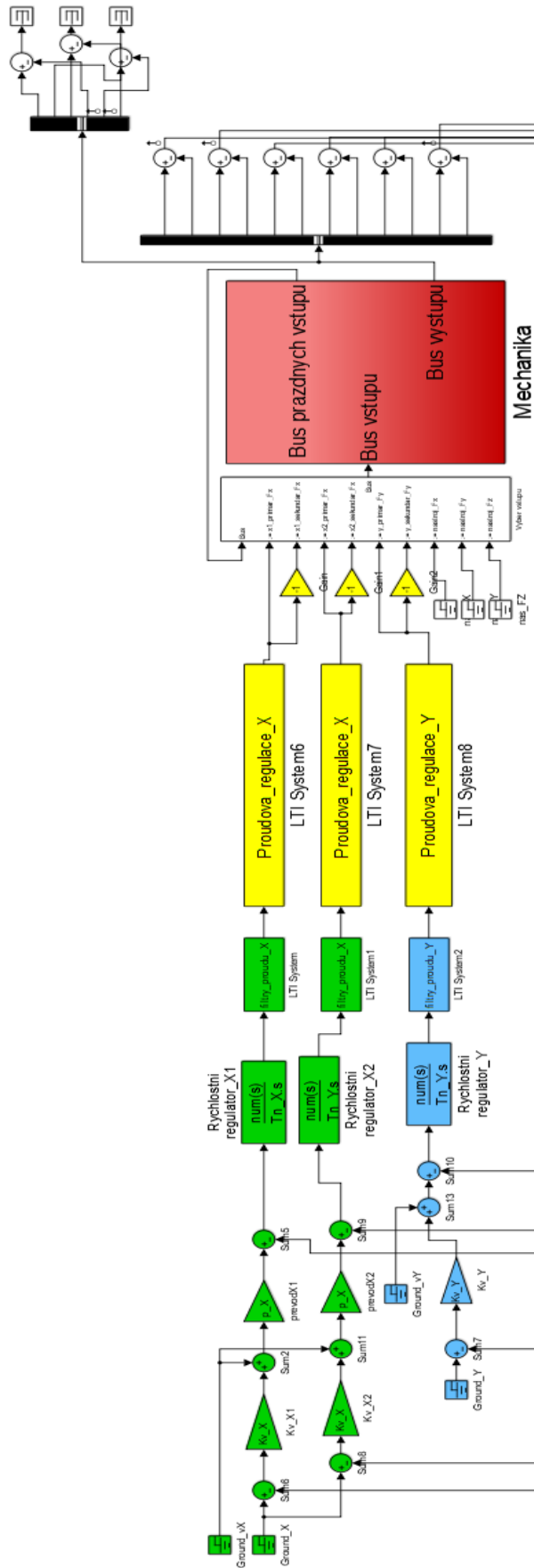


Diplomová práce

Virtuální model laserového stroje a analýza jeho vlastností

TEXTOVÉ PŘÍLOHY

Příloha 1: Schéma propojeného modelu vytvořené v prostředí Simulink



Příloha 2: Spouštěcí skript pro připojení regulace a odečet statické tuhosti

Skript je pro referenční variantu modelu.

```
clc;
clear;
load('Vanad_laser_vychozi_SS.mat')
A=ABCDlti_skup.a;
A(174:end,174:end)=A(174:end,174:end)/10*10;
ABCDlti_skup.a=A;

%% pripojeni regulace
omP_X = 1000;      % [Hz] frekvence pro nahradni prenos proudove
smycky
PWM_X = 5000;     % [Hz] PWM
To_X = 1/PWM_X;
Kp_X = 140;      % [As/rad] proporcionalni zesileni rychl. reg.
Tn_X = 0.01;    % [s] casova integracni konstanta rychl. reg.
Kv_X = 50;      % [1/s] proporcionalni zesileni pol. reg.
p_X=1; % =p_b/1L_N [rad/m] prevod z rychlosti merene na pravitku na
rychlost motoru
kM_X=93; %
omP_Y = 1000;    % [Hz] frekvence pro nahradni prenos proud.s
PWM_Y = 5000;   % [Hz] PWM
To_Y = 1/PWM_Y;
Kp_Y = 190;     % proporcionalni zesileni rychl. reg.
Tn_Y = 0.018;  % [s] casova integracni konstanta rychl. reg.
Kv_Y = 60;     % [1/s] proporcionalni zesileni pol. reg.
kM_Y=93; %Motorova konst
% Filtry
% osa X1
Aktivni_X=[0 1 1 1 1 0];
Typ_X=[1 2 2 2 2 2];
char_freq_X=[ 560 527 490 350 180 1000];
sirka_X=[0.7 120 100 50 100 1000];
redukce_X=[0 0 0 0 0 0 0];
propad_X=[-1 -5 -3 -5 -8 -1];
% % osa Y
Aktivni_Y=[0 1 1 1 1 0]
%Aktivni_Y=[0 1 1 1 1 0];
Typ_Y=[1 2 2 2 2];
char_freq_Y=[800 360 430 206 1000];
sirka_Y=[0.7 200 100 100 3000];
redukce_Y=[0 0 0 0 0];
propad_Y=[-9 -8 -3 -3 -5];

%% prenosove funkce
[Proudova_regulace_X,filtry_proudu_X]=...
TF_regI(kM_X,omP_X,To_X,Aktivni_X,Typ_X,char_freq_X,sirka_X,redukce_X,
propad_X);
[Proudova_regulace_Y,filtry_proudu_Y]=...
TF_regI(kM_Y,omP_Y,To_Y,Aktivni_Y,Typ_Y,char_freq_Y,sirka_Y,redukce_Y,
propad_Y);
model = 'Vanad_regulace'
```

```

switch 2
case 1 % polohova regulace
ios(10) = linio([model '/Sum7'],1,'out');
ios(9) = linio([model '/Sum8'],1,'out');
ios(8) = linio([model '/Sum6'],1,'out');
ios(7) = linio([model '/Sum18'],1,'out');
ios(6) = linio([model '/Sum17'],1,'out');
ios(5) = linio([model '/Sum16'],1,'out');

ios(4) = linio([model '/Ground_vY'],1,'in');
ios(3) = linio([model '/Ground_vX'],1,'in');
ios(2) = linio([model '/Ground_Y'],1,'in');
ios(1) = linio([model '/Ground_X'],1,'in');

opt=linoptions; % Vytvori objekt s nastavenim linearizace
set(opt,'UseExactDelayModel','on') ;
sys = linearize(model,ios,opt);

    sys.OutputName={'X_nastroj'
        'Y_nastroj'
        'Z_nastroj'
        'DeltaX1'
        'DeltaX2'
        'DeltaY'
    };
    sys.InputName={'X_zad'
        'Y_zad'
        'vX_zad'
        'vY_zad'
    };

    save('Vanad_PolReg','sys');
case 2 % rychlostni regulace
% vyrazeni polohove vazby
p_X=0; % [] prevod z rychlosti
p_Y=0; % [rad/m] prevod z rychlosti

ios(6) = linio([model '/Sum15'],1,'out');
ios(5) = linio([model '/Sum14'],1,'out');
ios(4) = linio([model '/Sum12'],1,'out');
ios(3) = linio([model '/Sum13'],1,'in','on');
ios(2) = linio([model '/prevodX2'],1,'in','on');
ios(1) = linio([model '/prevodX1'],1,'in','on');

opt=linoptions; % Vytvori objekt s nastavenim linearizace
set(opt,'UseExactDelayModel','on') ;
sys = linearize(model,ios,opt);

sys.OutputName={'vX1_skut';'vX2_skut';'vY_skut'};
sys.InputName={'vX1_zad';'vX2_zad';'vY_zad'};
pom=ss([1;1]);
pom.InputName={'vX12_zad'}; %%%
pom.OutputName={'vX1_zad';'vX2_zad'};

sys=connect(sys,pom,{'vX12_zad';'vY_zad'},{'vX1_skut';'vX2_skut';'vY_
skut'})
save('Vanad_rych_rizi','sys');

```

```

case 3
ios(6) = linio([model '/Sum18'],1,'out');
ios(5) = linio([model '/Sum17'],1,'out');
ios(4) = linio([model '/Sum16'],1,'out');
ios(3) = linio([model '/nas_FZ'],1,'in');
ios(2) = linio([model '/nas_FY'],1,'in');
ios(1) = linio([model '/nas_FX'],1,'in');

opt=linoptions; % Vytvori objekt s nastavenim linearizace
set(opt,'UseExactDelayModel','on') ;
sys = linearize(model,ios,opt);

stat_tuhX=1/dcgain(sys(1,1))*1e-6;
stat_tuhY=1/dcgain(sys(2,2))*1e-6;
stat_tuhZ=1/dcgain(sys(3,3))*1e-6; % [N/um];
end;

```

Příloha 3: Spouštěcí skript pro simulace rampy polohy a kruhové interpolace

Skript je pro referenční variantu modelu.

```
clc;

clear;

D=0.1; % [m]

v=15; % [m/min]

v=v/60; % [m/min]
R=D/2;
dt=0.001; % [s]
dx=v*dt;
dfi=dx/R;
fi=(-1*pi):dfi:(3*pi)';
x=R*cos(fi);
y=R*sin(fi);
%% nacteni systemu
load('Vanad_PolReg');
sys=sys({'X_nastroj';'Y_nastroj'},:);
switch 2
case 2 % Kruhova interpolace
    t=(0:(length(x)-1))*dt;
    u=zeros(length(t),4);
    u(:,1)=x-x(1);
    u(:,2)=y-y(1);
    u(:,3)=([0;diff(u(:,1))]+[diff(u(:,1));0])/(t(2)-t(1))/2; % vX
    u(:,4)=([0;diff(u(:,2))]+[diff(u(:,2));0])/(t(2)-t(1))/2; % vY
    simul=lsim(sys,u,t);
    x_nas=(simul(:,1)+x(1));
    y_nas=(simul(:,2)+y(1));
    log_ind=(fi<0)|(fi>(2*pi));
    log_ind=~log_ind;
    ind=1:length(fi);
    ind=ind(log_ind);
    x_nas=(simul((ind(1)-1):(ind(end)+1),1)+x(1));
    y_nas=(simul((ind(1)-1):(ind(end)+1),2)+y(1));
    r_nas=sqrt(x_nas.^2+y_nas.^2);
    dr_nas=r_nas-R;
    fi_nas=atan2(y_nas,x_nas);
    dfi_nas=diff(fi_nas);
    for i=1:length(dfi_nas)
        if abs(dfi_nas(i))>6;
            dfi_nas(i)=dfi_nas(i)-(sign(dfi_nas(i))*2*pi);
        end;
    end;
    fi_nas(:)=cumsum([fi_nas(1);dfi_nas]);
    kruhovitost(fi_nas,dr_nas*1e6,'mkm',[num2str(R*1e3) 'mm'])

case 1 % rampa polohy
    t=(0:0.002:3)';
    v=0.25;
    rampa=t*v-1*v;
    rampa(t<=1)=0;
    rampa(t>=2)=rampa(t==2);
    y=lsim(sys('DeltaX1','X_zad'),rampa,t);
    y1=lsim(sys('DeltaX2','X_zad'),rampa,t);
    y2=lsim(sys('DeltaY','Y_zad'),rampa,t);
end
```