

Úloha rychlostní smyčky při optimalizaci obráběcího stroje s CNC řízením

Function of speed controller loop at optimization of CNC
machine tool

Bc. Pavel Novák

Diplomová práce
2008



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
Ústav automatizace a řídicí techniky
akademický rok: 2007/2008

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Pavel NOVÁK**
Studijní program: **N 3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Automatické řízení a informatika**

Téma práce: **Úloha rychlostní smyčky při optimalizaci obráběcího stroje s CNC řízením**

Zásady pro vypracování:

1. Provedte stručný rozbor rychlostní smyčky obráběcího stroje s CNC řízením
2. Stanovte zásady optimalizace rychlostního regulátoru
3. Provedte měření kmitočtových charakteristik rychlostního regulátoru na reálném stroji
4. Porovnejte měření na strojích s různým stupněm opotřebení
5. Vyhodnoďte výsledky měření a navrhnete potřebná opatření pro využití v praxi

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. H. Gross, J. Hamman, G. Wiegartner: Electrical Feed Drives in Automation, SIEMENS, Publics MCD Corporate Publishing 2001
2. Hans B. Kief: NC/CNC Handbuch 2005/2006, Hanser 2005
3. Schmid a spol.: Řízení a regulace pro strojírenství a mechatroniku, Sobotáles 2005
4. Petr Noskievič: Modelování a identifikace systémů, Montanex a.s. 2001
5. Ivan Švarc: Automatizace – automatické řízení, VUT v Brně 2005
6. Technical manual iTNC530, Heidenhain 2007
7. Siemens SINUMERIK 840D, Description of function -- Basic machine 04-2006

Vedoucí diplomové práce: **doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.**

Ústav elektrotechniky a měření

Datum zadání diplomové práce: **22. února 2008**

Termín odevzdání diplomové práce: **6. června 2008**

Ve Zlíně dne 22. února 2008

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.

děkan



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.

ka ředitel ústavu

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce je srozumitelným způsobem osvětlit úlohu a skladbu rychlostního regulátoru v regulačních obvodech obráběcího stroje a uvést základní pravidla pro optimalizaci jeho parametrů. V teoretické části bude uveden stručný rozbor rychlostní smyčky, popis mechanických komponentů, které ovlivňují vlastnosti regulátoru, a výpočet parametrů. Praktická část se bude opírat především o výsledky měření na reálných strojích. Metody optimalizace parametrů regulátoru zde budou předvedeny na konkrétních příkladech u nových i opotřebených strojů, část měření bude věnována potlačení vlastních frekvencí stroje. Měření byla provedena na strojích řízených systémy Siemens Sinumerik 840D a Heidenhain iTNC530.

Klíčová slova: rychlostní regulátor, proudový regulátor, obráběcí stroj, CNC-Computerized Numerical Control, moment setrvačnosti, motor, amplitudová charakteristika, fázová charakteristika, přechodová charakteristika.

ABSTRACT

The aim of this theses is to explain the role and the structure of the speed controller in machine tools regulation loops and introduce basic rules for optimization of its parameters. The theoretical part presents brief analysis of speed control loop, description of mechanical components affecting the quality of controller and calculation of the parameters. The practical part presents the results of the measurement at the real machine tools. Optimization methods of the controller parameters are presented at particular examples of the new as well as of the worn machine tools, some measurements have been devoted to suppression of resonant oscillations. The measurements were done at machine tools equipped with CNC systems Siemens Sinumerik 840D and Heidenhain iTNC530.

Keywords: speed controller, current controller, machine tool, CNC-Computerized Numerical Control, inertia, motor, amplitude response, phase response, step response.

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu projektu panu Doc.RNDr. Vojtěchu Křesálkovi, CSc., se kterým se velmi dobře spolupracovalo a který mi moc pomohl. Další poděkování patří vedení společnosti Trimill a.s. za podporu při studiu i za pomoc při vypracování diplomové práce. Poděkování si také zaslouží všichni kolegové z práce, kteří průběžně přispívali s užitečnými a podnětnými radami.

Poděkování také patří společnosti Siemens, která ze všech nejlépe poskytuje velmi užitečné a kompletní materiály pro studium problematiky řízení obráběcích strojů.

Prohlašuji, že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků, je-li to uvolněno na základě licenční smlouvy, budu uveden jako spoluautor.

Ve Zlíně

.....
Podpis diplomanta

OBSAH**F**

ÚVOD	8
I TEORETICKÁ ČÁST	9
1 STRUČNÝ ROZBOR RYCHLOSTNÍ SMYČKY	10
1.1 TYPY OBRÁBĚCÍCH FRÉZOVACÍCH STROJŮ.....	10
1.2 POJMY	11
1.3 ZJEDNODUŠENÝ MODEL LINEÁRNÍ OSY	15
1.4 NADŘAZENÁ REGULACE CNC	18
1.5 JEDNOTLIVÉ KOMPONENTY V ŘETĚZCI.....	21
1.5.1 Přehled.....	21
1.5.2 NC systém	21
1.5.3 Motor.....	22
1.5.4 Snímač otáček motoru.....	24
1.5.5 Zátěž	25
1.5.6 Spojka motoru (coupling).....	26
1.5.7 Převody.....	27
1.5.8 Kuličkový šroub	27
1.5.9 Kabelový řetěz.....	28
1.5.10 Suport	29
1.6 BLOKOVÉ SCHÉMA REGULACE.....	29
1.7 VLIV PROUDOVÉHO REGULÁTORU	30
1.8 VAZBA NA POLOHOVÝ REGULÁTOR	30
1.9 DOPŘEDNÉ ŘÍZENÍ (FEEDFORWARD)	30
1.10 VLASTNÍ FREKVENCE STROJE.....	31
1.11 FILTRY RYCHLOSTNÍHO REGULÁTORU	32
2 VÝPOČET PARAMETRŮ RYCHLOSTNÍ SMYČKY	33
2.1 ZRYCHLENÍ A RYV	33
2.2 MOMENT SETRVAČNOSTI.....	35
2.3 PŘÍZPŮSOBNÍ OTÁČEK MOTORU K RYCHLOSTI SUPORTU	36
2.4 POSTUP OPTIMALIZACE NA REÁLNÉM STROJI	37
2.5 VÝPOČET PARAMETRŮ REGULÁTORU - PŘÍKLADY	40
2.6 JEDNOTKY	43
2.7 PARAMETRY RYCHLOSTNÍHO REGULÁTORU – SIEMENS SINUMERIK 840D	43
2.8 PARAMETRY RYCHLOSTNÍHO REGULÁTORU – HEIDENHAIN iTNC530.....	45
2.9 OPTIMALIZACE PARAMETRŮ NA STROJI S VYŠŠÍM STUPNĚM OPOTŘEBENÍ	45
II PRAKTICKÁ ČÁST	47

3	MĚŘENÍ KMITOČTOVÝCH CHARAKTERISTIK NA REÁLNÝCH STROJÍCH.....	48
3.1	MĚŘENÍ LINEÁRNÍ OSY	48
3.2	MĚŘENÍ ROTAČNÍ OSY	51
3.3	MĚŘENÍ STROJE S VYŠŠÍM STUPNĚM OPOTŘEBENÍ.....	54
3.4	VLASTNÍ FREKVENCE STROJE A POUŽITÍ FILTRŮ	56
4	VYHODNOCENÍ	59
4.1	VYHODNOCENÍ ZÁSAD PRO OPTIMALIZACI.....	59
	ZÁVĚR	61
	ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ	62
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	63
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	64
	SEZNAM OBRÁZKŮ	65
	SEZNAM PŘÍLOH.....	67

ÚVOD

Ani v oblasti obráběcích strojů tomu není jinak, než v ostatních oblastech automatizace. Výrobci moderních CNC systémů se předhánějí v kvalitě parametrů CNC systémů. Překotný vývoj počítačové techniky i software tomu jen nahrává a výrobci CNC systémů tak mohou mnohem častěji než dříve pravidelně informovat o dokonalejších regulačních obvodech, o kratších regulačních smyčkách v nově navržených řídicích systémech, o kratší době zpracování cyklu, a tím zaručeně dokonalejším povrchu obrobku nebo rychlejším čase obrábění.

Koncepce nových řídicích systémů je pro výrobce obráběcích strojů pohodlná. Regulátory jsou zpravidla navrženy na plný výkon a pro požadovanou aplikaci mnohdy stačí jen uvolnit softwarovou opci. Řídicí systémy jsou tak univerzální a zvládnou řízení jednoduchých pomalých strojů, stejně ale i dynamických strojů třeba s přímými pohony. K optimálnímu nastavení parametrů je třeba pouze nastavit odpovídající strojní parametry, což ale nemusí být zdaleka jednoduché.

Jedním z parametrů, po kterém se zákazníci kupující obráběcí stroj ptají, je jeho dynamika a pro její popis bývají často hlavními parametry rychlost a zrychlení hlavních os stroje. Je zřejmé, že pro správné chování stroje v celé oblasti provozních parametrů musí být správně nastaveny jeho strojní parametry, protože do vlastností regulované soustavy se výrazně promítá vliv mechanické části stroje.

Rychlostní regulátor jako jeden ze tří základních regulátorů, které se uplatňují v CNC regulaci, je nejvíce ovlivněn skladbou mechanické soustavy a optimální nastavení parametrů je základním krokem pro úspěšné uvedení stroje do provozu. Teorie CNC regulace je na univerzitní úrovni velmi dobře propracována, pro technika uvádějící obráběcí stroj do provozu v omezených časových podmínkách je ale často nesrozumitelná a učebnicové příklady postupu při optimalizaci parametrů praxi zpravidla moc neodpovídají.

Úkolem diplomové práce bude trochu osvětlit problematiku nastavování parametrů rychlostního regulátoru především z praktického hlediska. V teoretické části bude uveden stručný rozbor rychlostní smyčky, pak bude následovat popis souvisejících mechanických komponentů, postup optimalizace základních parametrů regulátoru a několik kapitol bude věnováno vlastním frekvencím stroje. Hlavní náplní bude měření na reálných obráběcích strojích a následné vyvození závěrů pro praxi.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 STRUČNÝ ROZBOR RYCHLOSTNÍ SMYČKY

1.1 Typy obráběcích frézovacích strojů

Poznatky diplomové práce lze zcela jistě aplikovat na celou oblast obráběcích strojů (frézovací stroje, soustruhy, dřevoobráběcí stroje, laserové vypalovačky atd.), měření však byla provedena na frézovacích strojích a práce bude tedy zaměřena do této oblasti. Nejpoužívanější obráběcí frézovací stroje lze dnes v zásadě rozdělit na dvě skupiny. Klasické stroje s pohonem kuličkovým šroubem a převody a dále pak stroje s lineárními pohony. U strojů s pohonem přes kuličkový šroub jsou setrvačnosti, zpoždění a akumulátory energie obsaženy právě v převodech mezi motorem a zátěží, ty představují většinou vlastnosti šroubu, matice šroubu, spojky motoru, řemenu atd.

Tyto stroje se vyznačují relativně omezenou dynamikou, vyšším stupněm opotřebení mechanických součástí a relativně pomalou regulací s delšími časovými konstantami. U přímých pohonů mechanické převody odpadají a celá poddajnost systému je obsažena v regulaci. O to větší nároky jsou kladeny na správné nastavení parametrů regulačních smyček. Na rozdíl od klasických strojů není moment síly motoru zesílen převody a silová složka tedy musí být poskytnuta řádně naddimenzovaným pohonem s mnohem vyššími proudy. Nároky na příkon strojů s lineárními motory jsou jednoznačně vysoké a sekundárním problémem bývá nadměrná produkce tepla chladících agregátů, které teplotně stabilizují pohony. Modely regulačních smyček těchto strojů jsou dobře popsány v [1].



Obr. 1. Pohony se šroubem a převody (Trimill VF4525[18])



Obr. 2. Stroj s pohonem přímých motorů (JOBS Linx Blitz [17])

Optimální nastavení regulačních smyček je základním předpokladem pro zaručení kvality obráběcích strojů. U moderních obráběcích strojů s CNC řízením se standardně používá kaskádová nadřazená regulace složená ze tří základních regulátorů. Pro pohyb osy obráběcího stroje musí být zohledněny tři žádané hodnoty – proud motoru, otáčky motoru/rychlost a poloha suportu a tomu analogicky odpovídají proudový, rychlostní a polohový regulátor. Akční člen proudového regulátoru je výkonový stupeň pohonu, pro rychlostní regulátor je akční člen servomotor a pro regulátor polohy je to tentýž servomotor se zpětnou vazbou uzavírající se v polohovém snímači.

Diplomová práce bude zaměřena především na vlastnosti rychlostního regulátoru u strojů poháněných kuličkovým šroubem s rychloposuvem cca do $30 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a se zrychlením do $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, některé kapitoly se budou týkat i dalších parametrů, které s rychlostí obráběcích strojů souvisí.

1.2 Pojmy

Na úvod práce bude účelné definovat základní pojmy související s regulací strojů s CNC řízením:

Osa (*axis*)

Pojem *osa* v terminologii oblasti obráběcích strojů s klasickou kinematikou znamená jeden směr (jeden stupeň volnosti), ve kterém se může suport stroje pohybovat a zároveň se tímto termínem často označuje vše, co s uvedeným směrem souvisí. Složením pohybů ve více

osách vzniká pohyb v prostoru. Např. stroj s kartézským systémem XYZ se popisuje jako 3-osý stroj. Osy mohou být podle tvaru dráhy pohybující se části lineární nebo rotační. Vzhledem k této uvedené zvyklosti popisu stroje se i nadále v DP bude slovo *osa* používat.

Rychlost (*speed*)

Rychlost patří mezi základní fyzikální veličiny a zároveň mezi hlavní parametry pro obrábění. Ovlivňuje zásadně řezné podmínky při obrábění a vždy je součástí NC programu. V zásadě se dělí na rychlost lineárních os a na rychlost os rotačních. Při pohybu více os současně je ale trajektorie dráhy různá a i vektor rychlosti špičky nástroje (nebo obrobku) se v prostoru mění. V parametrech stroje musí být maximální rychlost pro danou osu definovaná, stejně tak výsledná rychlost při současném pohybu (interpolaci) více os současně.

Rychlost lineárních os (*linear axis speed*)

Rychlost je obecně definovaná jako $v = \frac{s}{t}$, v diferenciálním tvaru pak $v = \frac{ds}{dt}$ [m.s⁻¹]. U obráběcích strojů se pro rychlost lineárních os standardně užívá jednotka ***m.min⁻¹***.

Rychlost rotačních os (*rotary axis speed*)

Úhlová rychlost $\omega = \frac{d\alpha}{dt}$ [s⁻¹ nebo rad.s⁻¹]

Obvodová rychlost $v = \frac{ds}{dt}$ [m.s⁻¹]

Vztah mezi obvodovou a úhlovou rychlostí: $v = \omega \cdot r$

Zatímco u pohybů složených z jednoho nebo více lineárních os je posouzení polohy nebo rychlosti nástroje vcelku jednoduché, k popisu rotačních os je nutné přistupovat jinak. Rotační osu většinou představuje otočná a (nebo) naklápěcí deska pracovního stolu, nebo jedna nebo více otočných os rotační hlavy. Při pohybu bodu špičky nástroje nebo bodu obráběného místa na pracovním stole záleží na vzdálenosti od osy otáčení (poloměru) a tato hodnota se mění podle délky použitého nástroje nebo podle umístění obrobku na pracovním stole. Pro posouzení vlastností rotačních os z hlediska obrábění je tedy důležitá především rychlost obvodová, nikoli úhlová. V parametrech stroje je zadána rychlost úhlová, konstruktér však při jeho návrhu musí zohlednit parametry rotační osy, aby bylo možné provozovat osu s požadovanou rychlostí obvodovou.

Výrobce obráběcích strojů dále musí určit maximální hodnoty rychlosti pro jednotlivé osy stroje a ty jsou pak zadány ve strojních parametrech. Obecně vyšší rychlosti (posuvy) jsou charakteristické pro malé lehké obráběcí stroje, u velkých strojů, kde jsou v pohybu velké hmoty, jsou hodnoty rychlosti nízké.

Anglické označení „*speed controller*“ nebo německé „*Drehzahlregler*“ se překládají jako rychlostní regulátor nebo regulátor rychlosti, někdy se používá spojení otáčkový regulátor, to ale nemusí být úplně vhodné, protože v případě lineárních motorů se nevyužívá rotačního pohonu a označení tak není univerzální. U rotačních motorů je pro hodnocení parametrů rychlostního regulátoru podstatná úhlová rychlost motoru [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$].

Zrychlení (*acceleration*)

Změnu rychlosti vyjadřuje veličina zrychlení. V diferenciálním tvaru: $a = \frac{dv}{dt}$

Podobně jako rychlost i zrychlení musí být při návrhu stroje správně definováno a zadáno ve strojních parametrech. Zpravidla je možné definovat zrychlení pro různé režimy stroje (ruční, automatický) a vždy se jedná o maximální hodnoty. Jednotky pro zrychlení lineární osy jsou $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$, pro osy rotační $\text{rev}\cdot\text{s}^{-2}$.

Ryv (*jerk*)

Regulace změny rychlosti při přechodu z jedné hodnoty do druhé pouze pomocí zrychlení je postačující snad jen pro jednoduché stroje, relativně pomalé a nenáročné na trhavé chování při změně pohybu. U moderních dynamických CNC strojů je nutné omezit lineární

nárůst rychlosti pomocí její druhé derivace: $j = \frac{d^2s}{dt^2}$. Jak bude uvedeno dále, význam ryvu

je mnohem vyšší než např. u zrychlení. Výsledkem je kvadratický náběh nebo doběh rychlosti a správné nastavení tohoto parametru výrazně přispívá k omezení trhavých pohybů suportu a zároveň zvyšuje životnost mechanických dílů. Ryv stejně jako zrychlení musí být nastaven v parametrech stroje jako limitní hodnota, která nesmí být překročena.

Tuhost (*stiffness*)

Mechanické komponenty stroje podléhají při pohybu suportu stlačení/protažení, podobně jako u pružiny, a tato odolnost tělesa vůči jeho deformaci se nazývá tuhost. U základny stroje i u dílů, které se podílejí na pohybu suportu stroje, se předpokládá co nejvyšší tuhost. Nízká tuhost mechanických dílů se projeví v omezených možnostech nastavení regulace a

vznikem vlastních kmitů. Tuhost lze vyjádřit jako podíl vnější působící síly a deformační výchylky λ : $k = \frac{F}{\lambda}$ Jednotkou tuhosti je 1 N/m. Při posuzování vlastností obráběcích strojů se často uvádí statická a dynamická tuhost.

Poddajnost (*plasticity*)

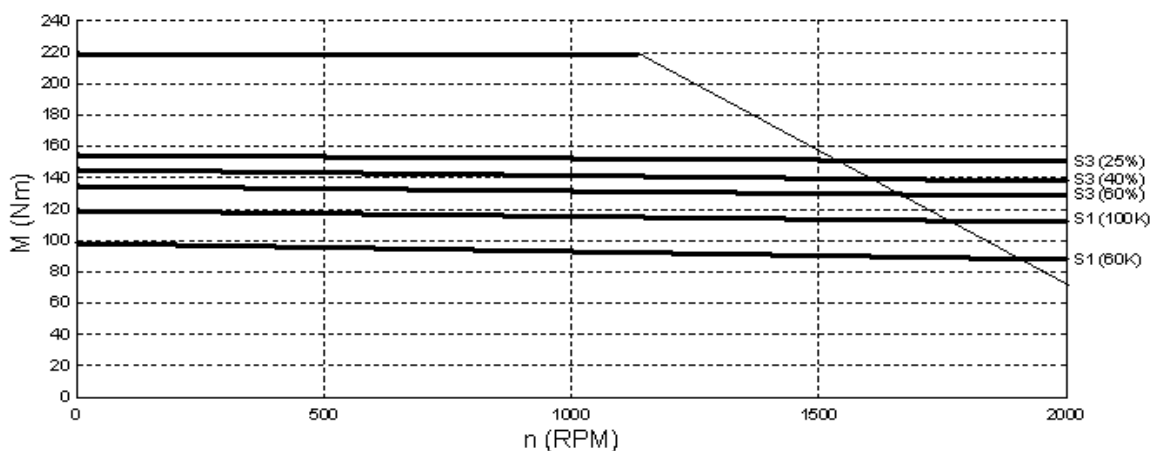
Převrácená hodnota tuhosti se nazývá poddajnost.

Moment setrvačnosti (*inertia*) J [kg.m²]

Charakterizuje setrvačnost tělesa při rotačním pohybu. U strojů s rotačními osami nebo u klasických strojů s lineárními osami, které jsou uváděny do pohybu pomocí kuličkových šroubů, má moment setrvačnosti velký význam. Moment setrvačnosti zátěže také ovlivňuje PI parametry rychlostního regulátoru. V dalších výpočtech budou zohledněny - moment setrvačnosti motoru J_M , moment setrvačnosti kuličkového šroubu J_S a moment setrvačnosti zátěže J_Z .

Moment síly (*torque*) M_n , M_0 , M_{max}

Základním parametrem pro hodnocení vlastností rotačních motorů (zpravidla synchronních servomotorů) pro pohon posuvů nebo rotačních os obráběcích strojů je moment síly. Výrobce motorů zpravidla uvádí moment klidový M_0 , moment jmenovitý M_n , který může motor poskytovat v trvalém provozu (S1) nebo v přerušovaném provozu (S3) a moment maximální M_{max} .



Obr. 3. Momentová charakteristika synchronního motoru

Pro hodnocení výkonnosti přímých lineárních motorů, kde je pohyb suportu vykonán přímo, bez rotačního pohonu a převodů, slouží veličina síla.

Motorová (momentová) konstanta (*torque constant*) – K_F (Nm/A, N/A)

Konstanta vyjadřuje vztah síly (momentu síly) motoru vzhledem k proudu motoru. Podle konstanty lze odhadnout, o jak velký (silný) motor jde. Konstanta bývá v rozsahu od tisícin (u malých motorů) po desítky (u motorů s nejvyšším momentem síly/s nejvyšší silou).

Optimalizace parametrů

Optimalizace parametrů u obráběcího stroje znamená hledání optimálních hodnot především parametrů regulátoru (proudového, rychlostního a polohového) a následná úprava parametrů s regulací souvisejících (např. nastavení filtrů, zrychlení, ryvu, feedforwardu atd.). Pro účely této diplomové práce budou popsány především parametry regulátoru rychlosti.

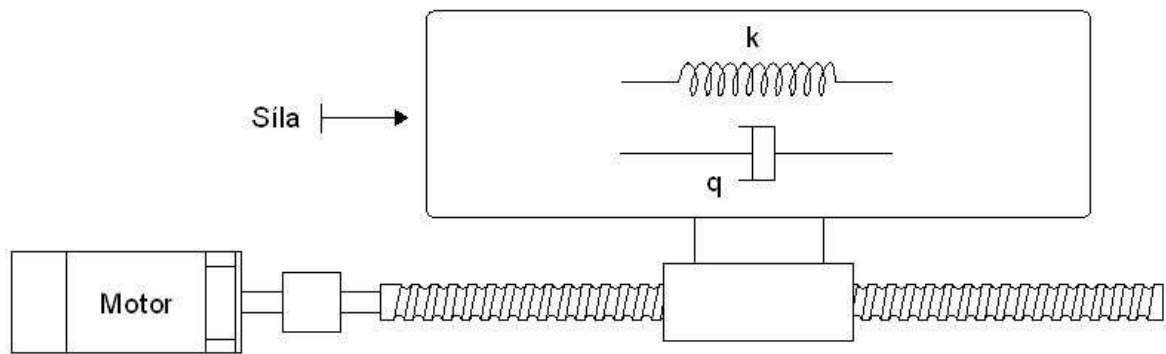
1.3 Zjednodušený model lineární osy

Na obrázku 4. je zjednodušený model typického pohonu suportu pomocí kuličkového šroubu. Pro zjednodušení jsou zanedbány vlastnosti jednotlivých mechanických částí (spojka, kuličkový šroub, matice) a předpokladem bude zátěž s konstantními vlastnostmi jako celek. Podobně jako u pružiny – tuhost obsažená v zátěži je charakterizovaná konstantou k , schopnost jímat (tlumit) energii je popsána konstantou tlumení q . Podobně také u rychlostního regulátoru je základní veličinou síla (krouťící moment motoru), u reálného stroje při obrábění působí v opačném směru protisíla - řezná síla.

Model znázorňuje pohon stroje velmi stručně, různě velká tuhost se projevuje u všech mechanických komponentů a kmitočtová charakteristika je různě deformovaná jejich vlastními kmity. U strojů s opotřebenými mechanickými díly se navíc v regulačních smyčkách nepříznivě projevuje vůle.

Předpokládá se lineární chování systému, dopravní zpoždění je zanedbáno.

$$F = ks + q \frac{ds}{dt} + m \frac{d^2s}{dt^2} \quad \text{Diferenciální rovnice systému}$$



Obr. 4. Zjednodušený model lineární osy

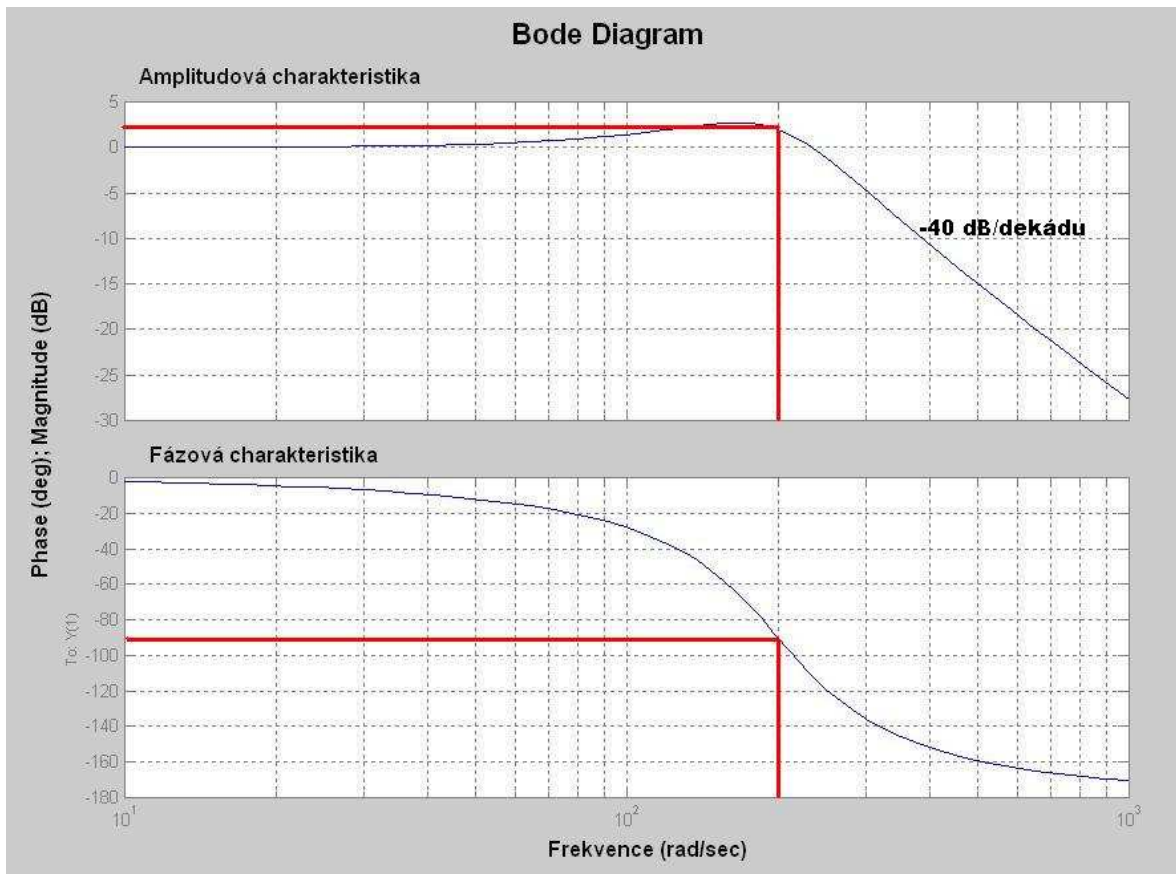
Rovnice charakterizuje proporcionální člen 2. řádu s dvojnásobnou akumulací energie, charakteristická frekvence členu se rovná $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$. Ze vzorce vyplývá, že se vzrůstající tuhostí zátěže charakteristická frekvence roste, naopak s rostoucí hmotností zátěže se charakteristická frekvence snižuje. Podobně lze posuzovat různě velké suporty stroje, zjednodušený model rychlostní smyčky se tak blíží popisu frekvenční odezvy proporcionálního členu druhého řádu (P-T₂). Amplitudová a fázová kmitočtová charakteristika je na obr.5 (periodický člen stabilní). Časové konstanty, podobně jako u regulátoru rychlosti, jsou v řádech ms. Přenos modelu:

- obecně: $G(s) = \frac{1}{T_0 s^2 + 2T_0 \xi s + 1}$ - konkrétně: $G(s) = \frac{1}{0,000025s^2 + 0,004s + 1}$

- přenos s časovými konstantami: $G(s) = \frac{1}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$

- u uvedeného modelu $T_1 = T_2$: $G(s) = \frac{1}{(0,005s + 1)(0,005s + 1)}$

Při provozu reálného stroje dochází při změně parametrů zátěže a tím ke změně hodnot časových konstant. Kmitočtové charakteristiky jsou tak různě deformované právě podle časových konstant.

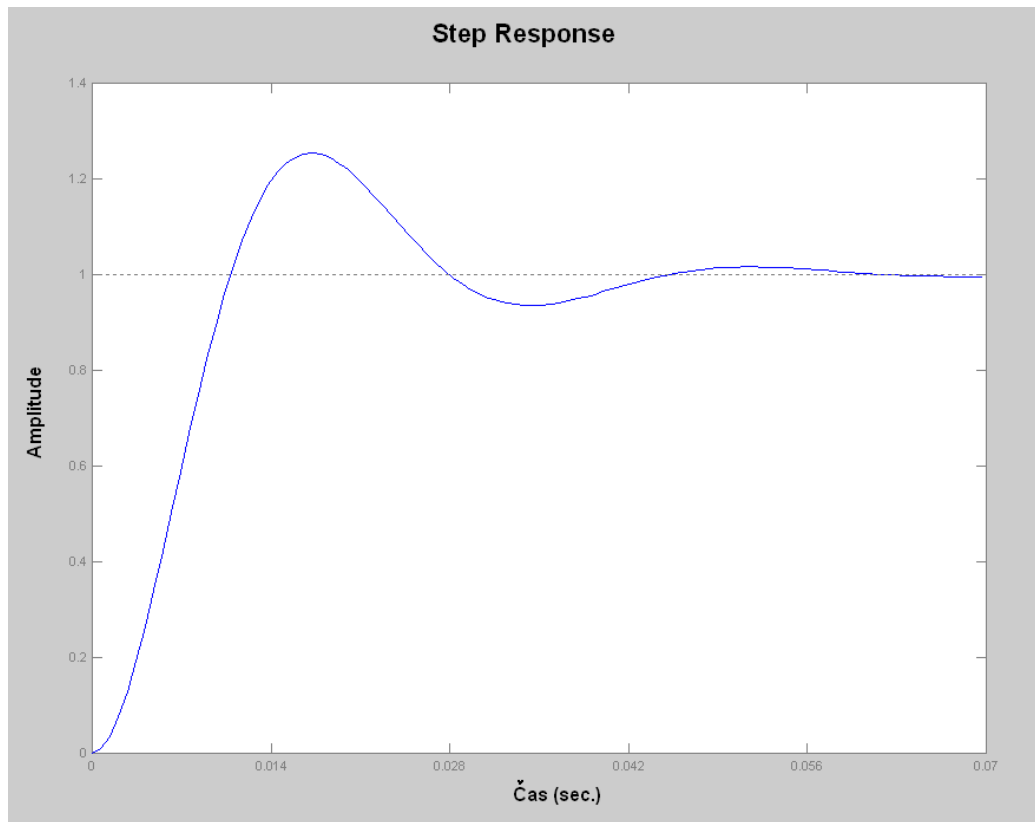
Obr. 5. Amplitudová a fázová charakteristika P-T₂ členu (Matlab)

- časová konstanta: $T_0 = 5 \text{ ms}$
- činitel tlumení: $\xi = 0,4$
- převýšení nad 0db: $+3\text{dB}$
- charakteristická frekvence : $\omega_0 = 1/T_0 = 200 \text{ Hz}$

Hodnotě charakteristické frekvence 200Hz odpovídá fázový posun -90° (červeně vyznačené). Pro P-T₂ člen je charakteristický pokles -40dB/dekádu [1]. Hodnoty fázového posunu se mění od 0° po -180° na vysokých frekvencích.

Při hodnocení charakteristik se také používá **šířka pásma** (*bandwidth*), ta je definovaná jako rozsah amplitudové charakteristiky až do poklesu na hodnotu -3dB . U hodnocení charakteristiky rychlostního regulátoru se postupuje stejně, odpovídající charakteristika je uvedena na obr. 12. Velikost převýšení charakteristiky na hranici 0dB závisí na nastavení konstant regulátoru rychlosti K_P a T_n , analogicky se mění hodnota činitele tlumení ξ .

Maximální přípustné převýšení amplitudové charakteristiky je při optimalizaci parametrů regulátoru rychlosti +3dB.

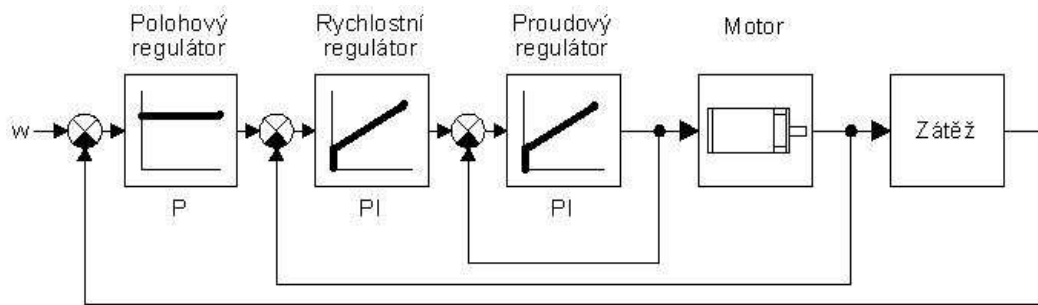


Obr. 6. Přechodová charakteristika P-T2 členu (Matlab)

Hodnocení vlastností lze provést také pomocí přechodové charakteristiky. U rychlostního regulátoru je požadovaný průběh kmitavý stabilní, o nastavených parametrech K_P a T_n rozhoduje především první překmit na žádanou hodnotou. Průběh takového členu je na obrázku 6, optimální první překmit nad žádanou hodnotou by měl být asi 30% (tomu odpovídá převýšení přibližně +3dB u amplitudové charakteristiky).

1.4 Nadřazená regulace CNC

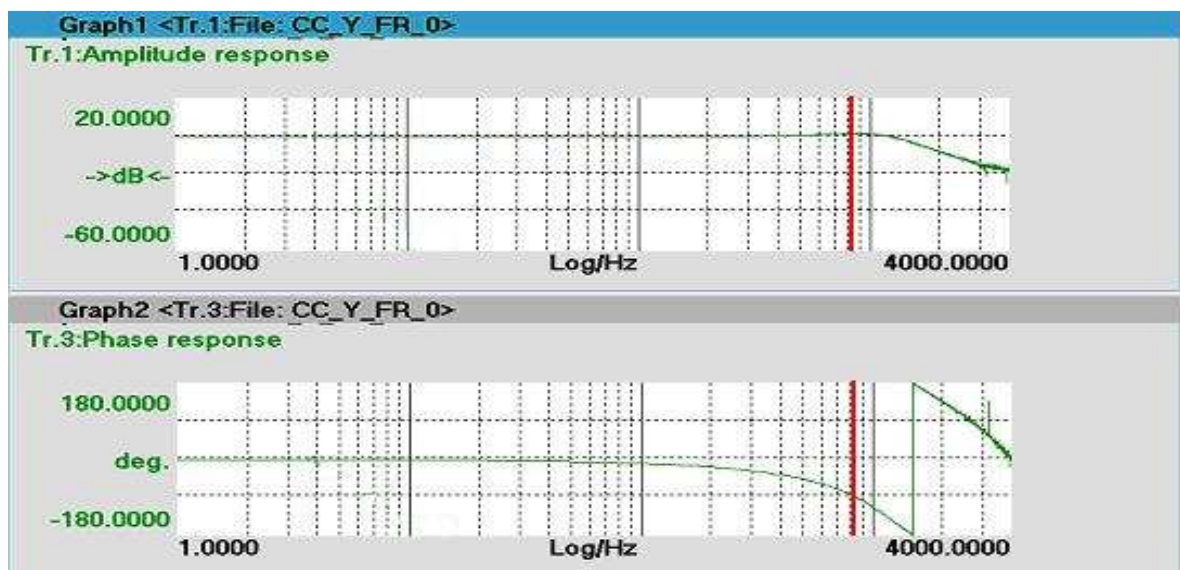
U moderních obráběcích strojů s CNC řízením se používá nadřazená kaskádní regulace., kde jsou obsaženy tři základní regulátory – polohový, rychlostní a proudový, které slouží k regulaci tří veličin: polohy, rychlosti a proudu motorem, blokové schéma je na obr. 7.



Obr. 7. Obecné schéma nadřazené regulace

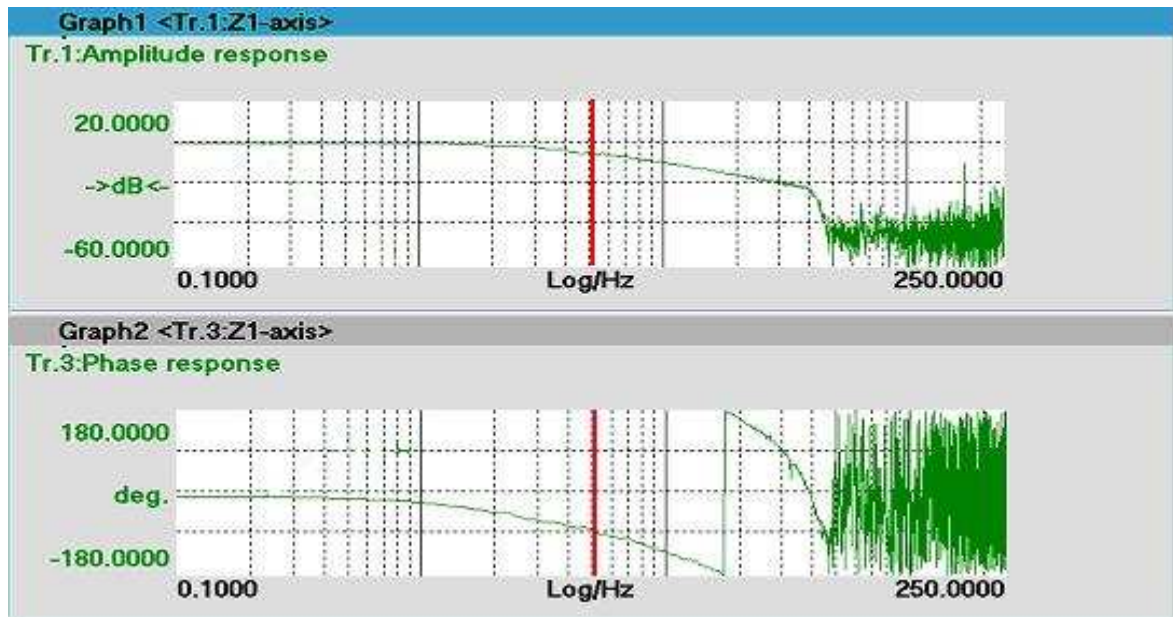
Podrobný rozbor regulace je velmi dobře pospán v [1], rozbor samotné rychlostní smyčky je zvolen záměrně, problematika je sama o sobě složitá a při uvádění strojů do provozu v praxi patří optimalizace parametrů rychlostního regulátoru k tomu nejobtížnějšímu.

Proudový regulátor (podřízený oběma dalším regulátorům) je z hlediska nastavování parametrů relativně nejjednodušší, zpětná vazba se uzavírá v pohonech v měřících cívkách proudu a neprojevuje se zde vliv mechanické soustavy. Změřené kmitočtové charakteristiky proudového regulátoru bývají většinou vcelku ukázkové. Na obrázku 8. je zobrazena amplitudová a fázová charakteristika lineární osy Y (motor Siemens 1FT6108), hodnota charakteristické frekvence je asi 810 Hz (červený kurzor - převýšení +3dB na amplitudové charakteristice, -90° na charakteristice fázové). Na přechodové charakteristice tomu odpovídá kmitavý průběh stabilní s prvním překmitem asi 30% nad žádanou hodnotou.



Obr. 8. Amplitudová a fázová charakteristika proudového regulátoru

Polohový regulátor je podobně jako regulátor rychlostní také ovlivněn mechanickou skladbou stroje, pravidla pro optimalizaci jsou ale odlišná. Zpětná vazba se uzavírá v polohovém snímači (rotačním nebo lineárním-pravítku), který je umístěný na konci regulačního řetězce. Regulátor polohy je pouze proporcionálního typu, charakteristická frekvence pro lineární svislou osu Z (obr. 9) je asi 53Hz a požadovaný průběh podle přechodové charakteristiky je stabilní nekmitavý.



Obr. 9. Amplitudová a fázová charakteristika polohového regulátoru

U digitální regulace je pro každý regulátor charakteristický jejich čas cyklu. Hodnoty časů proudového a rychlostního regulátoru se pohybují od desítek po stovky μs (např. 100 μs), u polohového regulátoru bývá čas cyklu vyšší s (např. 200-300 μs). Tyto hodnoty jsou zpravidla ve strojních parametrech a je možné je za určitých okolností měnit, u některých systémů je zkrácení regulačních cyklů placené. Zkrácení cyklů může být užitečné při zlepšování výpočetního času regulace, vždy záleží na výkonnosti regulačních jednotek a na hardwarové konfiguraci stroje (počet, typ a výkon jednotlivých os). Nicméně pro běžné aplikace se to nedoporučuje, protože nezkušeným zásahem lze více pokazit, a implicitně nastavené hodnoty času cyklu by měly být optimální.

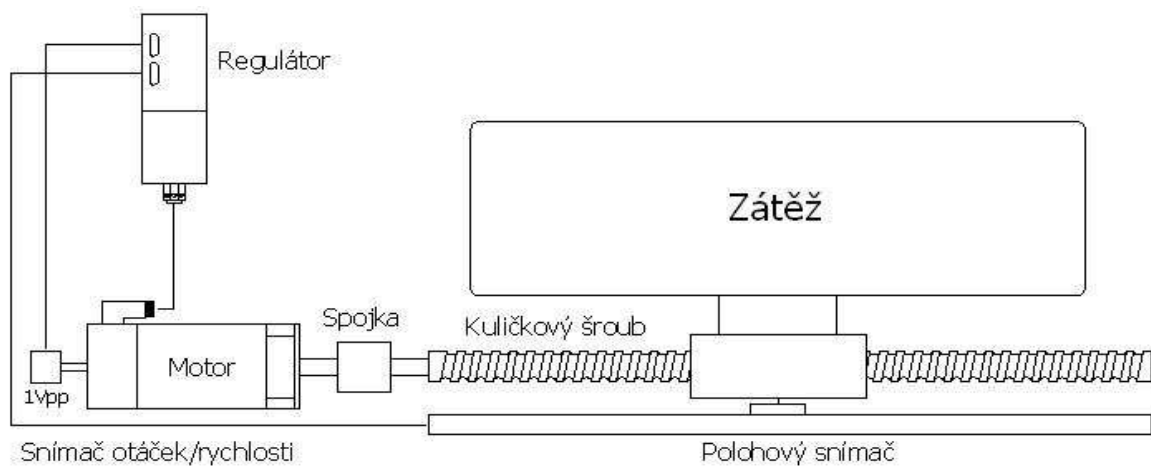
U nadřazené regulace je nutné si uvědomit, že výstupní veličina regulátoru nadřazeného je zároveň vstupní veličinou do regulátoru podřízeného. Výstupem z polohového regulátoru je tedy žádaná rychlost a výstupem z regulátoru rychlostního je požadovaný proud do motoru.

1.5 Jednotlivé komponenty v řetězci

Jak bylo uvedeno, do smyčky rychlostního regulátoru výrazně zasahuje mechanická skladba stroje a je tím ovlivněn přenos soustavy. Dále budou uvedeny komponenty, jejichž vlastnosti se mohou do regulační smyčky promítat nejvíce.

1.5.1 Přehled

Klasický obráběcí stroj vybavený kuličkovým šroubem může vypadat následovně (obr. 10). Motor pohání soustavu přes spojku a kuličkový šroub, který zde zastává úlohu převodu do pomala. Vůle jsou eliminovány pomocí předepnutých matic, tuhost soustavy nového stroje je při správně naddimenzovaných komponentech poměrně vysoká. Konstrukce strojů mohou být odlišné, pohon kuličkového šroubu může být přes řemenový převod, nebo naopak kuličkový šroub je uložen pevně a otáčí se jeho matice. V případě dalších převodů (např. ozubené řemeny) se do regulační smyčky zanáší další zpožďující člen, který kmitočtovou charakteristiku rychlostního regulátoru ještě více degraduje a navíc obsahuje další vlastní frekvence.

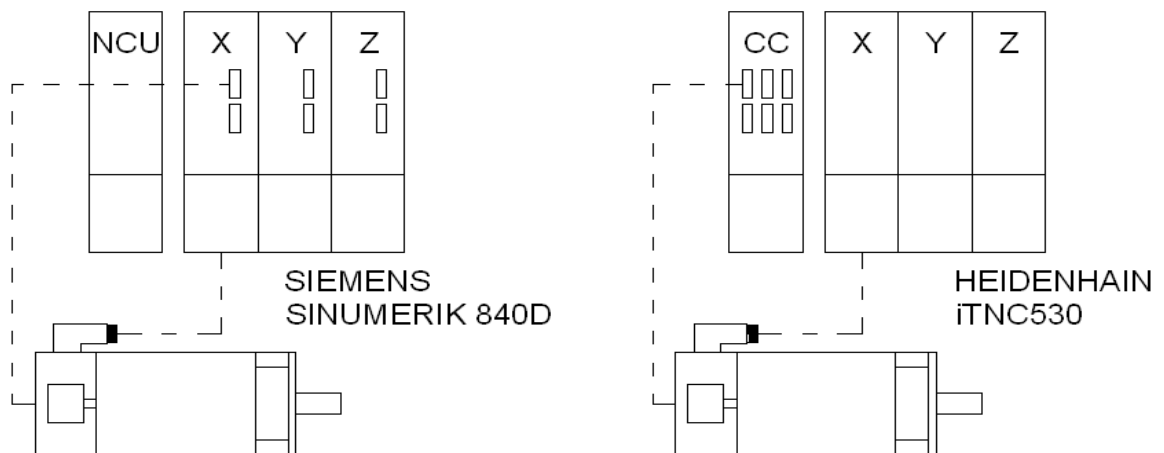


Obr. 10. Komponenty v řetězci rychlostního regulátoru

1.5.2 NC systém

NC systémy s analogovým řízením se používají pro jednoduché obráběcí stroje nebo retrofity. Nové stroje, u kterých je požadavek na dynamiku a rychlost zpracování programu, jsou osazovány systémy s číslicovým řízením. Struktura těchto CNC systémů bývá různá,

pro srovnání je na obr. 11 uvedena základní topologie řídicích systémů Siemens Sinumerik 840D a Heidenhain iTNC530.



Obr. 11. Různé koncepce CNC systémů

Proudový a rychlostní regulátor u systémů Siemens Sinumerik 840D umístěny v ve výkonovém prvku – pohonu. V jednotce NCU je umístěn polohový regulátor, data jsou pak mezi NCU a pohony přenášeny pomocí sběrnice.

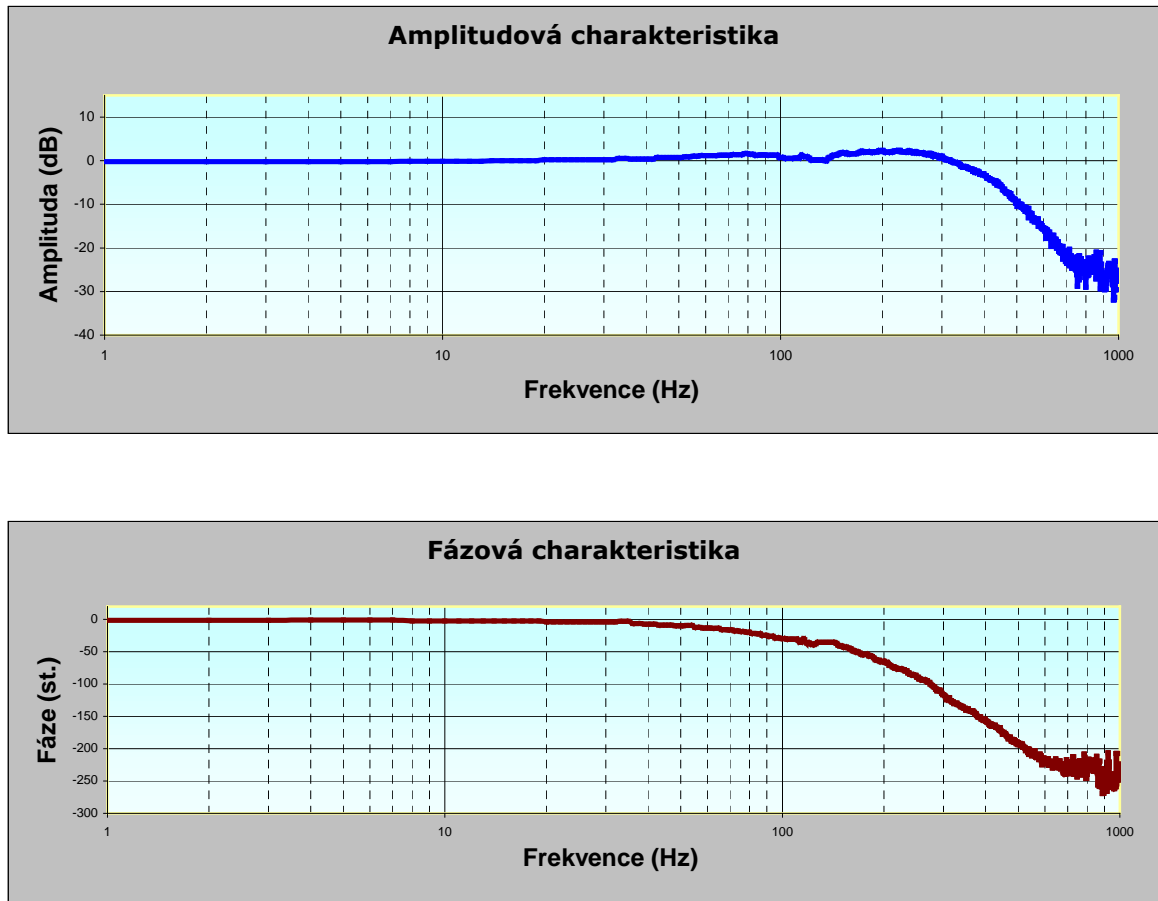
Koncepce systému firmy Heidenhain iTNC 530 je poněkud odlišná. Všechny tři regulátory jsou umístěny v jedné jednotce CC424X. Výhodou by mohla být vyšší výpočetní rychlost, cesty mezi regulátory jsou zkráceny na minimum.

Odlišné struktury CNC regulace od různých výrobců jsou zpravidla předmětem výrobního tajemství a know-how. Pro nastavení parametrů regulátoru rychlosti musí být vzaty v úvahu časy cyklů jednotlivých regulátorů.

1.5.3 Motor

Dnes téměř výhradně se pro nové obráběcí stroje poháněné kuličkovými šrouby nebo hřebeny používají bezkartáčové střídavé synchronní servomotory s permanentními magnety. Konstrukce motorů se liší podle jmenovitých otáček, počtu pólů a jejich výkonu. K posouzení jejich vlastností pro pohon konkrétní osy se používá kroutící moment. Pro optimalizaci parametrů rychlostního regulátoru je důležitým měřítkem tvar amplitudové charakteristiky. Na obr. 10 je uvedena amplitudová a fázová charakteristika motoru Siemens 1FT6108 (1500 RPM) bez zátěže. Šířka pásma je v tomto případě asi 320 Hz. Charakteristická frekvence je asi 190 Hz, tomu odpovídá pokles -90° na fázové

charakteristice. V grafu je patrný pokles charakteristiky od hodnoty charakteristické frekvence ω_0 odpovídající průběhu členu P-T₂, tj. -40dB/dekádu.



Obr. 12. Amplitudová a fázová charakteristika motoru Siemens 1FT6108

Pro výslednou rychlost suportu stroje musí konstruktér navrhnout převody a otáčky motoru tak, aby maximální otáčky motoru dostačovaly pro maximální rychlost osy. Při návrhu motoru je také nutné zohlednit vztah momentů setrvačnosti motoru a momentu setrvačnosti zátěže. Problematika výpočtu optimálního převodu je dobře uvedena v [11].

Hodnoty elektrické i mechanické časové konstanty motorů jsou pro uvedeny v katalogu a zpravidla se pohybují v řádu ms.



Obr. 13. 2 Synchronní servomotory nové řady 1FT7 (Siemens [13])

1.5.4 Snímač otáček motoru

Součástí rotačního motoru je snímač otáček, který zajišťuje fázovou komutaci a zároveň slouží jako zpětnovazební snímač regulátoru rychlosti (v některých případech i regulátoru polohy). Nejběžnějšími typy jsou optické inkrementální snímače s výstupním signálem $1V_{pp}$, dále pak s referenční stopou a na přání může být snímač vybaven datovou sběrnici. Nejnovějším trendem je nasazovat snímače s digitálním rozhraním vysokorychlostních sběrnic (Siemens DriveClique® nebo Heidenhain EnDat verze 2.2 atd.).

Snímač otáček zastává funkci zpětnovazebního členu rychlostní smyčky a musí být navržen tak, aby svými vlastnostmi rychlostní smyčku neomezoval. Pro plynulý chod by snímač měl mít pokud možno co nejvíce rysek, standardní počet je 2048. Tato hodnota bývá zvýšena interpolací, u 1024-násobné interpolace je výsledný počet měřících kroků cca 2 milióny, u některých systémů může být počet kroků až 8 miliónů (např. *Fidia C20*). Šířka pásma snímače by musí přesahovat požadovanou šířku pásma motoru.



Obr. 14. 2 Snímač otáček motoru (ROD1387 – Heidenhain[14])

1.5.5 Zátěž

Mechanická skladba zátěže bývá různorodá a vcelku poměrně komplikovaná podle konkrétního typu stroje. Dřívější pohony posuvů pomocí převodovek a řemenů jsou nahrazovány přímým náhonem pomocí kuličkového šroubu s minimálním počtem převodů. S narůstajícím požadavkem na co nejvyšší dynamiku je snaha eliminovat setrvačné hmoty a akumulátory energie, které se podílejí na omezení a zpoždění regulace. Typickým zástupcem tohoto trendu je použití přímých pohonů (lineárních motorů pro lineární osy a prstencových motorů pro osy rotační).

Nastavení rychlostního regulátoru je jednodušší, pokud je hmotnost zátěže (a odtud moment setrvačnosti) konstantní. Toto platí pro ty pohyblivé části strojů, které se podílejí pouze na pohybu nástroje. Jedinou změnou je tak změna hmotnosti suportu po výměně nástroje, ta je ale vzhledem k hmotnosti celého suportu zanedbatelná. Jiná situace je u posuvných a (nebo) otočných stolů, na kterých je umístěn obrobek. Hmotnost zátěže se mění podle hmotnosti obrobku a ta může být i vyšší než je hmotnost samotného stolu.

Příklad:

Na otočný stůl o průměru 1800 mm a o hmotnosti 2000 kg může být umístěn obrobek o hmotnosti až 12000 kg. Hmotnost zátěže tedy může být v rozsahu 2000-14000 kg. (Pro zjednodušení výpočtu předpokládáme desku otočného stolu i zátěž ve tvaru válce umístěné navzájem v ose, převodový poměr: 200):

Moment setrvačnosti motoru: $\mathbf{J_M = 0.0168 \text{ kg.m}^2}$ (Siemens 1FT6105)

Moment setrvačnosti zátěže bez obrobku: $\mathbf{J_{Z1} = 0.02025 \text{ kg.m}^2}$ (po převodu)

Moment setrvačnosti zátěže s max. hmotností: $\mathbf{J_{Z2} = 0.05775 \text{ kg.m}^2}$ (po převodu)

Poměr momentů setrvačností zátěže a motoru:

Zátěž bez obrobku: $\mathbf{J_{Z1} / J_M = 1.20}$

Zátěž s maximální hmotností obrobku: $\mathbf{J_{Z2} / J_M = 3.44}$

Hmotnost zátěže hraje v tomto případě velkou roli, rozdíl v poměrech setrvačnosti zátěže a motoru v případě zátěže bez obrobku a s plnou zátěží se projeví v požadavku na různé nastavení parametrů regulátoru.

Protože nastavení rychlostního regulátoru závisí na hmotnosti (momentu setrvačnosti) zátěže, je zřejmé, že v ideálním případě bychom potřebovali znát při každém obrábění hmotnost obrobku a následně změnit příslušné parametry regulátoru. Ve většině případů je nutné nalézt kompromisní parametry, které vyhoví pro celý rozsah hmotnosti zátěže. Hodnoty parametrů u těchto os se často blíží variantě s maximální zátěží, regulace je tedy spíše pomalá a dynamika při malé zátěži je zbytečně omezená. Otočné stoly takových parametrů zpravidla slouží jako polohovatelné osy a nehodí se pro souvislé obrábění. Existují i různé metody pro změnu parametrů regulátoru při změně hmotnosti zátěže, parametry lze např. odhadnout podle zatížení motoru. Po změně hmotnosti (např. po naložení obrobku) se provede krátký měřicí cyklus a nové nastavení parametrů.

Dále jsou uvedeny komponenty, které jsou v zátěži obsaženy a které se nejčastěji pro pohon osy používají: spojka motoru, převody, kuličkový šroub a samotný suport.

1.5.6 Spojka motoru

Spojka motoru je umístěna mezi motorem a kuličkovým šroubem a slouží k tlumení vibrací a rázů a zároveň musí pokud možno co nejdokonaleji přenést moment síly motoru na zátěž. Spojky se vyznačují vysokou torzní tuhostí a další předností může být galvanická izolace motoru a zátěže, kde je zpravidla umístěn snímač polohy.

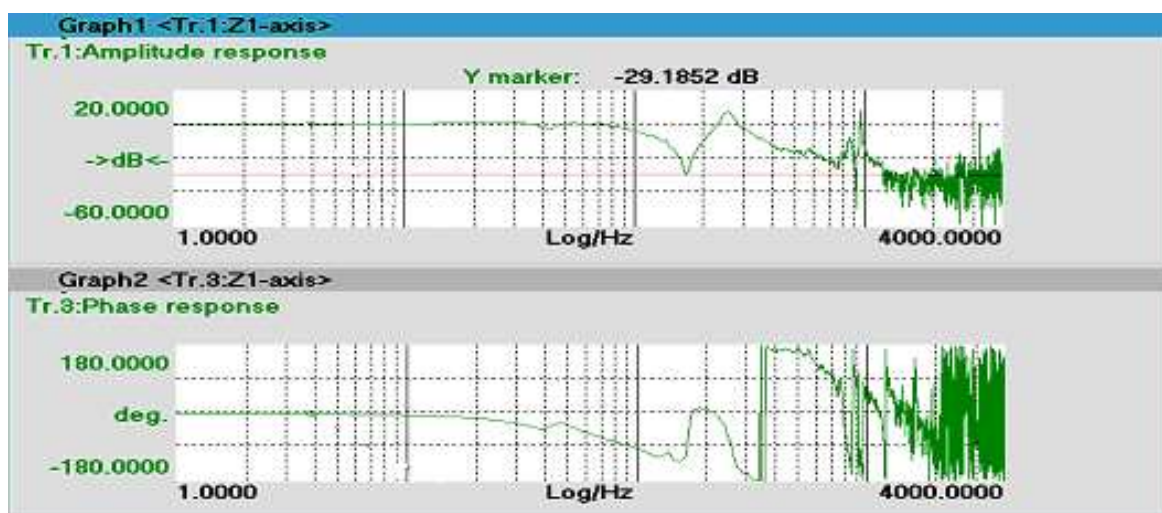


Obr. 15. Spojka motoru a obráběcím stroji (Rotex [19])

U strojů, na kterých bylo prováděno měření, byly použity spojky od firmy Rotex®. Spojky jsou vyrobeny z materiálu na bázi polyuretanu a výrobce stroje si může vybrat spojku s požadovanou tuhostí. Výpočet je poměrně složitý, naštěstí v katalogích firmy Rotex® je možné nalézt podrobný postup pro výběr správného typu. Výběr nesprávného typu spojky má vliv na chování rychlostního (i polohového) regulátoru.

1.5.7 Převody

Dalším prvkem ovlivňujícím regulaci rychlosti i polohy který na stroji může nebo nemusí být použit, je převod pomocí ozubeného řemenu. Tento převod slouží především k přizpůsobení otáček a momentu setrvačnosti motoru a zátěže. Vlastní frekvence zubového převodu se ale mohou nepříznivě promítat do frekvenční charakteristiky rychlostního regulátoru. Životnost řemenů je také omezená a musí být pravidelně kontrolována.



Obr. 16. Kmitočtová charakteristika rychlostního regulátoru svislé osy Z s převodem ozubeným řemenem

Na obr. 16 je uvedena kmitočtová charakteristika rychlostního regulátoru svislé osy Z. Na frekvenci asi 170 Hz je patrný pokles amplitudové charakteristiky -29dB způsobený ozubeným řemenem.

1.5.8 Kuličkový šroub

Jedná se o sestavu kuličkového šroubu a zpravidla předepnuté matice s přírubou. Zajišťuje převod rychlosti do pomala, přeměňuje pohyb rotační na translační a zároveň přizpůsobuje vztah momentů setrvačnosti motoru a zátěže. V zásadě existují dva způsoby použití

kuličkového šroubu – v prvním případě je šroub nehybný a rotuje matice, v druhém případě se otáčí přímo kuličkový šroub. Základním požadavkem je co nejvyšší tuhost, s rostoucí hmotností zátěže je nutné přizpůsobit průměr kuličkového šroubu a (nebo) stoupání, zároveň však při rotujícím šroubu roste jeho kinetická energie a jeho moment setrvačnosti. Nesprávné navržení parametrů šroubu se projeví v deformaci kmitočtových charakteristik rychlostního i polohového regulátoru. Navíc i u správně navrženého šroubu jsou kmitočtové charakteristiky různé při měření na různých místech polohy suportu. Neuvážené poddimenzování parametrů lze názorně pozorovat při měření kmitočtových charakteristik na začátku a na konci kuličkového šroubu.



Obr. 17. Kuličkový šroub na obráběcím stroji

1.5.9 Kabelový řetěz

Na vlastnostech mechanické soustavy se podílí další aspekty, které více či méně mohou ovlivňovat nastavení rychlostního regulátoru. Kabelový řetěz může být příkladem. Jedná se o plastovou nebo kovovou konstrukci pohyblivě navzájem spojených dílů, kterými jsou vedeny kabely a hadice k technologii umístěné na suportu. Především u motorů velkých příkonů jsou průměry a tím i tuhost kabelů i hadic nezanedbatelné a celý kabelový řetěz působí spíše jako tlumič rázů a brzdny element při zrychlení suportu. Tento vliv je možné z dlouhodobého hlediska považovat za konstantní. Přesto už při návrhu stroje je na místě zvážit vhodné typy kabelových řetězů pro konkrétní aplikaci. Stejně tak je užitečné posuzovat další pohyblivé posuvné kryty, textilní rolety a další kryty, které slouží k zakrytí pracovního prostoru nebo mechanických převodů.



Obr. 18. Kabelový řetěz na obráběcím stroji

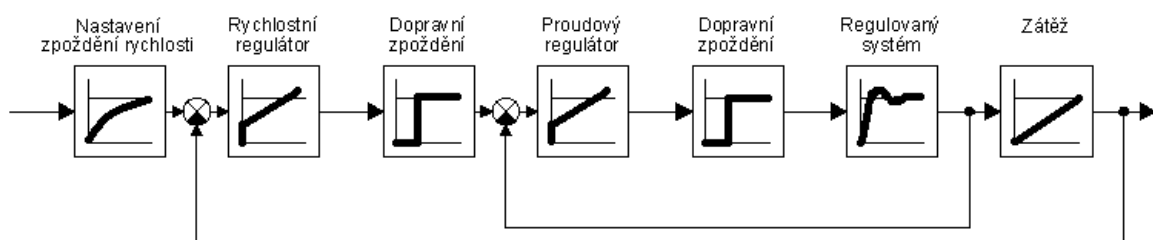
1.5.10 Suport

Klasickým materiálem používaným pro výrobu suportů je šedá a tvárná litina. Základny a lože strojů mohou být také vyrobeny z minerálních odlitků. Základním požadavkem je co nejvyšší tuhost a teplotní stálost. Kromě požadavku vysoké tuhosti je důležitý požadavek na schopnost materiálu co nejvíce tlumit vibrace vznikající při obrábění. Pokud nelze tyto vibrace odstranit, lze pro jejich eliminaci použít speciální tlumiče, které jsou naladěny právě na kritické rezonanční frekvence.

Novými materiály používanými v oblasti obráběcích strojů jsou kompozity z uhlíkových vláken.

1.6 Blokové schéma regulace

Na obr. 19 je uvedeno zjednodušené obecné blokové schéma nadřazené regulace používané pro CNC řízení obráběcích strojů.



Obr. 19. Zjednodušené blokové schéma regulace obráběcího stroje

U digitální regulace lze pro každý regulátor nastavit jiný čas cyklu. Tento faktor společně s dalšími vlastnostmi elektronických obvodů (především spínací časy tranzistorů regulačních obvodů) způsobí časové zpoždění, které je reprezentováno blokem *Dopravní zpoždění*. Pro výpočet parametrů rychlostního regulátoru se uplatňuje časové zpoždění rychlostního i proudového regulátoru. Proudový a rychlostní regulátor jsou typu PI a při optimalizaci jejich parametrů je vyžadován kmitavý průběh stabilní, regulátor polohy je pouze proporcionálního typu.

1.7 Vliv proudového regulátoru

Proudový regulátor (*current controller*) jako nejvíce podřízený regulátor v kaskádové regulaci má za úkol zajistit správnou regulaci proudu s ohledem na parametry připojeného motoru. Vzhledem k tomu, že proudový regulátor je obsažen ve smyčce regulátoru rychlostního, vlastnosti obou se navzájem ovlivňují. Do výpočtu optimálních parametrů PI regulátoru rychlostního se promítá především čas cyklu proudového regulátoru.

1.8 Vazba na polohový regulátor

Nadřazeným prvkem rychlostního regulátoru je regulátor polohový (*position controller*). Ten je pouze proporcionálního typu, parametrem P je v tomto případě tzv. *rychlostní konstanta* K_v . Konstanta tedy zohledňuje rychlost jako parametr vstupující dále do regulátoru rychlostního. Do výpočtu K_v konstanty se zavádí parametr polohové odchylky.

$$\text{Vzorec: } K_v = \frac{v_{pož}}{\Delta X}$$

ΔX - polohová diference mezi požadovanou a skutečnou polohovou odchylkou

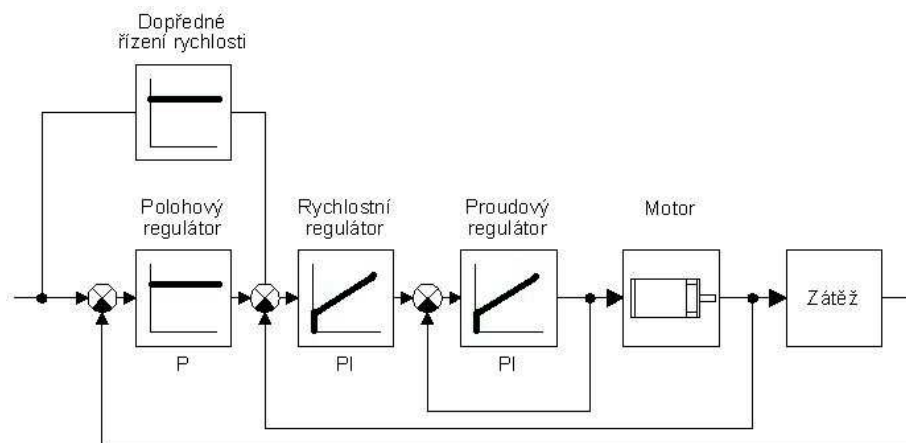
$v_{pož}$ - požadovaná rychlost

Pro správnou činnost regulátoru polohového, musí být co nejpečlivěji nastaven regulátor rychlosti. Navíc při vzniku nežádoucích frekvencí lze na jeho vstupu v případě potřeby použít filtry rychlosti. Ty jsou dvojího druhu – pásmová propust a dolní propust.

1.9 Dopředné řízení (feedforward)

Činnost regulátoru rychlosti může také ovlivňovat zavedení dopředného řízení rychlosti (*speed feedforward control*). Nevýhodou rozvětveného kaskádového regulačního obvodu

je, že teprve regulační odchylka nadřazeného regulátoru vede k akčnímu zásahu regulátoru podřízenému a to nepříznivě projevuje v delší době regulace [7]. Tento nedostatek lze vyřešit zapojením dopředného řízení vnitřních regulačních smyček (feedforwardu). Nejčastěji se používá dopředné řízení rychlosti, u řídicího systému Siemens Sinumerik 840D je možné v případě potřeby nastavit dopředné řízení momentu.



Obr. 20. Dopředné řízení rychlosti – blokové schéma

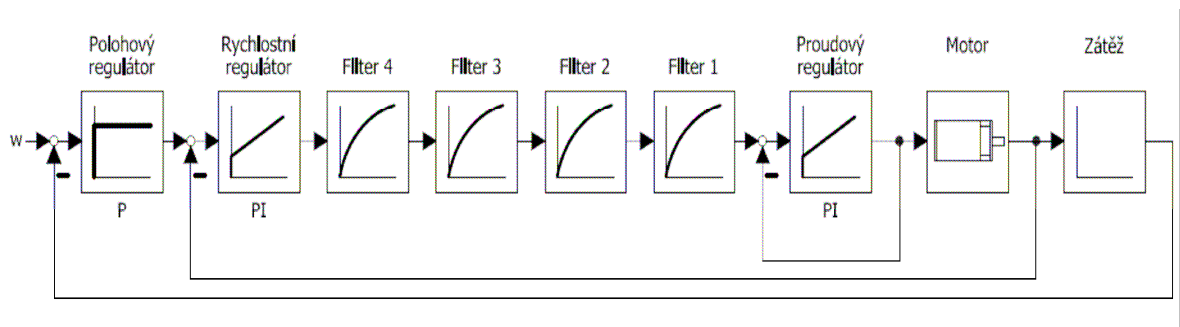
1.10 Vlastní frekvence stroje

Zátěž rychlostní smyčky tvořená výše uvedenými mechanickými komponenty je charakterizována její tuhostí a vlastními kmity. Hodnota frekvence vlastních kmitů závisí na skladbě zátěže a na vlastnostech materiálů, ze kterých je složená. U reálného víceosého stroje je navíc zátěž tvořena řetězcem „malých“ zátěží – podsystémů, které se vyznačují svými vlastními kmity.

Při pohybu suportu stroje při reálném obrábění dochází k vybuzení vlastních frekvencí stroje s různou intenzitou a to vše se promítá v regulaci rychlostní smyčky. Frekvenční spektrum je navíc odlišné podle dráhy pohybu suportu a časem se mění podle opotřebení mechanických částí stroje. Analýza rezonančních frekvencí se provádí pomocí rychlé Fourierovy transformace (*FFT*), výpočetní algoritmus je často implementován v pomocných programech stroje nebo je součástí servisních programů, které lze provozovat na laptopu.

1.11 Filtry rychlostního regulátoru

Standardním způsobem pro potlačení nežádoucích frekvencí je použití proudových filtrů, které zařazeny na výstup rychlostního regulátoru a ovlivňují tedy přímo regulátor proudový. Moderní systémy zpravidla nabízí použití několika filtrů, u systému Siemens Sinumerik 840D je možno použít až 4 filtry, u Heidenhainu iTNC 530 je filtrů 5. Filtry je možné nastavit ručně podle kmitočtových charakteristik nebo lépe svěřit automatickému nastavení. Ne vždy je ale zaručen uspokojivý výsledek, někdy použité filtry charakteristiku ještě zhorší a paradoxně ještě vyvolají zesílení jiných rezonančních kmitů stroje. Proto je na místě už ve stadiu návrhu stroje věnovat zvýšenou pozornost výběru materiálů, ze kterých bude stroj složen a preferovat materiály s vysokým tlumícím účinkem. O tom, že výrobci věnují konstrukci a materiálovému složení jejich strojů zvýšenou pozornost, svědčí řada speciálních a zajímavých konstrukcí často ukrývající dlouhodobě získávané know-how. Typickým příkladem mohou být kompaktní obráběcí stroje nové generace od koncernu DMG, konstrukce nesoucí označení *monoBLOCK®* a *duoBLOCK®*.



Obr. 21. Proudové filtry řídicího systému Siemens Sinumerik 840D

Na obr. 21 je uvedeno blokové schéma CNC regulace s proudovými filtry. Až 4 filtry lze aktivovat jako dolní propust nebo pásmová zadrž a s jejich pomocí lze eliminovat špičky rezonančních frekvencí, které jsou nad amplitudovou frekvenční charakteristikou. Pásmovou zadrž je vhodné použít v případě, že rezonanční špičky jsou relativně úzké a lze přesně odhadnout jejich frekvenci. Filtr typu dolní propust je vhodný pro případy, kdy nelze určit přesnou rezonanční frekvenci a špičky amplitudové charakteristiky jsou nejasného tvaru. Zpravidla nejvýhodnější je použít optimalizačního algoritmu, který je součástí CNC systému.

2 VÝPOČET PARAMETRŮ RYCHLOSTNÍ SMYČKY

Dimenzování parametrů regulátoru rychlosti je možné rozdělit na statické a dynamické. **Statické dimenzování** zahrnuje návrh optimálních otáček motoru (tím rychlost suportu), návrh momentu síly motoru s ohledem na řezné podmínky atd.

Dynamické dimenzování určuje parametrů stroje při dynamické chování, tj. zrychlení, ryv, zohlednění setrvačných hmot suportu, výpočet momentu setrvačnosti atd.

V následující kapitole budou shrnuty výpočty parametrů rychlostního regulátoru a parametrů s rychlostí suportu související.

2.1 Zrychlení a ryv

Zrychlení a ryv jsou parametry týkající se výsledné rychlosti suportu. S nastavením regulátoru rychlosti ale částečně souvisí a následující simulační výpočty by měly ukázat vliv ryvu na zrychlení. Obě veličiny jsou zadávány ve strojních parametrech a podle zkušeností je ne vždy správně pochopen jejich význam. Zrychlení při srovnávání kvality strojů často slouží jako významný parametr, co se ale již standardně neuvádí, je ryv. Přitom právě druhá derivace rychlosti podle času může ovlivňovat zrychlení osy, omezení se nejvíce týká obrábění při nízkých rychlostech (posuvech).

Uvedené výpočty byly provedeny v simulačním programu a jsou tedy teoretické a nezohledňují skutečné mechanické vlastnosti stroje.

Příklad 1

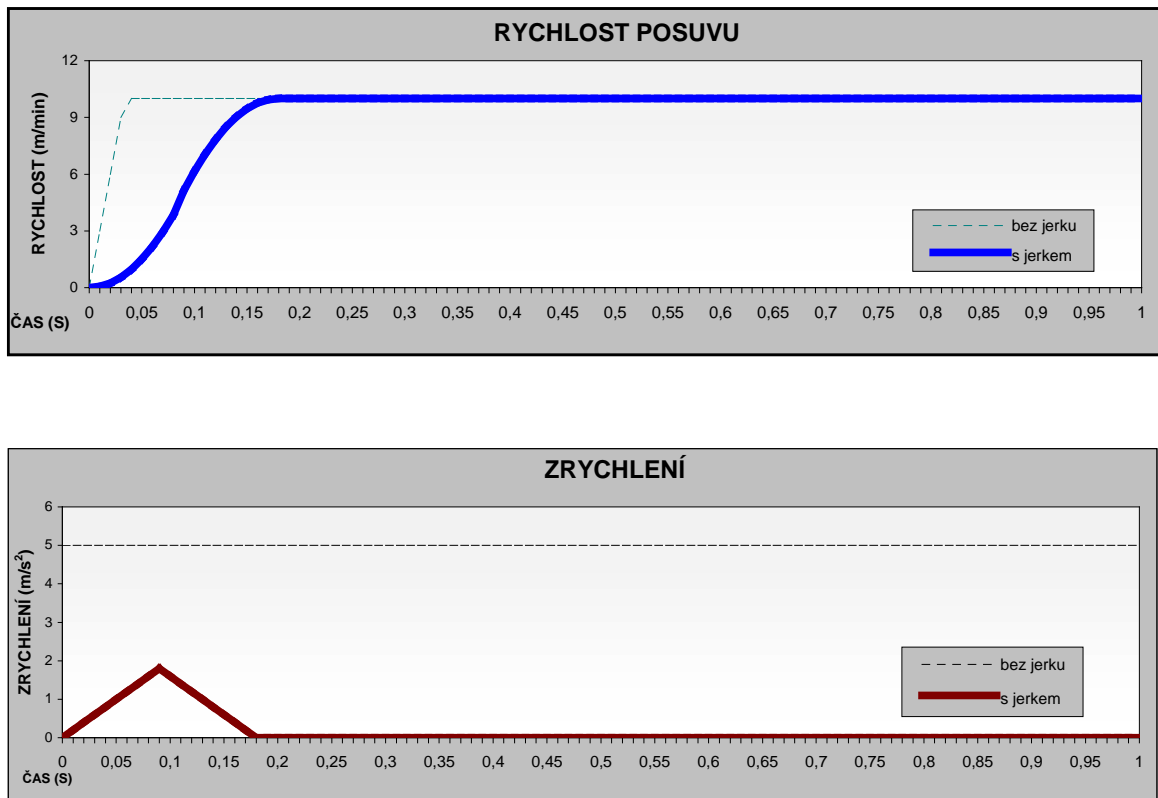
V prvním grafu byly vynášeny hodnoty rychlosti ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$) podle $v = \frac{1}{2} jt^2$, v druhém grafu pak hodnoty zrychlení. Náběh rychlosti je nejprve kvadratický, pokud směrnice rychlosti dosáhne zadaného zrychlení (pokud ho vůbec dosáhne – v tomto příkladu ne), průběh rychlosti je lineární. Před dosažením zadané rychlosti je opět průběh kvadratický.

Zadané hodnoty:

Posuv při obrábění: $10 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ($0.166 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Maximální zadané zrychlení: $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$

Maximální zadaný jerk: $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-3}$

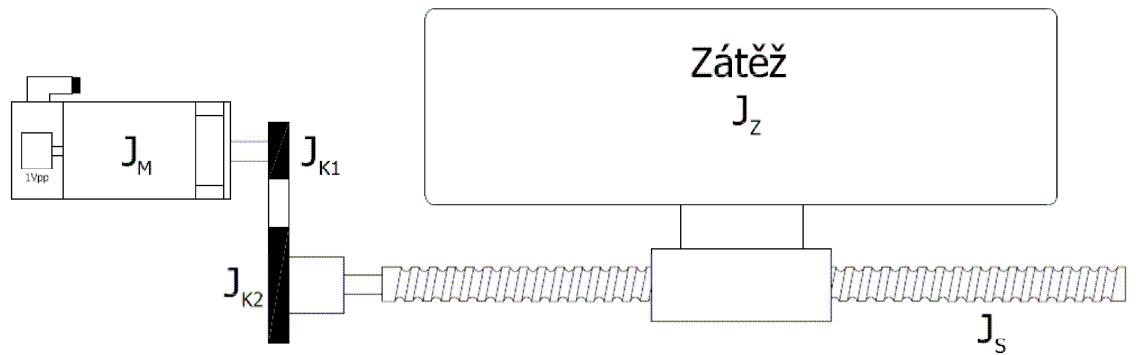
Dosažitelné hodnoty:Maximální dosažitelné zrychlení: 1.80 m.s^{-2} Průměrné zrychlení: 0.93 m.s^{-2} 

Obr. 22. Gryf rychlosti a zrychlení – Příklad 1

Jedná se o typický příklad poměrně svižného obrábění a jak je patrné z grafů, už hodnota ryvu 20 m.s^{-3} zadané zrychlení významně omezuje. Hodnota zrychlení je v parametrech je 5 m.s^{-2} , maximální dosažitelné zrychlení je při uvedeném posuvu 1.8 m.s^{-2} . Další dva grafy, které jsou uvedeny v příloze, podobně ilustrují vztah zrychlení a ryvu s jinými hodnotami. Čím nižší hodnota ryvu je zadaná, tím nižší zrychlení je možné dosáhnout. Dosažitelné zrychlení navíc závisí na NC programu a na zadaných rychlostech suportu, jak vyplývá z příkladu 2, při obrábění do 10 m/min^{-1} je dosažitelné zrychlení max. 1.44 m.s^{-2} , nikoli 5 m.s^{-2} , které je zadáno v parametrech. Pro hodnocení skutečných parametrů strojů (dynamiky a rychlosti obrábění) je nutné provádět jejich testování při stejných podmínkách (rychlost, zadaný jerk, zadané zrychlení).

2.2 Moment setrvačnosti

Pro správné nastavení regulátoru rychlosti je nutné zohlednit moment setrvačnosti zátěže s ohledem na moment setrvačnosti motoru.



Obr. 23. Moment setrvačnosti motoru a zátěže

Optimální hodnoty parametrů PI rychlostního regulátoru jsou ovlivněny především skladbou zátěže. U lineárních os poháněných klasickými rotačními je zátěž reprezentovaná momentem setrvačnosti, u lineárních motorů hmotností. Výsledný moment setrvačnosti zátěže je dán součtem momentem setrvačnosti motoru, kuličkového šroubu, převodů a vlastního suportu. Při návrhu mechanické části zátěže by měl být zohledněn poměr momentu setrvačnosti zátěže a momentu setrvačnosti motoru. Pro moderní dynamické stroje by se měl tento faktor pohybovat v rozmezí 0.5 – 2. Podle zkušeností je ještě přijatelný faktor 3, vyšší číslo napovídá na velmi nestabilní chování regulátorů rychlosti a polohy a omezené možnosti při optimalizaci parametrů.

Příklad výpočtu momentů setrvačnosti

Vliv momentů setrvačnosti komponentů v řetězci rychlostní smyčky ilustruje následující jednoduchý příklad, zadány jsou tyto parametry: stoupání kuličkového šroubu 0.02m, střední průměr 0.063m, délka 2m, hmotnost suportu (zátěže) 4100 kg.

Moment setrvačnosti motoru: $J_M = 0.0291 \text{ kg.m}^2$ (Siemens 1FT6108)

Moment setrvačnosti kuličkového šroubu: $J_S = 0.0238 \text{ kg.m}^2$

Moment setrvačnosti zátěže: $J_Z = 0.0415 \text{ kg.m}^2$ (po převodu)

Poměr $(J_Z + J_S) / J_M = 2.24$ je ještě přijatelný, moment setrvačnosti zátěže po převodu je sice nejvyšší, ale moment setrvačnosti šroubu je proti této hodnotě více než poloviční a

vzhledem k tomu, že kuličkový šroub slouží pouze jako *převod*, je vliv momentu setrvačnosti šroubu nezanedbatelný.

Rotující kuličkový šroub tedy patří mezi největší negativní činitele zvyšující moment setrvačnosti zátěže. Šroub musí být navržen tak, aby byl dostatečně tuhý, průměr šroubu by tedy měl být co nejvyšší, s rostoucím průměrem ale naopak roste s druhou mocninou jeho

moment setrvačnosti $J = \frac{1}{2}mr^2$ a tím kinetická energie $E_k = \frac{1}{2}J\omega^2$. Výsledné řešení je

zpravidla kompromisem mezi oběma požadavky, někdy je nutné zvolit motor s vyšším momentem setrvačnosti a tím i momentem síly, přestože by stačil na danou aplikaci moment síly mnohem nižší.

2.3 Přizpůsobení otáček motoru k rychlosti suportu

Při konstrukci stroje je nutné pro maximální rychlost osy zohlednit otáčky motoru vzhledem k danému převodu. Kuličkový šroub lze analogicky přirovnat k nakloněné rovině, převod charakterizuje stoupání šroubu na jednu otáčku – např. 20mm/otáčku. Čím nižší je stoupání šroubu, tím vyšší převod šroub představuje. Snížení stoupání šroubu je ale technologicky omezené, při vysokých otáčkách šroubu se zase s druhou mocninou zvyšuje jeho kinetická energie. Naopak při uvažování co nejvyššího (nekonečného) stoupání šroubu se model teoreticky přibližuje lineárnímu pohonu, prakticky by ale takový šroub nešel vyrobit a už vůbec by nefungoval.

Pokud budeme uvažovat parametry kuličkového šroubu uvedené v předcházející kapitole a požadovaný rychloposuv suportu bude $40 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, otáčky motoru musí být 1980 RPM (u motorů Siemens by mohl být vybrán motor se jmenovitými otáčkami 2000 RPM).

Pro výpočet parametrů K_p a T_n je důležité si uvědomit, že se snižujícím se stoupáním šroubu (s tím rostoucím převodem) klesá moment setrvačnosti zátěže s druhou mocninou. Toto je důležité především pro opačný případ, kdy je snaha navrhnout kuličkový šroub s vysokým stoupáním pro dosažení vysokého rychloposuvu, snížení převodu ale znamená kvadratické navýšení momentu setrvačnosti zátěže a nezohlednění tohoto faktu se může negativně projevit v omezených možnostech při nastavení parametrů rychlostního regulátoru.

2.4 Postup optimalizace na reálném stroji

Optimalizace parametrů regulace na obráběcím stroji musí být provedená pro každý nový stroj a pravidelně i pro stroje, které jsou již v provozu. Vzhledem k tomu, že lze těžko i zcela nové stroje sestavit naprosto shodně, úprava parametrů pro každý stroj je vždy nutná. K rozdílným hodnotám parametrů přispívají odlišně vyrobené i namontované mechanické dílce stroje i různorodá skladba betonového základu stroje. Ten je zpravidla u zákazníka provozující stroj jiný než základ ve výrobním závodě a optimalizace parametrů musí být provedena na novém místě ještě jednou při instalaci stroje. Výrobci řídicích systémů CNC pro obráběcí stroje nabízí pro elegantnější a rychlejší optimalizaci strojních parametrů pomocný software. Některé tyto produkty jsou poměrně sofistikované, pomocí komunikace se strojem pomocí ethernetu lze měřit a nastavovat parametry jednotlivých regulátorů přímo na laptopu, měřit vlastní frekvence stroje a zpracovávat tato data pomocí FFT transformace. K daným produktům naneštěstí neexistují podrobné návody s vysvětlením jak dané algoritmy pracují, uživatel tedy často jen vykonává úkony, které program nabízí, bez toho aniž by poznal bližší souvislosti.

První posouzení CNC regulace by mělo být provedeno při návrhu stroje. Existují postupy, jak teoreticky vypočítat K_P a T_n rychlostního regulátoru, popř. odhadnout šířku pásma. Nutno přiznat, že teoretické výpočty ne vždy odpovídají reálným měření. Zjednodušený postup bude uvedený v následující kapitole 2.5.

Univerzální postup pro optimalizaci strojních parametrů na reálném stroji neexistuje, ale ve většině standardních případů by mohl být následující:

- a) Optimalizace parametrů proudového regulátoru
- b) Optimalizace parametrů rychlostního regulátoru
- c) Nastavení filtrů rychlostního regulátoru
- d) Optimalizace parametrů polohového regulátoru
- e) Nastavení filtrů polohového regulátoru
- f) Nastavení dalších parametrů – feedforwardu, kompenzace tření atd.

Tématu této diplomové práce se týkají body b) a c). Optimalizaci K_P a T_n je možné provést podle amplitudové a fázové charakteristiky (*Bode*) ve frekvenční doméně nebo pomocí přechodové charakteristiky (*step response*) v doméně časové. V některých případech

napomůže měření pomocí impulsové charakteristiky (*pulse response*). Je třeba zdůraznit, že v praxi jsou naměřené charakteristiky často velmi odlišné od těch ideálních, které jsou výsledkem simulačních programů. Vždy záleží na zkušenostech technika uvádějícího stroj do provozu, jak dokáže různě zdeformované charakteristiky identifikovat. Uvedené postupy všeobecně známé z literatury byly doplněny o praktické zkušenosti.

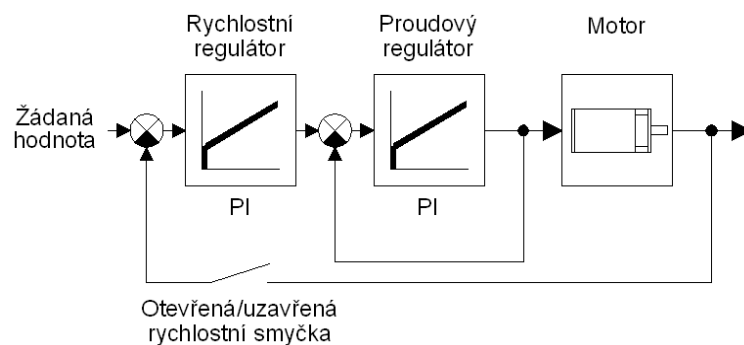
Optimalizace parametrů pomocí amplitudové a fázové charakteristiky

Úkolem je pomocí konstant K_P a T_n nastavit co největší šířku pásma. Maximální šířka pásma je závislá na čase cyklu rychlostního regulátoru [12]. Při čase cyklu např. 100 μ s je s ohledem na Shannon-Kotelnikův teorém maximální teoretická šířka pásma:

$$bandwidth = \frac{1}{2.0,0001} = 5000Hz$$

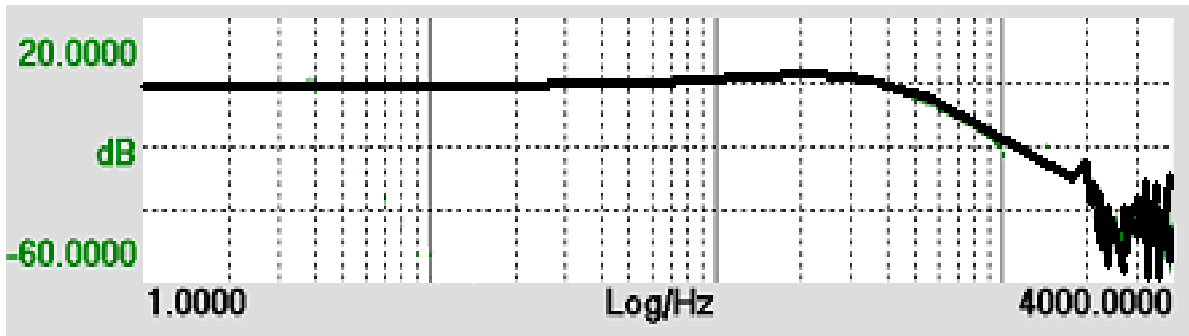
U moderních CNC systémů šířka pásma určená pomocí času cyklu rychlostního regulátoru bohatě převyšuje požadované hodnoty.

Měření kmitočtových charakteristik je možné provádět při otevřené nebo uzavřené regulační smyčce. Otevřená smyčka je regulační obvod bez zpětné vazby (obr. 24).



Obr. 24. Měření otevřeného a uzavřeného regulačního obvodu

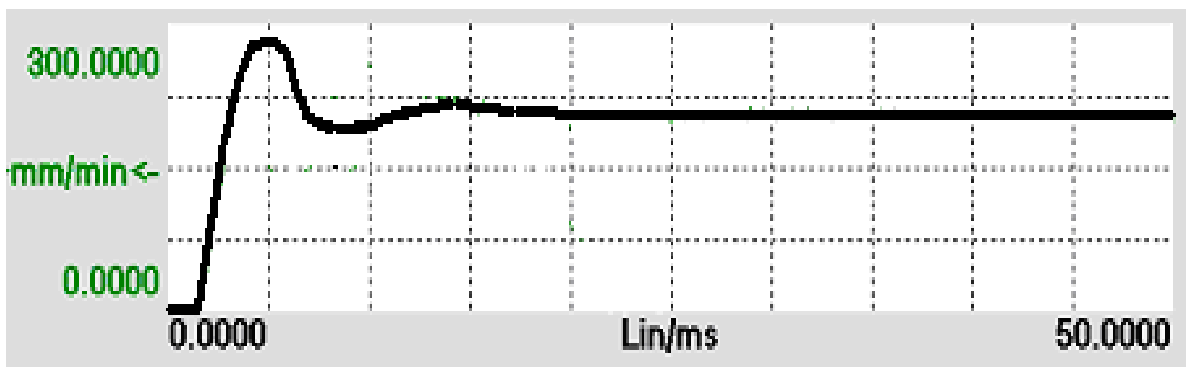
Jako první je nutné upravit zesílení K_P , integrační časová konstanta se deaktivuje nastavením příliš dlouhého času, např. 500 ms. Cílem je co nejvíce zvyšovat K_P tak dlouho, dokud amplitudová charakteristika nepřesáhne hodnotu 0dB. Integrační časová konstanta bude poté snižována, až se projeví převýšení amplitudové charakteristiky nad 0dB (především v koncové části šířky pásma). Optimální hodnota překmitu je cca +3dB.



Obr. 25. Optimálně nastavená amplitudová charakteristika

Optimalizace parametrů pomocí přechodové charakteristiky

Jiným způsobem optimalizace parametrů je měření v časové doméně pomocí přechodové charakteristiky. Optimální chování rychlostního regulátoru se vyznačuje kmitavým stabilním průběhem, náběh charakteristiky by měl být co nejstrmější, první překmit nad žádanou hodnotou rychlosti by měl mít velikost cca 30%. Postup je podobný jako v předchozím případě, nejprve musí být vyřazena z činnosti integrační časová konstanta (např. 500ms). Počáteční hodnota zesílení K_P musí být nízká (u lineárních os např. 1Nm.s/rad), zesílení je potom postupně zvyšováno a následně měřeny přechodové charakteristiky. Cílem je dosáhnout co nejvyššího K_P při ještě nekmitavém průběhu bez překmitu nad žádanou hodnotou. Poté bude snižována hodnota T_n , dokud nebude dosaženo kmitavého stabilního průběhu s prvním překmitem o velikosti 30% žádané hodnoty.



Obr. 26. Optimálně nastavená přechodová charakteristika

V nejjednodušších případech optimalizace PI parametrů lze použít osvědčenou metodu Ziegler-Nicholse pomocí kritického zesílení. Metodu je vhodné použít při nedostatku času nebo v případě starších strojů, kde nelze použít automatické optimalizační programy, použití je obdobné jako u standardních regulačních okruhů, pro optimální parametry PI by měla platit tato pravidla:

Zesílení rychlostního regulátoru: 50 – 60% kritického zesílení

Integrační časová konstanta: 2-násobek T_{nk}

2.5 Výpočet parametrů regulátoru - příklady

Teoretické zhodnocení parametrů regulace by mělo předcházet každé konstrukci typové řady strojů a zároveň může pomoci při uvádění strojů do provozu. Komplexní postup je velmi dobře popsán v [1], publikace zde přehledně uvádí příslušné modely a výpočty nezbytné pro návrh regulace strojů s CNC řízením. Podrobný rozbor ale přesahuje rámec této diplomové práce, proto budou uvedeny jen dílčí výsledky výpočtů se stručným popisem.

Výpočet základních parametrů pro rychlostní regulátor bude podle uvedené publikace ukázán na příkladech dvou různých os (lineární a rotační) a výsledky budou v praktické části porovnány s měřením na reálném stroji, další výpočty se budou týkat rozdílné zátěže rotační osy u otočného stolu. U řídicího systému Siemens Sinumerik 840D je možné nastavit typ regulátoru, kromě standardního regulátoru PI lze také nastavit regulátor PI s referenčním modelem, výpočty zde se budou týkat pouze standardního regulátoru PI. Výpočty vychází z blokového schématu na obr. 19.

Protože je proudový regulátor zařazen do smyčky rychlostního regulátoru, uplatňují se jeho vlastnosti při jeho regulaci. Výpočty jsou proto ovlivněné časy cyklů i dopravním zpožděním proudového i rychlostního regulátoru. Cílem je pomocí parametrů K_P a T_n dosáhnout co nejvyšší charakteristickou frekvenci a úhlovou rychlost motoru.

1. příklad – vertikální frézovací centrum VU-1709 osa Z

Předpokládáme pohon lineární osy s pohonem kuličkovým šroubem a motorem Siemens řady 1FT6 s dokonale tuhým spojením *motor-zátěž*. Jedná se pohon svislé osy Z vertikálního obráběcího stroje VU-1709 firmy Trimill a.s. Parametry motoru a soustavy:

Motor	<i>Siemens 1FT6108-8AB7</i>
Moment jmenovitý/klidový:	<i>61 / 70 Nm</i>
Jmenovité otáčky:	<i>1500 otáček / min</i>
Moment setrvačnosti s brzdou:	<i>$291 \cdot 10^{-4} \text{ kg.m}^2$</i>

Moment setrvačnosti zátěže:	$245 \cdot 10^{-4} \text{ kg.m}^2$
Řídicí systém:	<i>Siemens SINUMERIK 840D</i>
Čas cyklu proudového regulátoru:	$125 \mu\text{s}$
Čas cyklu rychlostního regulátoru:	$125 \mu\text{s}$

Výsledné parametry regulátoru PI :

Zesílení:	$43,9 \text{ Nm .s / rad}$
Integrační časová konstanta:	$2,44 \text{ ms}$
Charakteristická frekvence:	232 Hz

Parametry K_P a T_n byly vypočítány pomocí symetrického optima [1]. Optimální hodnoty změřené v praktické části $K_P = 28 \text{ Nm.s/rad}$ a $T_n = 4 \text{ ms}$ odpovídají teoretickým výsledkům, mírné zhoršení obou hodnot je způsobené chováním reálného stroje zatíženého mechanickými vlivy (vůle, pružnost, rezonanční frekvence).

2. příklad – vertikální frézovací centrum VF-4525 – rotační hlava - osa C

Jedná se o rotační polohovatelnou osu, která při obrábění se nepohybuje a nemusí být tedy nijak zvlášť dynamická. Vzhledem k vysokému převodu mezi motorem a zátěží se příznivý poměr momentů setrvačnosti projevil ve stabilních charakteristikách (více v praktické části). Parametry motoru a soustavy:

Motor	<i>Siemens 1FT6044-1AF71</i>
Moment jmenovitý/klidový:	$4.3 / 5 \text{ Nm}$
Jmenovité otáčky:	$3000 \text{ otáček / min}$
Moment setrvačnosti bez brzdy:	$5,1 \cdot 10^{-4} \text{ kg.m}^2$
Moment setrvačnosti zátěže:	$1.6 \cdot 10^{-4} \text{ kg.m}^2$
Řídicí systém:	<i>Siemens SINUMERIK 840D</i>
Čas cyklu proudového regulátoru:	$125 \mu\text{s}$
Čas cyklu rychlostního regulátoru:	$125 \mu\text{s}$

Výsledné parametry regulátoru PI :

Zesílení:	$0,55 \text{ Nm .s / rad}$
-----------	----------------------------

Integrační časová konstanta: $2,44 \text{ ms}$

Charakteristická frekvence: 185 Hz

Při srovnání teoreticky vypočítaných hodnot a hodnot získaných reálným měřením ($K_P = 0,6 \text{ Nm.s/rad}$ a $T_n = 3,5 \text{ ms}$) je zřejmé, že výpočet byl správný. Při reálném uvádění stroje do provozu může být takový výpočet užitečný pro první nastavení parametrů regulátoru.

3. příklad – vertikální frézovací centrum VU-1709 – otočný stůl - osa C bez zátěže

Následující příklad bud ilustrovat rozdílnost optimálních parametrů rychlostního regulátoru otočného stolu poháněného rotačním motorem přes převod bez zátěže a se zátěží. Moment setrvačnosti zátěže se výrazně mění a podle toho by měly být upraveny konstanty K_P a T_n .

Motor	<i>Siemens 1FT6105-8AF71</i>
Moment jmenovitý/klidový:	$31 / 42 \text{ Nm}$
Jmenovité otáčky:	$3000 \text{ otáček / min}$
Moment setrvačnosti bez brzdy:	$168 \cdot 10^{-4} \text{ kg.m}^2$
Moment setrvačnosti zátěže:	$58 \cdot 10^{-4} \text{ kg.m}^2 / 200 \cdot 10^{-4} \text{ kg.m}^2$
Řídící systém:	<i>Heidenhain iTNC530</i>
Čas cyklu proudového regulátoru:	$125 \mu\text{s}$
Čas cyklu rychlostního regulátoru:	$125 \mu\text{s}$

Výsledné parametry regulátoru PI – bez zátěže:

Zesílení:	$23,1 \text{ Nm .s / rad}$
Integrační časová konstanta:	$2,0 \text{ ms}$
Charakteristická frekvence:	232 Hz

Výsledné parametry regulátoru PI – se zátěží:

Zesílení:	$37,7 \text{ Nm .s / rad}$
Integrační časová konstanta:	$2,0 \text{ ms}$
Charakteristická frekvence:	232 ms

Optimální zesílení je tedy různé pro různou hmotnost zátěže. Velké otočné stoly nebo děličky bývají zpravidla jen polohovatelné a parametry regulátoru nemusí být nastaveny

pro co nejdynamičtější stav. Rozsah hmotnosti (a momentu setrvačnosti) zátěže může být tedy velký. Pro malé otočné stoly, které jsou určeny pro souvislé obrábění, by měly být parametry regulátoru nastaveny pokud možno dynamicky.

2.6 Jednotky

Rychlostní regulátor je proporcionálně-integračního typu a základní parametry jsou konstanty zesílení K_p a integrační časová konstanta T_n . U systému Siemens Sinumerik 840D nebo Heidenhain iTNC530 jsou tyto parametry zadávány přímo ve strojních datech. Proporcionální konstanta K_p je u Siemense Sinumeriku 840D zadávána v jednotkách Nm.s/rad u rotačních motorů nebo N.s/m u motorů lineárních. U obou parametrů je tedy zahrnuta silová složka, moment síly u motorů rotačních nebo síla u motorů lineárních.

U systému Heidenhain iTNC530 je na rozdíl od Sinumeriku 840D v konstantách pro rychlostní regulátor zohledněn proud jako veličina vystupující z regulátoru rychlostního a vstupující do regulátoru proudového. Zesílení v tomto případě představuje proud a čas v jednotkách A.s. Integrační časová konstanta je zde nahrazena integračním faktorem – jednotky v A. Převod mezi jednotkami obou CNC systémů je následující:

- rotační motory - zesílení:

$$K_p (SIE) = K_p (HEI) \cdot (1/2\pi f) \cdot K_{FR} \quad [As \cdot (1/rad) \cdot Nm / A = Nm.s / rad]$$

- lineární motory – zesílení:

$$K_p (SIE) = K_p (HEI) \cdot (1/p) \cdot K_{FL} \quad [As \cdot (1/m) \cdot N / A = N.s / m]$$

- integrační časová konstanta:

$$T_n (SIE) = K_p (HEI) / T_n (HEI) \quad [A.s / A = s]$$

(K_{FR}/K_{FL} = momentová konstanta motoru [Nm / A nebo N / A], M_n = moment síly rotačního motoru [Nm], F_n = jmenovitá síla lineárního motoru [N], p = šířka pólů lineárního motoru [m]).

2.7 Parametry rychlostního regulátoru – Siemens Sinumerik 840D

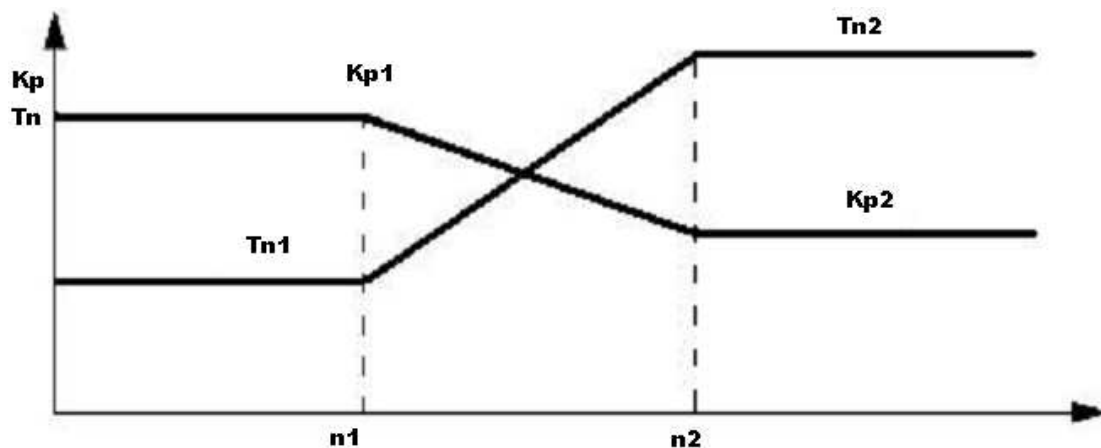
Následující odstavce obsahují parametry regulátoru rychlosti systému Siemens Sinumerik 840D, které se mohou hodit při optimalizaci stroje.

MD1407 – zesílení rychlostního regulátoru K_P	[Nm.s / rad]
MD1409 – integrační časová konstanta T_n	[s]
MD1001 – čas cyklu rychlostního regulátoru	[s]
MD1406 – typ rychlostního regulátoru	
MD1403 – aktivace adaptace rychlostního regulátoru	
MD1408 – zesílení rychlostního regulátoru K_{P2}	[Nm.s / rad]
MD1410 - integrační časová konstanta T_{n2}	[s]
MD1411 – rychlost pro adaptaci rychlostního regulátoru 1	
MD1412 - rychlost pro adaptaci rychlostního regulátoru 1	
MD12XX - nastavení proudových filtrů	

Adaptace parametrů PI regulátoru rychlosti

Ve zvláštních případech je nutné parametry PI měnit v závislosti na rychlosti. To u většiny CNC systémů lze, ve strojních parametrech je možné zadat různé hodnoty PI a otáčky motoru, kdy se parametrů změní. Např. u řídicího systému Siemens SINUMERIK jsou to tyto parametry:

MD1408, MD1410, MD1411, MD 1412



Obr. 27. Adaptace parametrů rychlostního regulátoru

2.8 Parametry rychlostního regulátoru – Heidenhain iTNC530

MP2500 – proporcionalní faktor K_p [As]

MP2510 – integrační faktor T_n [A]

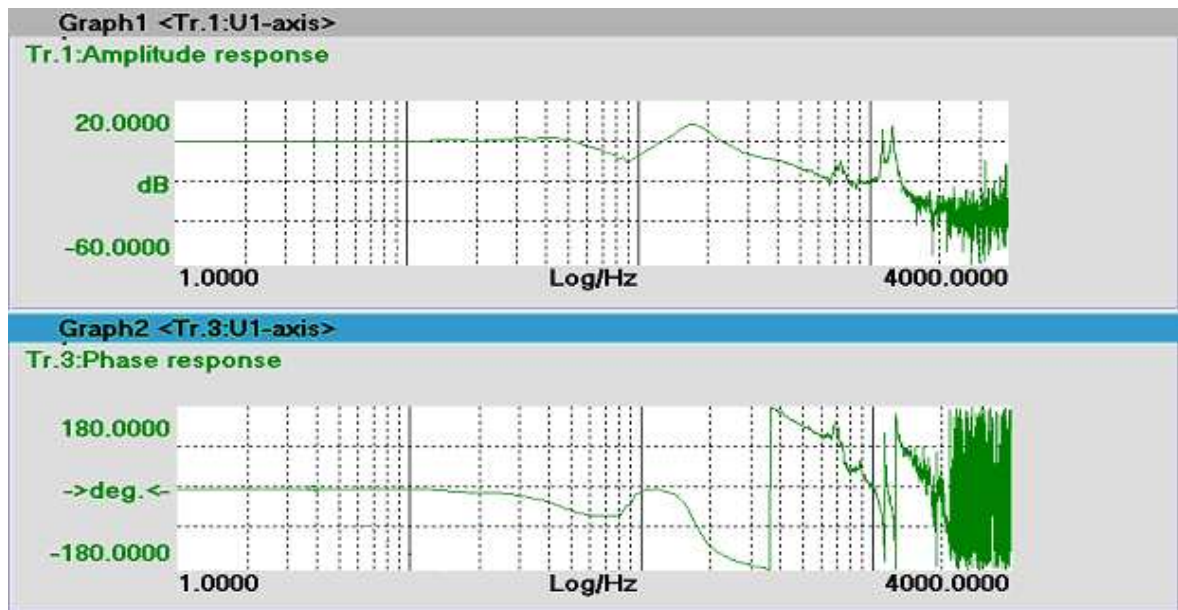
MP2520 – derivační faktor [As²]

MP2530, MP2540, MP2550, MP2560 – nastavení proudových filtrů

U systému Heidenhain iTNC530 je možné pro speciální případy v rychlostním regulátoru nastavit také derivační konstantu (derivační faktor – jednotky As²), pro většinu standardních aplikací to ale není nutné.

2.9 Optimalizace parametrů na stroji s vyšším stupněm opotřebení

Na obr. 28 je zobrazena amplitudová a fázová charakteristika lineární osy U poháněné kuličkový šroubem a ozubeným řemenem po třech letech používání.



Obr. 28. Amplitudová a fázová charakteristika opotřeбенé osy U

Právě opotřebení, zvýšení vůlí a zesílení rezonančních frekvencí nutně vede k deformaci kmitočtových charakteristik a počátku nestabilnímu chování stroje. První známkou tohoto jevu je vznik rezonancí na místech, která se nejvíce používají. Pokud se například nejvíce obrábí na stále stejném místě, rezonance a zvýšená polohová odchylka se začne projevovat právě tady. Vůle kuličkového šroubu jsou zde nejvyšší a pro omezení rezonancí nezbyvá než parametry rychlostního regulátoru omezit. Zpravidla pomůže snížení zesílení K_p ,

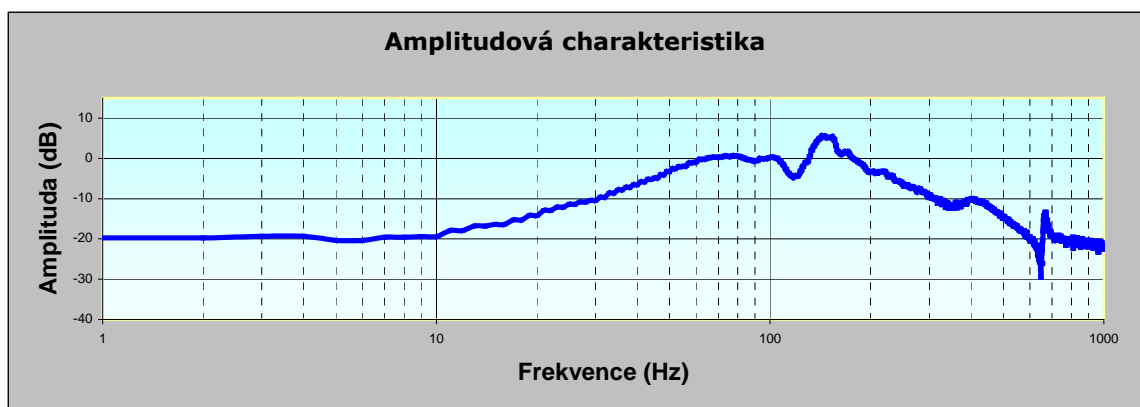
v každém případě se ale snižuje dynamika stroje. V těchto případech je výhodné použít automatické optimalizační programy, které lépe odhalí rezonanční frekvence a nastaví odpovídající filtry. Pokud se něco takového na obráběcím stroji děje, je to znamením blížící se výměny opotřebovaných dílů. Kromě kuličkový šroubů a matic se tato výměna může týkat např. ozubených řemenů.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

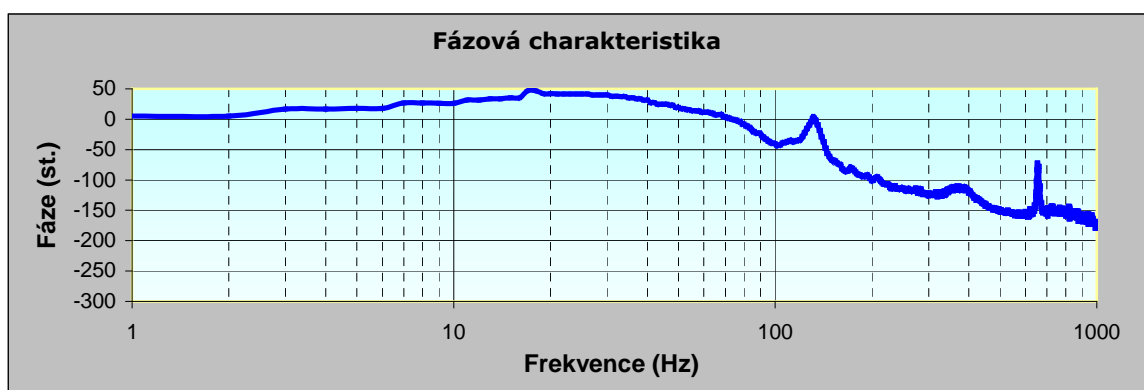
3 MĚŘENÍ KMITOČTOVÝCH CHARAKTERISTIK NA REÁLNÝCH STROJÍCH

3.1 Měření lineární osy

Měření byla provedena na svislé ose Z vertikálního frézovacího stroje. Amplitudová a fázová charakteristika na obr. 29 a 30 odpovídá počátku optimalizace, kdy integrační časová konstanta byla vyřazena z činnosti ($T_n = 200$ ms) a zesílení bylo příliš nízké ($K_P = 10$ Nm.s/rad). Šířku pásma nelze podle amplitudové charakteristiky identifikovat vůbec, její průběh při hranici 0dB je krátký a nezřetelný. Další postup by mělo být zvyšování zesílení K_P , dokud charakteristiky nepřesáhne v zadní části šířky pásma hranici 0dB. Protože už nyní je zřetelný překmit přes 0dB (na cca 150 Hz), pravděpodobně se jedná o rezonanční frekvenci některého mechanického dílu, tomu také odpovídá průběh fázové charakteristiky.



Obr. 29. Amplitudová charakteristika svislé osy Z (počátek optimalizace)



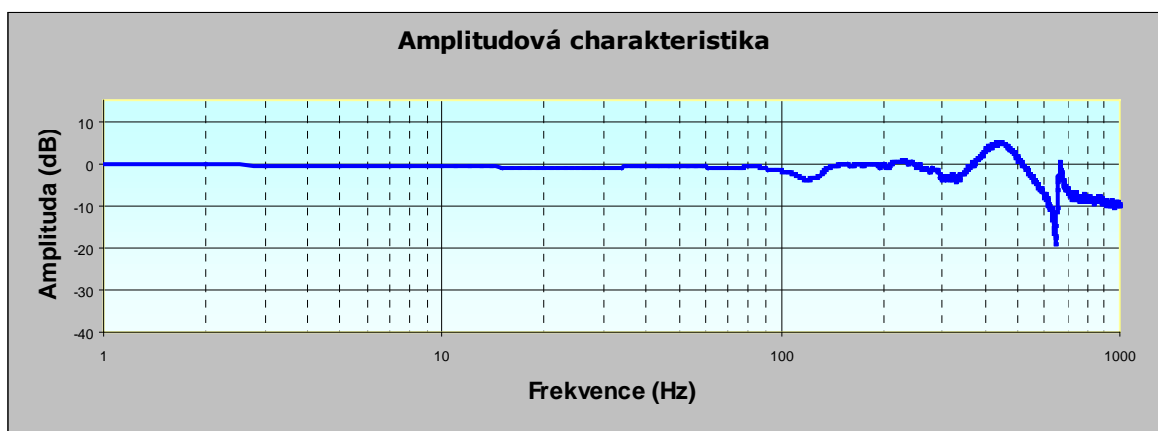
Obr. 30. Fázová charakteristika svislé osy Z (počátek optimalizace)

Dalším zvyšování zesílení K_P a následným snížením integrační časové konstanty T_n jsou získány výsledné charakteristiky. Nejsou ukázkové, ale při měření na reálných strojích jsou charakteristiky vždy více méně deformované mechanickou skladbou stroje a velmi záleží na zkušenostech technika, který měření provádí. Měření byla navíc provedena na novém stroji. Výsledné optimální parametry regulátoru jsou:

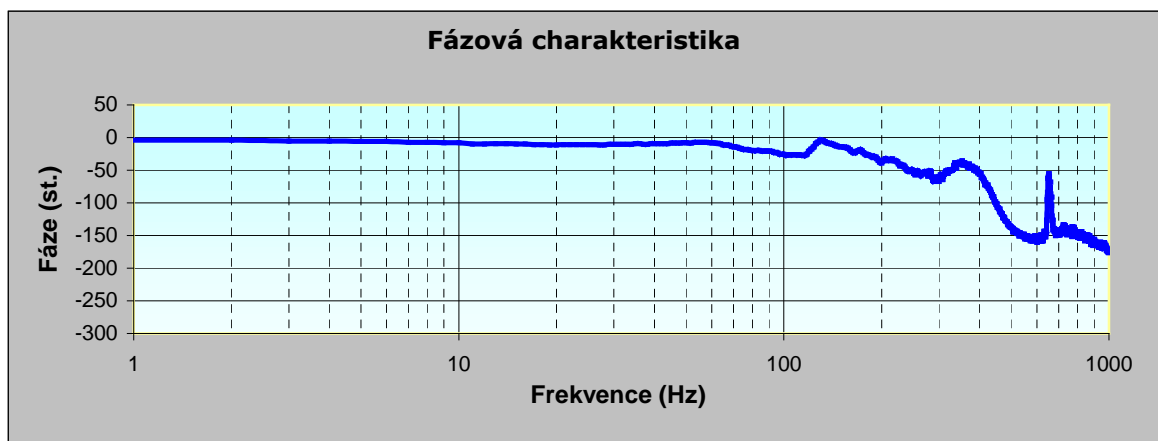
Zesílení: $K_P = 28 \text{ Nm} \cdot \text{s} / \text{rad}$

Integrační časová konstanta: $T_n = 4 \text{ ms}$

Šířka pásma : 250 Hz



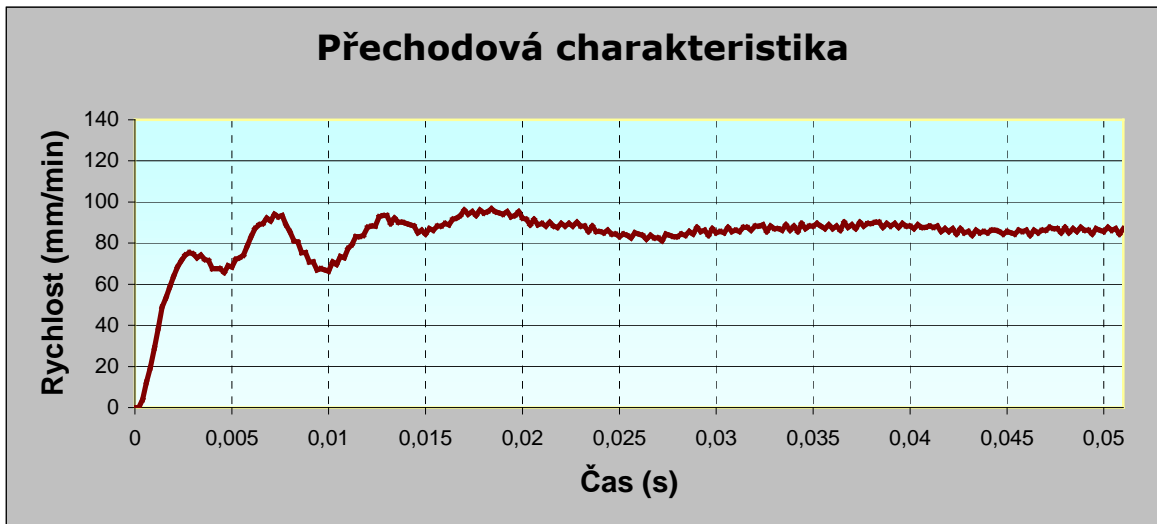
Obr. 31. Amplitudová charakteristika svislé osy Z



Obr. 32. Fázová charakteristika svislé osy Z

Odpovídající přechodové charakteristiky jsou na obrázcích 33. a 34. První charakteristika ukazuje průběh při snížených parametrech regulátoru ($T_n = 200 \text{ ms}$ a $K_P = 10 \text{ Nm} \cdot \text{s}/\text{rad}$) na začátku optimalizace. O nedostatečném nastavení parametrů K_P a T_n napovídá průběh po

ustálení, průměrná hodnota je 80 – 90 mm/min (žádaná hodnota je 100 mm/min). Druhá přechodová charakteristika odpovídá amplitudové charakteristice na obr. 31 s optimálními parametry K_P a T_n . Deformace prvního překmitu nad žádanou hodnotou je způsoben vadou v mechanické soustavě (např. vůlí) nebo některou poddimenzovanou součástí.



Obr. 33. Přechodová charakteristika svislé osy Z (počátek optimalizace)

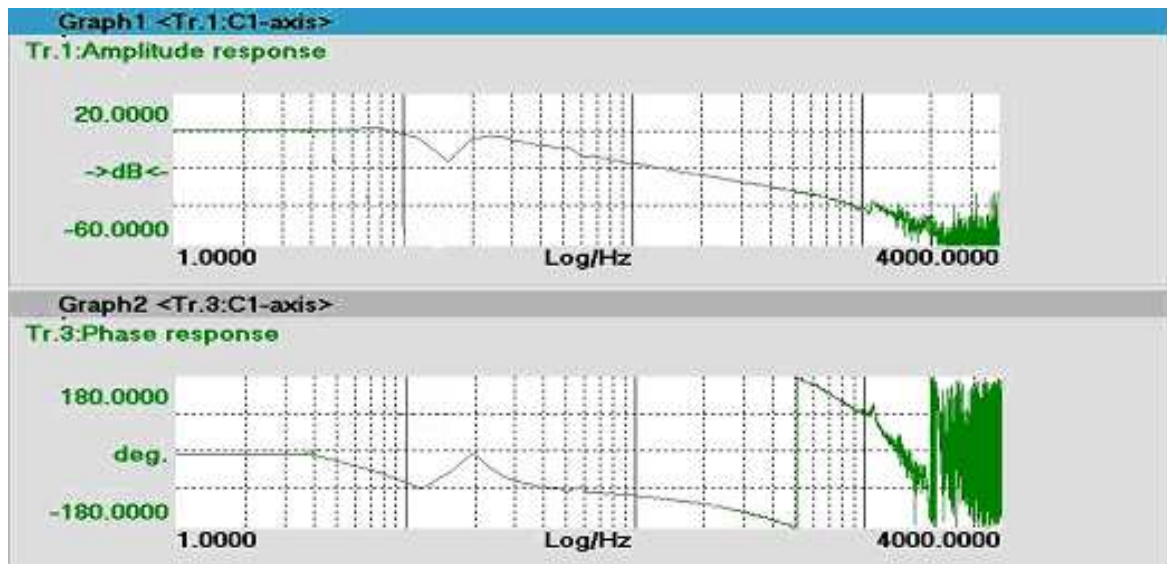


Obr. 34. Přechodová charakteristika svislé osy Z

Měření ne příliš ideální mechanické soustavy bylo zvoleno záměrně a ilustruje obvyklý průběh optimalizace na reálném stroji. Změřené charakteristiky nejsou vždy dobře čitelné, stroj musí být přesto nastaven s co nejlepšími parametry regulátoru.

3.2 Měření rotační osy

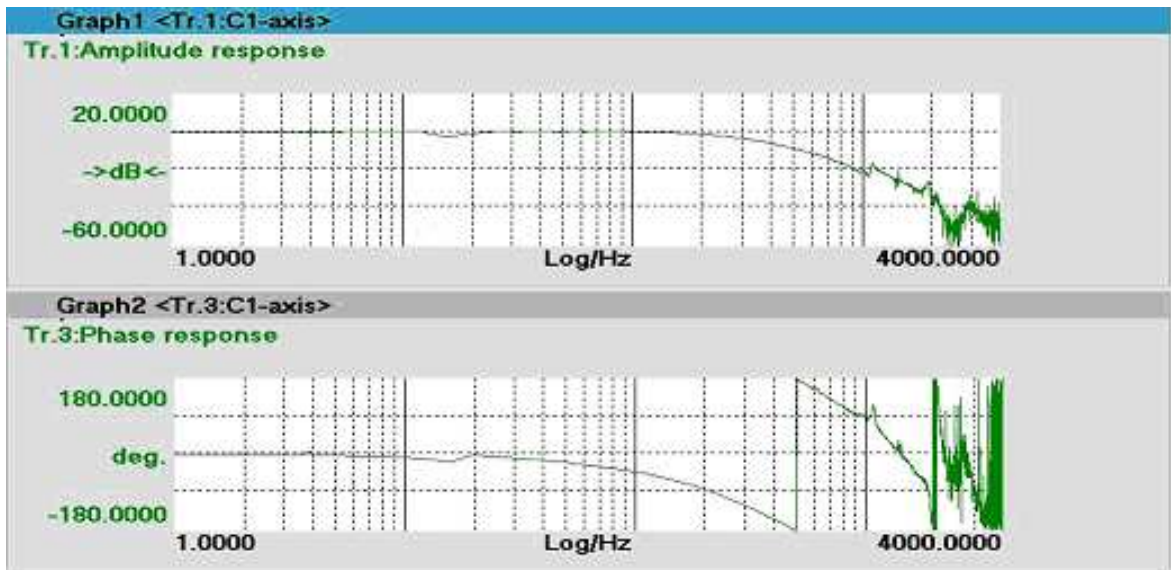
Následující měření byla provedena na rotační ose C (otočná frézovací hlava). Pro srovnání jsou uvedeny amplitudové a fázové charakteristiky při různých parametrech PI rychlostního regulátoru. Parametry pro (takřka ideální) charakteristiku byly vypočítány automaticky pomocí automatického optimalizačního software, který je součástí systému Siemens Sinumerik 840D. Změřené charakteristiky jsou pro identifikaci jednodušší než v předchozím příkladu při měření lineární osy, rotační osa C je pouze polohovatelná a mezi motorem a zátěží je vysoký převod (1:200), který příznivě ovlivňuje poměr momentů setrvačnosti.



Obr. 35. Amplitudová a fázová charakteristika rotační osy C (před optimalizací)

Zadané parametry: $K_P = 0.25 \text{ Nm.s/rad}$ $T_n = 15 \text{ ms}$

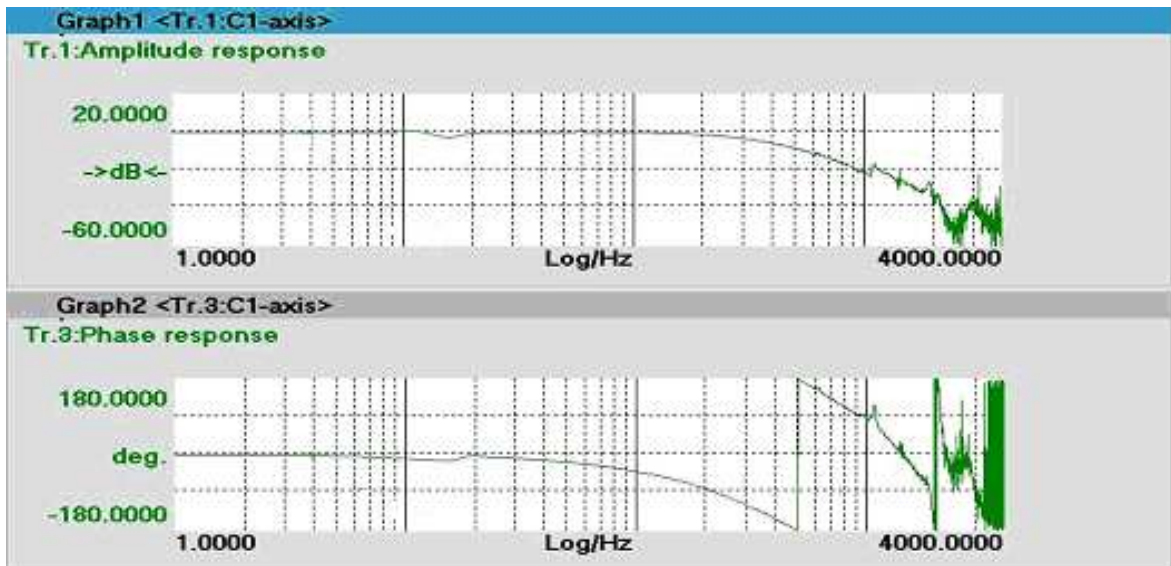
Hodnota zesílení byla pro ilustraci zvolena až příliš nízká, šířka pásma je někde mezi 10 – 20 Hz, je škoda nevyužít možnosti zvýšení parametrů a podstatně zvýšit dynamiku osy. Zesílení K_P bylo proto zvýšeno na dvojnásobek - 0.5 (obr. 36), hodnota šířky pásma se v tomto případě dá odhadnout na cca 200 Hz.



Obr. 36. Amplitudová a fázová charakteristika rotační osy C

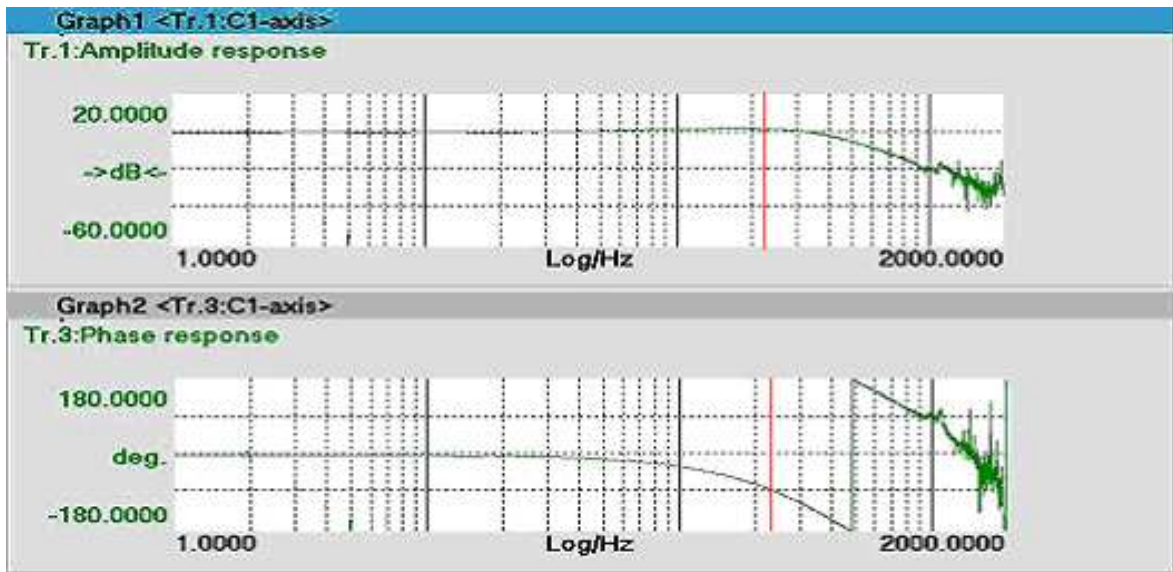
Zadané parametry: $K_P = 0.5 \text{ Nm.s/rad}$ $T_n = 15 \text{ ms}$

Snížení integrační časové konstanty T_n na 10 ms nepřineslo výraznou změnu, šířka pásma se změnila jen nepatrně (obr. 37). U obou charakteristik jsou pak patrné dvě rezonanční frekvence – první je frekvenci asi 1020Hz, druhá je na frekvenci asi 1300 Hz (běžná frekvence pro tento typ strojů způsobená některou částí stroje).



Obr. 37. Amplitudová a fázová charakteristika rotační osy C

Zadané parametry: $K_P = 0.5 \text{ Nm.s/rad}$ $T_n = 10 \text{ ms}$

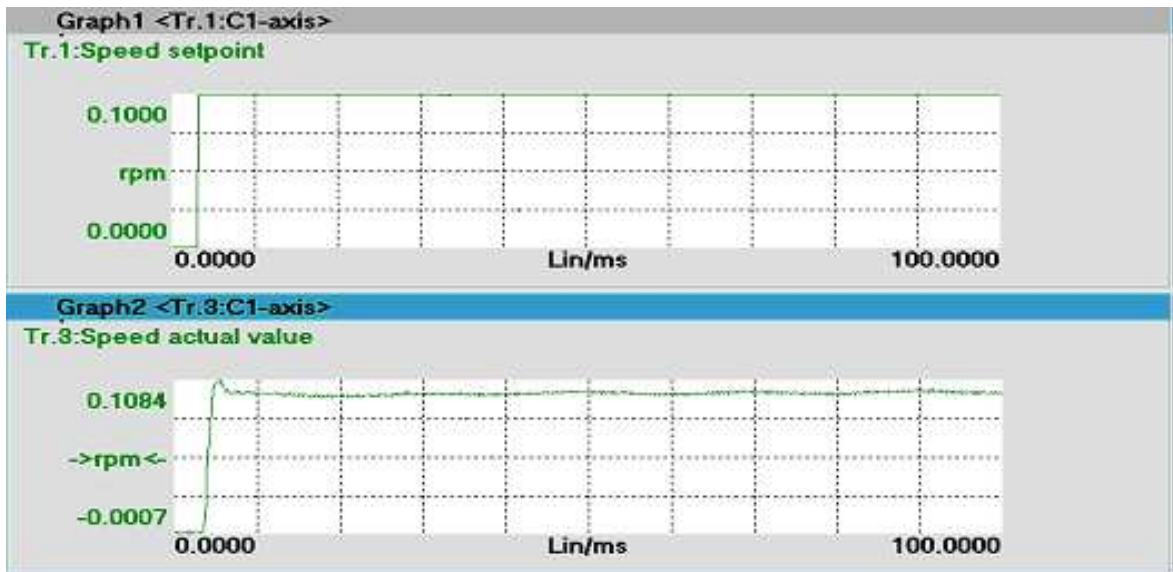


Obr. 38. Amplitudová a fázová charakteristika rotační osy C

Zadané parametry: $K_P = 0.7 \text{ Nm.s/rad}$ $T_n = 3,5 \text{ ms}$

Ukázkově vypadající amplitudová i fázová charakteristika je výsledkem automatické optimalizace parametrů rychlostního regulátoru, optimalizační program je součástí CNC systému Siemens Sinumerik 840D. V grafu je červeně naznačena charakteristická frekvence $\omega_0 = 230 \text{ Hz}$, tomu odpovídá převýšení +3dB v amplitudové charakteristice a fázový pokles -90° ve fázové charakteristice. Bohužel, ani tento mechanismus nemusí být vždy ideální, v tomto případě musela být hodnota K_P ještě snížena na 0.6 Nm.s/rad , jinak se při pohybu osy ozývalo z motoru pískání ukazující na příliš vysoké zesílení – mez stability. V takových případech se osvědčilo na výstup rychlostního regulátoru nastavit filtr dolní propusti na vysoké frekvenci (např. 1000-2000 Hz) a s relativně malým útlumem (max. -3dB). Motor lze potom provozovat s vyšším zesílením bez pískání.

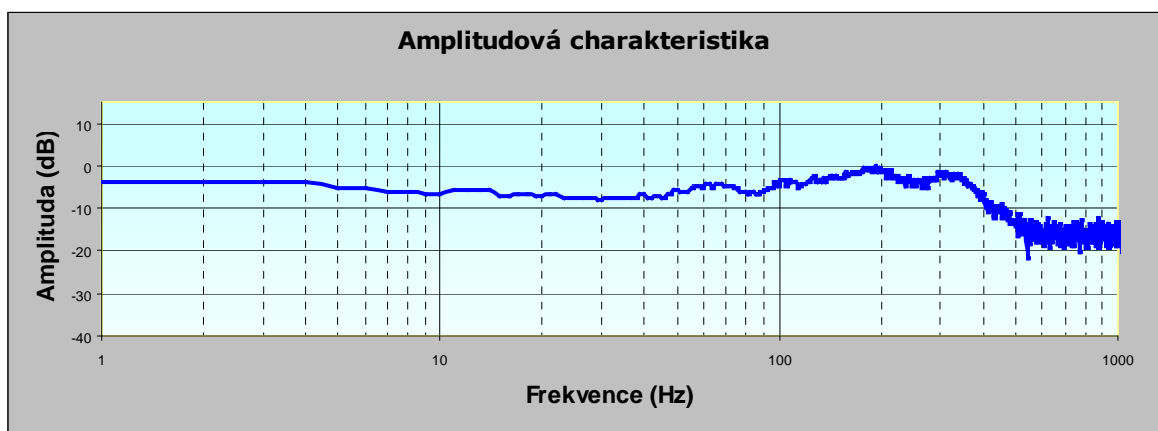
Odpovídající přechodová charakteristika je uvedena na obr. 39. Žádaná hodnota je 0.1 RPM, průběh změřené hodnoty je ukázkový s jedním překmitem nad žádanou hodnotou.

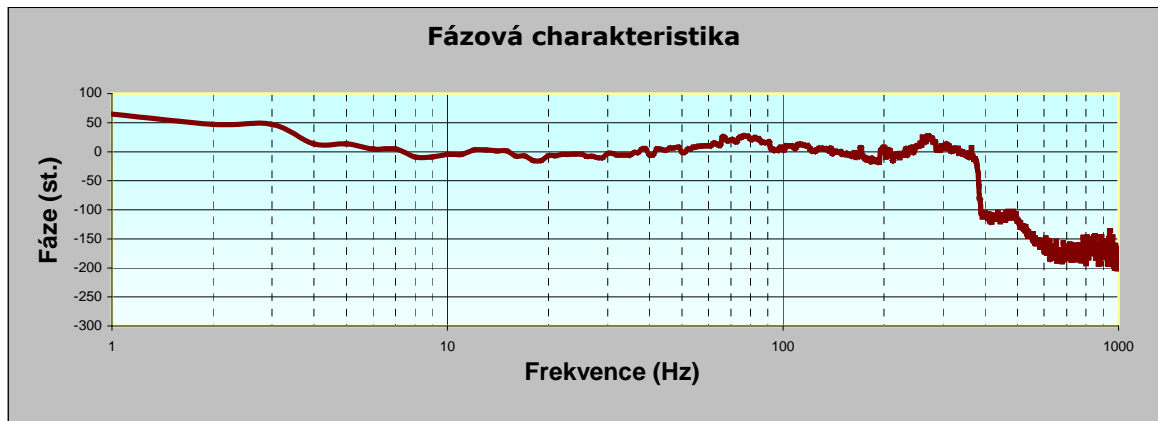


Obr. 39. Přejchodová charakteristika rotační osy C

3.3 Měření stroje s vyšším stupněm opotřebení

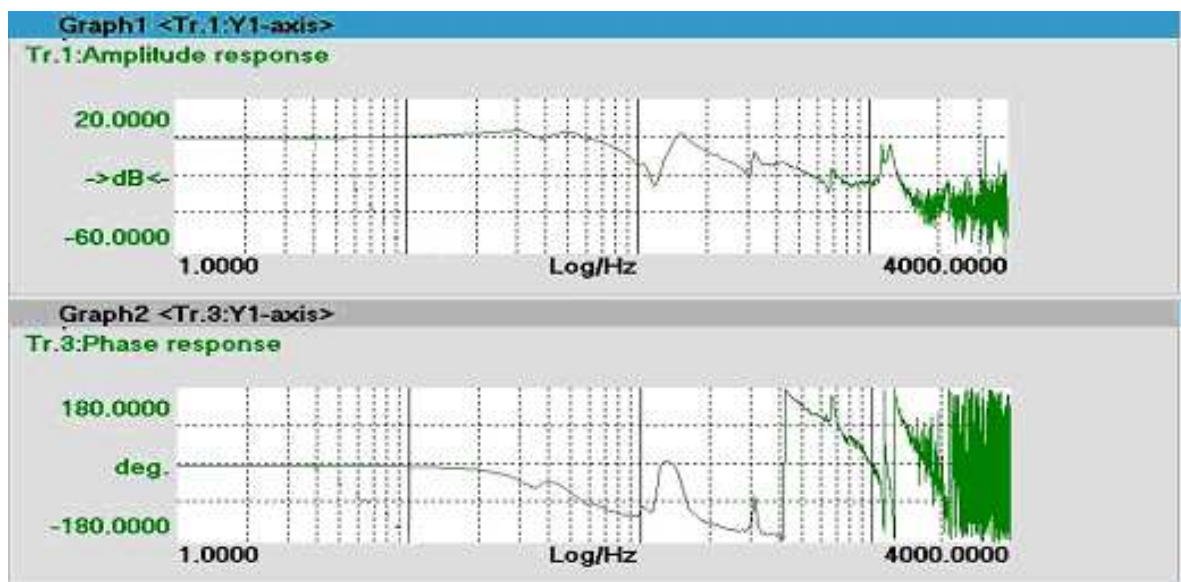
Příkladem změny kmitočtových charakteristik po cca roce používání stroje mohou být charakteristiky osy Y vertikálního obráběcího stroje (obr. 40). U amplitudové i fázové charakteristiky je patrná deformace charakteristiky, také se snížila šířka pásma, podle amplitudové charakteristiky ji lze odhadnout asi na 200 Hz. Podle průběhu fázové charakteristiky již nelze vůbec šířku pásma identifikovat. Vlastnosti mechanické soustavy se budou postupně zhoršovat, pravděpodobně budou muset být upraveny parametry K_P a T_n a nakonec bude nezbytné některé mechanické komponenty vyměnit. Podle způsobu používání stroje je únosná životnost těchto komponentů cca 2-6 let.





Obr. 40. Amplitudová a fázová charakteristika osy Y – Trimill VU-1709

Na obr. 41 je uvedená amplitudová a fázová charakteristika osy Y poháněné rotujícím kuličkovým šroubem přes řemenový převod 1:2 změřená po cca dvou letech provozu. Vzhledem ke složitosti charakteristik je v tomto případě vhodné pro úpravu parametrů použít automatické optimalizační programy řídicích systémů. I tak s rostoucím opotřebením se bude pravděpodobně dynamika stroje postupně omezovat, zesílení K_p bude sníženo, čas T_n se bude prodlužovat. Šířka pásma je v tomto případě malá - cca 70 Hz, charakteristiky jsou typické pro velké těžké stroje s malou dynamikou.



Obr. 41. Amplitudová a fázová charakteristika osy Y – Trimill VF-4525 – přes řemenový převod

3.4 Vlastní frekvence stroje a použití filtrů

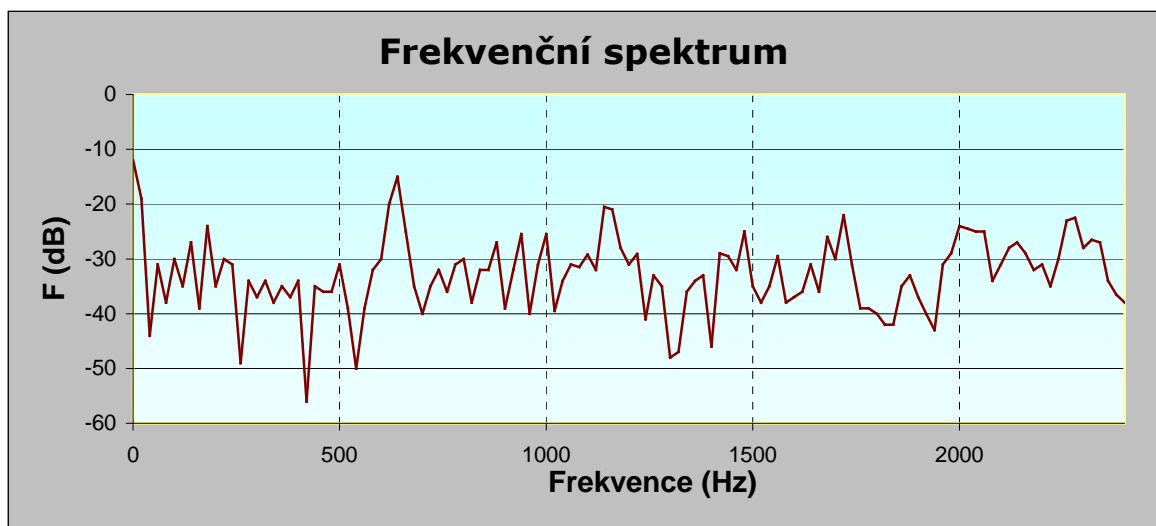
Určení rezonančních frekvencí stroje je možné několika způsoby. Velmi dobře lze zjistit tyto frekvence podle amplitudové charakteristiky. Frekvenční rezonance jsou různé špičky převyšující vyrovnanou charakteristiku. Dokonalejší způsob je měření frekvenčního spektra pomocí FFT analýzy. Některé pomocné programy toto měření umožňují, výsledkem je přesné frekvenční spektrum, podle kterého lze filtry nastavit snadněji. Podle průběhu těchto frekvencí je možné pro jejich potlačení použít filtr dolní propust nebo pásmovou zadrž.

Dolní propust

V případě, že známe předpokládanou šířku pásma, ve které budeme danou osu provozovat, vyšší frekvence lze ztlumit za použití filtru s dolní propustí. Stejně tak se dá tento typ filtru použít pro nepřehledné spektrum více frekvencí, které chceme ztlumit, především v horní části frekvenčního spektra.

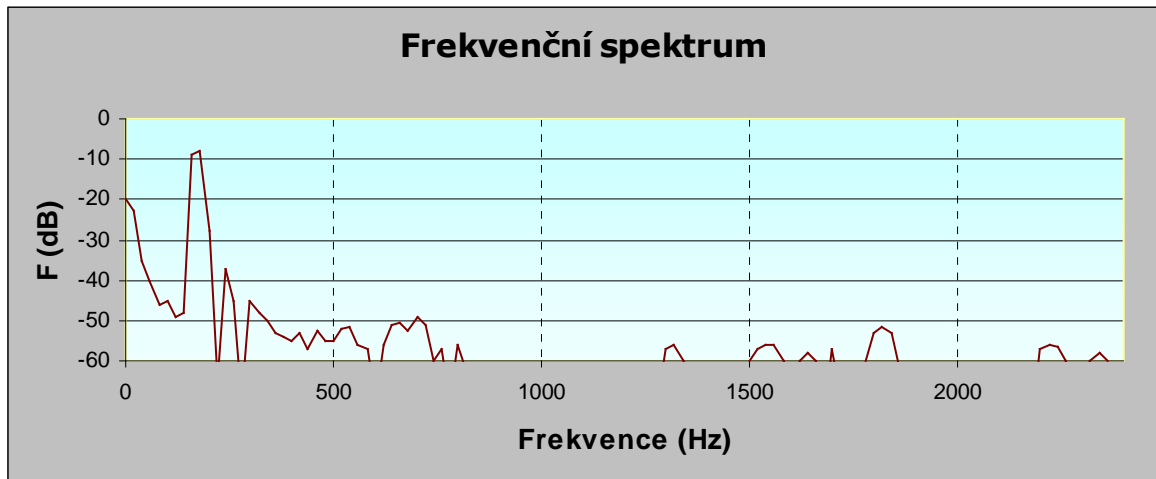
Pásmová zadrž

Pro zřetelně definované rezonanční špičky je vhodné použít dolní propust. Pro správné nastavení filtrů se musí definovat frekvence filtru, jeho šířka a útlum.



Obr. 42. Frekvenční spektrum bez použití filtrů

Na obrázku 42. je uvedené frekvenční spektrum lineární osy Y vertikálního frézovacího centra bez použití filtrů. Na frekvenci cca 700 Hz je patrná rezonance.

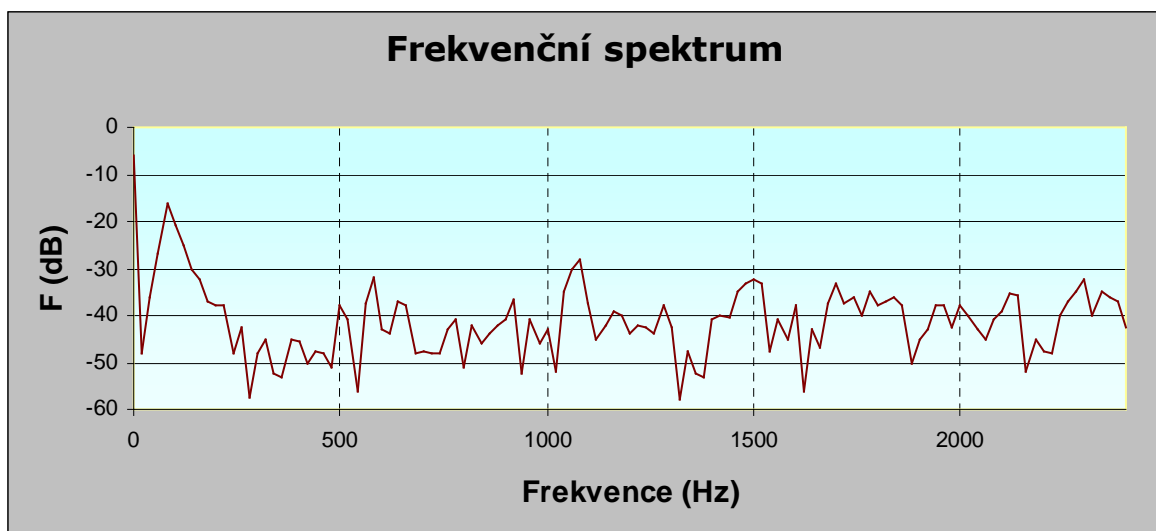


Obr. 43. Frekvenční spektrum s jedním filtrem – dolní propustí

Na obrázku 43. je frekvenční spektrum stejné osy Y při použití filtru dolní propusti na frekvenci 1000 Hz s útlumem 3 dB. Použití těchto filtrů sice výrazně omezuje frekvence nad 800 Hz, zároveň ale zesiluje frekvence o hodnotě 200 Hz a blíží se tak k mezi stability. Další zvyšování útlumu způsobilo zastavení stroje poruchou od vysoké polohové odchylky při rezonanci. Rezonance v této oblasti jsou navíc přímo v oblasti obrábění.

Jiných výsledků lze dosáhnout při použití automatického optimalizačního programu (obr.44). Na stejném stroji byly použity následující filtry:

1. Pásmová zadrž: 371 Hz, šířka 300 Hz, útlum 6dB
2. Pásmová zadrž: 781 Hz, šířka 700 Hz, útlum 6dB



Obr. 44. Frekvenční spektrum se dvěma filtry (dolní propust)

Cílem použití filtrů je dosažení pokud možno co nejvyrovnanějšího frekvenčního spektra bez rezonančních frekvencí. Podle zkušeností je v praxi ještě únosné použití maximálně dvou filtrů, další filtry zpravidla způsobí zdeformování kmitočtové charakteristiky na jiné frekvenci a velmi obtížné nastavování hodnot K_P a T_n . Stejně obezřetně je nutné přistupovat k aktivaci filtru dolní propusti. V praxi se osvědčilo použití těchto filtrů především na vyšších frekvencích (1000 – 2000 Hz) s malým útlumem. Pro nižší frekvence nebo při vyšším útlumu zpravidla dochází k velkému nárůstu dalších frekvencí v nízké oblasti a chování rychlostního regulátoru se blíží k mezi stability (obr. 43). Univerzální postup pro nastavování filtrů neexistuje, každý stroj se chová trochu jinak a je dobré vyzkoušet různé kombinace.

4 VYHODNOCENÍ

4.1 Vyhodnocení zásad pro optimalizaci

Následující přehled shrnuje poznatky diplomové práce získané především při praktických zkouškách, měření a uvádění strojů do provozu. Některé body se týkají nejen nastavení rychlostního regulátoru, ale popisují nastavení i dalších regulačních obvodů strojů s CNC řízením.

- **Zásady při konstrukci strojů** – především ve fázi projektu nového stroje je nutné zvážit navrženou mechanickou skladbu stroje, především komponenty, které mohou ovlivňovat (brzdit, tlumit) pohyb suportu. Všechny tyto zdánlivé maličkosti mohou více méně ovlivňovat a omezovat optimální nastavení rychlostního regulátoru.
- **Návrh pohonové části** – použití nesprávného motoru a nesladění hodnot momentů setrvačnosti motoru a zátěže může znamenat snížení předpokládané dynamiky stroje a jeho nestabilní chování. Podobně je to s návrhem kuličkového šroubu a dalších převodů, poddimenzování jejich parametrů se vždy podílí na zhoršení parametrů strojů.
- **Teoretický výpočet parametrů K_P a T_n** – teoretický výpočet PI parametrů rychlostního regulátoru je užitečné provést před optimalizací na reálném stroji, je možné tak předejít trhavým pohybům stroje při neuváženém zadání *příliš dynamických* parametrů.
- **Měření amplitudové a fázové charakteristiky** – parametry rychlostního regulátoru lze ve frekvenční doméně výhodně analyzovat pomocí amplitudové a fázové charakteristiky. Navíc je zde možné detekovat rezonanční frekvence a kontrolovat nastavení filtrů.
- **Měření přechodové charakteristiky** – jinou alternativou pro nastavení parametrů regulátoru může být vyhodnocení v časové doméně pomocí přechodové charakteristiky. Ta může být různě deformovaná mechanickou skladbou zátěže, takže pro identifikaci charakteristik často hodně záleží na zkušenostech.
- **Měření rezonančních frekvencí** – nedílnou součástí optimalizace parametrů je potlačení rezonančních frekvencí stroje pomocí filtrů. To nebývá vždy jednoduché,

především u strojů s vyšším stupněm opotřebení je obtížné zvolit optimální typ filtru a jeho parametry.

- ***Použití pomocných programů*** – součástí některých CNC systémů jsou programy, které slouží pro automatickou optimalizaci parametrů rychlostního regulátoru. S jejich pomocí lze proces optimalizace výrazně urychlit. Některé programy je možné používat přímo na laptopu a naměřená data dále zpracovávat.

ZÁVĚR

Regulátor rychlosti je jen část složitého regulačního řetězce pro řízení obráběcích strojů, nastavování jeho parametrů, ale v praxi zpravidla vyžaduje nejvyšší úsilí a nejvíce času.

Úkolem diplomové práce bylo popsat rychlostní smyčku CNC regulace a stanovit zásady optimalizace jejích parametrů. Tato témata byla popsána především z praktického hlediska, na konkrétních strojích, ať už nových nebo opotřebených. Výsledky práce je tedy možno charakterizovat takto:

- Především z praktického hlediska byl proveden stručný rozbor rychlostní smyčky na konkrétních strojích.
- Byly stanoveny zásady pro optimalizaci – v práci je uveden návrh postupu vyhodnocení parametrů od stádia konstrukce stroje až po závěrečnou optimalizaci parametrů regulátoru.
- Bylo uvedeno několik teoretických příkladů výpočtu zesílení K_p a integrační časové konstanty T_n , výsledky pak byly srovnány s měřením na reálném stroji. V některých případech se teoretické hodnoty blížily výsledkům získaným při identifikaci změřených charakteristik a potvrdilo se, že předběžné výpočty mohou částečně napovědět pro nastavení počátečních parametrů, především u nových strojů. Některé výpočty však naměřeným výsledkům neodpovídaly, optimalizaci parametrů K_p a T_n tedy nelze provést teoreticky, ale vždy musí být provedena potřebná měření.
- Byla provedena měření kmitočtových i přechodových charakteristik rychlostního regulátoru a výsledky byly srovnány s teoretickými výpočty – měření ukázala, že naměřené charakteristiky mají často daleko k těm ideálním-učebnicovým a často není jednoduché je identifikovat a najít optimální parametry.
- V práci byly zahrnuty osobní postřehy a zkušenosti z praxe, ty pak společně s měřením v praktické části i s teoretickým popisem ilustrují postupy, které se při uvádění strojů do provozu nejvíce osvědčily.

Záměrem této diplomové práce bylo pokusit se srozumitelně uvést souvislosti, které s funkcí a nastavováním rychlostního regulátoru souvisí a poskytnout tak ucelený návod pro praktické použití. Pokud se to alespoň trochu podařilo, pak měla práce smysl.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

Speed controller is only one part of a complicated regulation chain of machine tool control, but the setting of its parameters in practices is most difficult. The influence of mechanical system and availability of oscillation frequencies often means restrictions of control parameters.

The aim of this diploma thesis was to shortly describe the speed controller loop and to determine basics for parameters optimization. These points were set out in particular at new as well as at worn machines. The summarized results of the thesis are:

- Brief analysis of speed controller loop were done at the particular types of machines.
- The rules of optimization – there are mentioned the parameters evaluation procedure from theoretical design up to end of optimization.
- Examples of calculation parameters K_P and T_n and its results were compared to measurements at the real machines. As a result - theoretical calculation can not substitute real measurement, this optimization must be always performed.
- Measurement of speed controller frequency responses and step responses and its results were compared with theoretical calculations. Measuring demonstrated that mostly it is not easy to correctly identify characteristics and to find optimal parameters.
- Personal experiences were also included in this thesis, mentioned procedures of parameters optimization illustrate well-proven methods.

Aim of this thesis was to introduce function and setting up parameters of speed controller and to provide compact guide for practical usage.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] H. Gross, J. Hamman, G. Wiegartner: Electrical Feed Drives in Automation, SIEMENS, Publics MCD Corporate Publishing 2001
- [2] Petr Noskievič: Modelování a identifikace systémů, Montanex a.s. 2001
- [3] Ivan Švarc: Automatizace - automatické řízení, VUT v Brně 2005
- [4] Siemens SIMODRIVE 611D, Planning guide drive converter 02-2003
- [5] Siemens SINUMERIK 840D, Description of functions – Basic machine 03-2004
- [6] Technical manual iTNC530, Heidenhain 2006
- [7] Schmid a spol.: Řízení a regulace pro strojírenství a mechatroniku, Sobotáles 2005
- [8] Hans B. Kief: NC/CNC Handbuch 2005/2006, Hanser 2005
- [9] Doc. Ing. Pavel Souček, DrSc, Ing. Antonín Bubák: Vysoce dynamické pohony posuvů obráběcích strojů, ČVUT Praha, Fakulta strojní 2002
- [10] Směry vývoje obráběcích strojů - sborník k semináři, ČVUT Praha, Fakulta strojní 2002
- [11] Ing. Jan Skalla, CSc: Návrh a dimenzování polohových servomechanismů obráběcích strojů, Technická universita v Liberci 1995
- [12] Siemens SIMODRIVE 611Digital, SINUMERIK 840D/810D, Drive function 10-2004
- [13] www.siemens.com
- [14] www.heidenhain.com
- [15] www.wikipedia.cz, www.wikipedia.com
- [16] www.nist.gov
- [17] www.jobs.it
- [18] www.trimill.cz
- [19] www.ktr.com

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

NC	Numerical Control (<i>číslicové řízení</i>)
CNC	Computerized Numerical Control (<i>počítačově číslicové řízení</i>)
K_v	Servo Gain Factor (<i>zesílení polohového regulátoru</i>)
1 V _{pp}	1 Volt peak/peak (<i>napěťová úroveň 1 Volt“ špička/špička“</i>)
EnDat	Encoder–Data–Interface (<i>obousměrný synchronní sériový interface</i>)
FFT	Fast Fourier Transformation (<i>rychlá Fourierova transformace</i>)
MD	Machine data (parametry Siemens)
MP	Machine data (parametry Heidenhain)
RPM	Revolutions per minute (otáček za minutu)
PI	Proporcionálně – integrační (člen)
K_p	Zesílení rychlostního regulátoru
T_n	Integrační časová konstanta rychlostního regulátoru
M_n	Moment síly motoru jmenovitý
M_0	Moment síly motoru klidový
M_{max}	Moment síly motoru maximální
J_M	Moment setrvačnosti motoru
J_S	Moment setrvačnosti kuličkového šroubu
J_Z	Moment setrvačnosti zátěže
v	Rychlost
a	Zrychlení
rad	Radiány
rad.s ⁻¹	Radiány za sekundu
k	Tuhost
dB	Decibel (jednotka bezrozměrného podílu v logaritmických jednotkách)

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Pohony se šroubem a převody (Trimill VF4525[18]).....	10
Obr. 2. Stroj s pohonem přímých motorů (JOBS Linx Blitz [17]).....	11
Obr. 3. Momentová charakteristika synchronního motoru	14
Obr. 4. Zjednodušený model lineární osy	16
Obr. 5. Amplitudová a fázová charakteristika P-T ₂ členu (Matlab)	17
Obr. 6. Přechodová charakteristika P-T ₂ členu (Matlab)	18
Obr. 7. Obecné schéma nadřazené regulace.....	19
Obr. 8. Amplitudová a fázová charakteristika proudového regulátoru.....	19
Obr. 9. Amplitudová a fázová charakteristika polohového regulátoru	20
Obr. 10. Komponenty v řetězci rychlostního regulátoru.....	21
Obr. 11. Různé koncepce CNC systémů.....	22
Obr. 12. Amplitudová a fázová charakteristika motoru Siemens 1FT6108	23
Obr. 13. 2 Synchronní servomotory nové řady 1FT7 (Siemens [13]).....	24
Obr. 14. 2 Snímač otáček motoru (ROD1387 – Heidenhain[14])	24
Obr. 15. Spojka motoru a obráběcím stroji (Rotex [19]).....	26
Obr. 16. Kmitočtová charakteristika rychlostního regulátoru svislé osy Z s převodem ozubeným řemenem.....	27
Obr. 17. Kuličkový šroub na obráběcím stroji.....	28
Obr. 18. Kabelový řetěz na obráběcím stroji	29
Obr. 19. Zjednodušené blokové schéma regulace obráběcího stroje	29
Obr. 20. Dopředné řízení rychlosti – blokové schéma.....	31
Obr. 21. Proudové filtry řídicího systému Siemens Sinumerik 840D	32
Obr. 22. Gryf rychlosti a zrychlení – Příklad 1	34
Obr. 23. Moment setrvačnosti motoru a zátěže	35
Obr. 24. Měření otevřeného a uzavřeného regulačního obvodu	38
Obr. 25. Optimálně nastavená amplitudová charakteristika	39
Obr. 26. Optimálně nastavená přechodová charakteristika.....	39
Obr. 27. Adaptace parametrů rychlostního regulátoru.....	44
Obr. 28. Amplitudová a fázová charakteristika opotřeбенé osy U	45
Obr. 29. Amplitudová charakteristika svislé osy Z (počátek optimalizace)	48
Obr. 30. Fázová charakteristika svislé osy Z (počátek optimalizace).....	48

Obr. 31. Amplitudová charakteristika svislé osy Z.....	49
Obr. 32. Fázová charakteristika svislé osy Z	49
Obr. 33. Přejchodová charakteristika svislé osy Z (počátek optimalizace)	50
Obr. 34. Přejchodová charakteristika svislé osy Z.....	50
Obr. 35. Amplitudová a fázová charakteristika rotační osy C (před optimalizací).....	51
Obr. 36. Amplitudová a fázová charakteristika rotační osy C	52
Obr. 37. Amplitudová a fázová charakteristika rotační osy C	52
Obr. 38. Amplitudová a fázová charakteristika rotační osy C	53
Obr. 39. Přejchodová charakteristika rotační osy C.....	54
Obr. 40. Amplitudová a fázová charakteristika osy Y – Trimill VU-1709	55
Obr. 41. Amplitudová a fázová charakteristika osy Y – Trimill VF-4525 – přes řemenový převod	55
Obr. 42. Frekvenční spektrum bez použití filtrů.....	56
Obr. 43. Frekvenční spektrum s jedním filtrem – dolní propustí.....	57
Obr. 44. Frekvenční spektrum se dvěma filtry (dolní propust).....	57
Obr. 45. Gryf rychlosti a zrychlení – Příklad 2.....	68
Obr. 46. Gryf rychlosti a zrychlení – Příklad 3	69

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA 1: <i>Vliv ryvu na zrychlení – příklad 2</i>	68
PŘÍLOHA 2: <i>Vliv ryvu na zrychlení – příklad 3</i>	69

PŘÍLOHA 1: Vliv ryvu na zrychlení – příklad 2

Zadané hodnoty:

Posuv při obrábění: 10 m/min^{-1} (0.166 m.s^{-1})

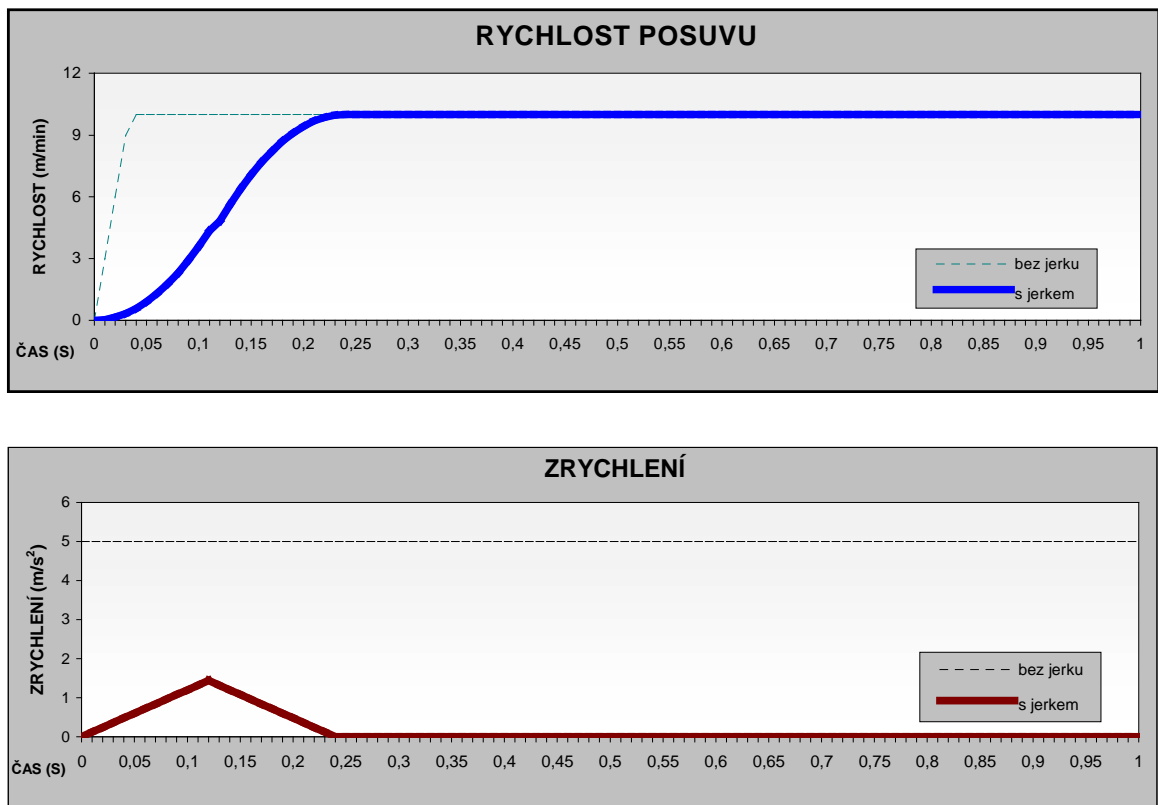
Maximální zadané zrychlení: 5 m.s^{-2}

Maximální zadaný jerk: 12 m.s^{-3}

Dosažitelné hodnoty:

Maximální dosažitelné zrychlení: 1.44 m.s^{-2}

Průměrné zrychlení: 0.69 m.s^{-2}



Obr. 45. Gryf rychlosti a zrychlení – Příklad 2

Zadání příkladu 2 je podobné jako v příkladě 1, hodnota ryvu byla ještě snížena na 12 m.s^{-3} . Náběh rychlosti je ještě více pozvolnější a maximální dosažitelné zrychlení je pouze $1,44 \text{ m.s}^{-2}$. Jak je patrné z časové osy, významně se prodlužuje čas obrábění.

PŘÍLOHA 2: Vliv ryvu na zrychlení – příklad 3

Zadané hodnoty:

Posuv při obrábění: 15 m/min^{-1} (0.25 m.s^{-1})

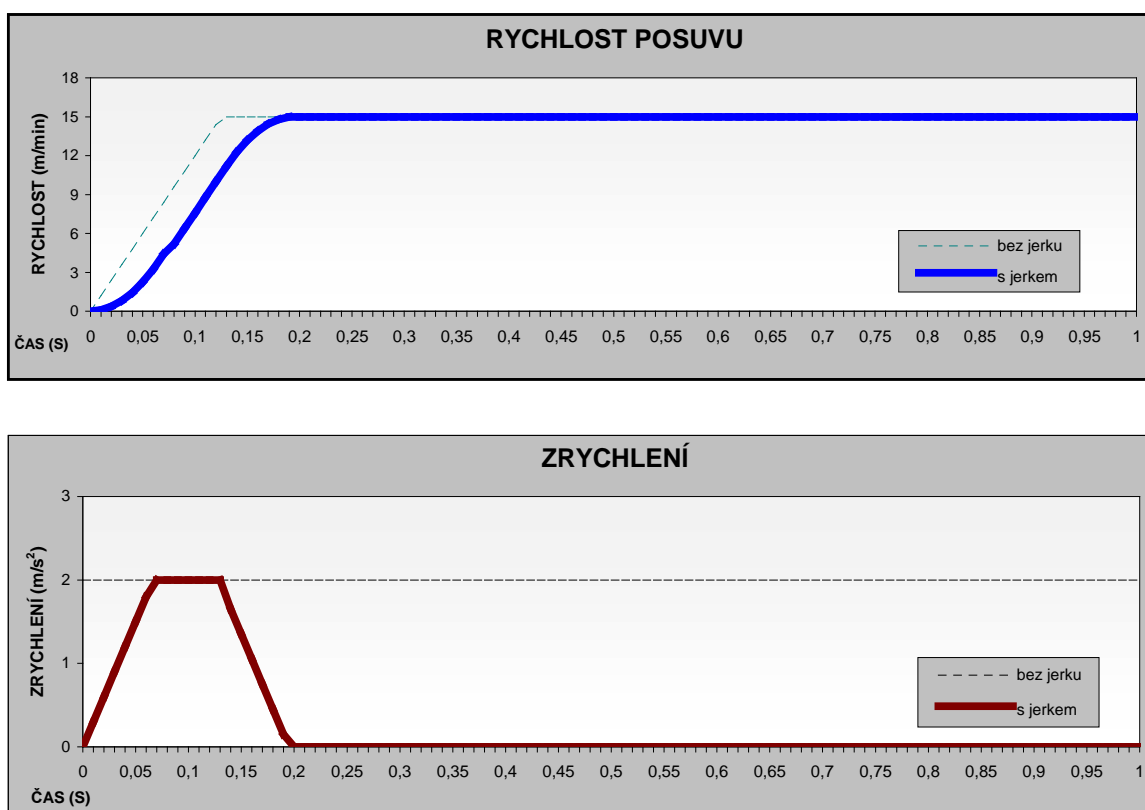
Maximální zadané zrychlení: 2 m.s^{-2}

Maximální zadaný jerk: 30 m.s^{-3}

Dosažitelné hodnoty:

Maximální dosažitelné zrychlení: 2.00 m.s^{-2}

Průměrné zrychlení: 1.09 m.s^{-2}



Obr. 46. Gryf rychlosti a zrychlení – Příklad 3

Příklad 3 znázorňuje spíše vysokorychlostní dynamické obrábění s poměrně ostře nastavenými parametry. Při dosažení zadaného posuvu 15 m.min^{-1} bude dosaženo i hodnoty zadaného zrychlení 2 m.s^{-2} .