

VYUŽITÍ MATLABU PŘI ŘÍZENÍ VYSOCE DYNAMICKÝCH POHONŮ NC OBRÁBĚCÍCH STROJŮ

Pavel S o u č e k

Ústav výrobních strojů a mechanismů
Strojní fakulta ČVUT v Praze

1. Požadavky na současné NC obráběcí stroje

Nastupující technologie vysokorychlostního obrábění kovů (tzv. HSC - High-Speed-Cutting) je založena na vynikajících vlastnostech nových materiálů řezných břitů. Například kubický nitrid bóru má srovnatelnou tvrdost s diamantem a přitom vyšší teplotní odolnost. Úběr třísky je možný při vysoké rychlosti a děje se někdy i za jejího červeného žáru, tedy s menší potřebnou řeznou silou. Jsou již známy aplikace obrábění ložiskových ocelí po zakalení a bez nutného chlazení řeznou kapalinou (tzv. H²SC - suché a tvrdé obrábění). Přitom dosažená kvalita povrchu již nevyžaduje broušení [3].

Moderní souvisle řízené frézovací stroje pro tyto technologie jsou vybaveny pohony vřeten s otáčkami nástroje až 60000/min. Pohony posuvů umožňují pracovní rychlosti suportů při frézování 0.5 – 1 m/s, aniž by utrpěla přesnost obrábění, která je požadována v setinách až tisícinách mm (na druhé straně je ale požadována minimální rychlost posuvu v desetínách milimetrů za minutu). Rychloposuvy bývají až 2 m/s a dosažitelná zrychlení a zpomalení suportů dosahují 5g. S takovými vlastnostmi strojů je možný velký úběr materiálu zvláště u součástí v leteckém průmyslu, kde se např. z duralového polotovaru nosníku křídla musí odebrat 90 – 95% původního objemu (na třísky se přitom promění až 6 litrů materiálu za minutu!). Je třeba si uvědomit, že fyzikální hranice tvrdosti řezného břítu sice existuje (diamant), hranice řezné rychlosti však nikoliv, takže honba za přesností obrábění a vyšším úběrem materiálu bude dále pokračovat. Je zřejmé, že klasické rotační servopohony kombinované s pohybovými šrouby jsou na konci svých možností. Technologie HSC, charakterizovaná vysokou dynamikou a malými řeznými silami, je ušitá na míru pro lineární pohony posuvů.

Způsob řízení lineárních elektromotorů vychází z regulačních algoritmů motorů rotačních, kde se osvědčuje kaskádní regulace (nadřazená polohová zpětná vazba, vnitřní rychlostní a posléze proudová zpětná vazba, obě poslední s PI-regulátory). Důležitou změnu však doznalo místo, odkud je odvozena rychlostní zpětná vazba. Dříve to byl rotační snímač na hřídeli motoru, u lineárních motorů ale jiný snímač než polohový na suportu není k dispozici, takže nezbyvá než rychlost odvodit z jeho signálu, nejčastěji derivací. Někdy se dokonce používá i druhá derivace polohy pro akcelerační zpětnou vazbu, která bývá umístěna uvnitř smyčky rychlostní.

Poznámka: Technologické požadavky pro řízení polohy by sice bylo možno uspokojit inkrementálním fotoelektrickým snímačem s obvyklým rozlišením délky , tedy optickou mřížkou s roztečí 20 , pětinasobnou interpolací funkcí sinus, cosinus, převedením na pravoúhlé impulsy posunuté vzájemně o 1/4 periody a následným čtyřhranným vyhodnocením. Kvůli vyhodnocení rychlosti event. zrychlení se ale používá rozlišení až 0,01 (to je dosaženo 1000-násobnou interpolací u optické mřížky s roztečí 10 nebo 2000-násobnou při 20). Firma FANUC dokonce inseruje u svých nejmodernějších řídicích systémů rozlišení polohy 0,001 .

Při řízení lineárních motorů tedy vyvstávají protichůdné požadavky: jejich vynikající dynamické vlastnosti si vynucují krátký takt obsluhy (max. 1 ms u polohové vazby), aby byl zaručen rovnoměrný chod i při malých rychlostech. Vysoký vzorkovací kmitočet ale znehodnocuje numerickou derivaci. Jemné rozlišení polohy (kvůli kvalitě derivace) zase zvyšuje potřebné čítecí frekvence vyhodnocovacích obvodů (např. pro posuv 1 m/s a rozlišení polohy 0,01 vychází 100 MHz!!).

Dalším dříve neznámým problémem je náchylnost strojů s lineárními motory k samobuzeným kmitům. S vysokým rozlišením snímačů polohy se staly měřitelnými i malé pohyby, resp. vyšší tvary kmitů stroje s malými amplitudami, které dříve nezasluhovaly pozornost. Tyto jsou derivací zvýrazněny a přivedeny na rychlostní regulátor s vysokým zesílením i propustným pásmem, který je posle na proudový regulátor silové elektroniky motoru. Je-li poloha zatížena parazitní veličinou , signál

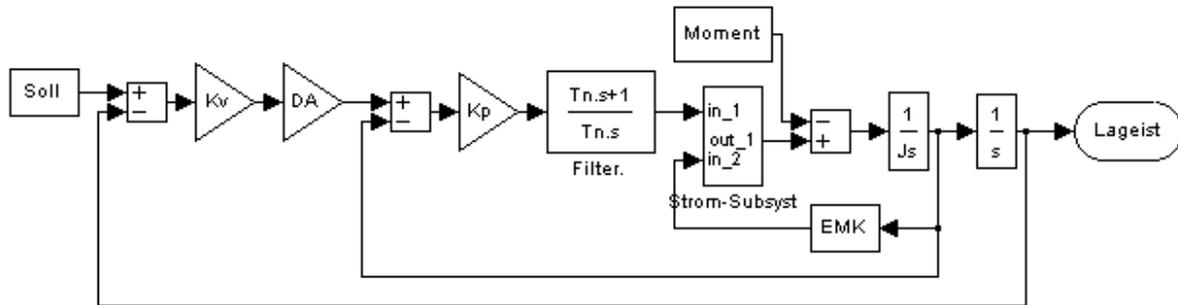
rychlosti má šумы a zrychlení . Motor

je tedy intenzivně vybudován a může dojít k samovolnému rozkmitání celé pohybové osy stroje (obdoba mikrofonního efektu). Tyto jevy se dají částečně oslabit použitím cíleně orientovaných filtrů, zařazených zpravidla před vstup proudového regulátoru.

2. Náhrada rychlostní zpětné vazby (algoritmus dvou polohových vazeb)

Problém náhradního regulačního algoritmu podřízené rychlostní zpětné vazby byl úspěšně řešen ve VÚOSO Praha již v 80. letech u aplikací lineárních hydromotorů v posuvech NC strojů a u robotů tzv. algoritmem dvou polohových smyček [1]. Výše uvedené potíže s derivací signálu polohy lze řešit v případě, že je použit PI-regulátor v přímé větvi. Základní myšlenka spočívá ve vzájemné kompenzaci derivačního členu ve zpětné vazbě a integrační složky rychlostního PI-regulátoru.

Na Ú208 strojní fakulty ČVUT byl v posledních letech tento algoritmus znovu přezkoumán a realizován pomocí MATLABu a Real-Time-Toolboxu i na rotačních hydromotorech a elektromotorech.



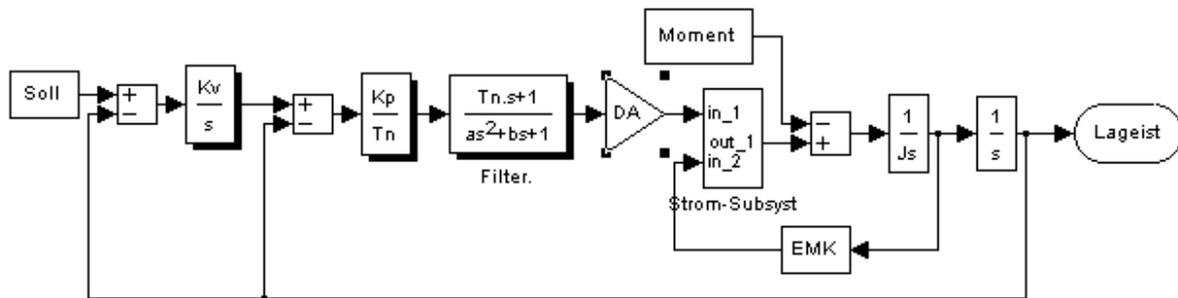
Obr.1: Polohový servopohon s podřízenou rychlostní zpětnou vazbou s PI-regulátorem

Blokové schéma klasické polohové regulace rotačního elektromotoru s podřízenou rychlostní smyčkou a PI regulátorem je na **obr.1**. Po matematicky ekvivalentních úpravách s respektováním fyzikální realizovatelnosti přejde na tvar podle **obr.2**, kde je člen derivující polohu (např. tachodynamo) nahrazen číslicovým integračním členem v přímé větvi. Nový obvod obsahuje dvě polohové zpětné vazby od téhož inkrementálního fotoelektrického snímače polohy. Navíc, vedle úspory tachodynamu a možných nepříjemností s jeho poddajnou spojkou, byl DA-převodník řídicího PC přemístěn do vnitřní polohové smyčky, takže je kompenzován i jeho eventuální offset. Přitom se však ve vnitřní polohové smyčce na

obr.2 objeví PD přenos (jde o původní čítec z přenosu regulátoru rychlosti),

jehož realizace může činit potíže. Je třeba jej rozšířit nejlépe o jmenovatel 2. řádu, který má tak vysoký vlastní kmitočt, že nepoškodí dynamiku pohonu (viz přenos "filtr" v **obr.2**).

Výše uvedený postup odstraňuje potíže se zvyrazňováním parazitních vyšších kmitočtů a zároveň je technicky schůdnější, neboť integrace nečiní potíže ani při hrubším rozlišení snímače polohy.



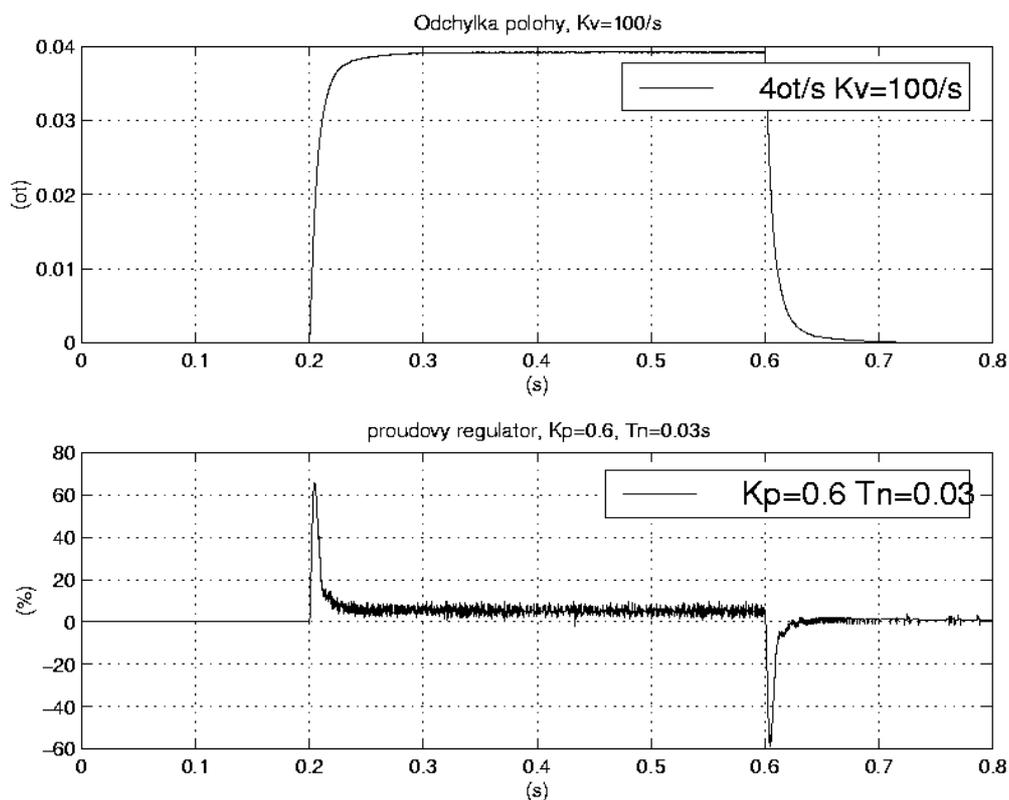
Obr.2: Dvojnásobná polohová smyčka

3. Realizace dvojnásobné polohové vazby

Všechna dále uvedená měření byla provedena na rotačním stejnosměrném elektromotoru SIEMENS 1HU3 074 s buzením permanentními magnety, trvalým klidovým momentem 7Nm, na jehož hřídeli byl namontován setrvačnick s momentem setrvačnosti (tedy). Pro měření úhlové polohy byl na hřídeli instalován inkrementální fotoelektrický snímač ROD 426 (Heidenhain) s běžným počtem rysek optické mřížky 10 000/ot (tedy 40 000 inkrementů/ot).

Při realizaci regulačního algoritmu byl použit program MATLAB 5.2 s modulem Real-Time-Toolbox verze 2.5, kartou 12-bitového DA převodu PCL 812 PG (Advantech) a kartou čítačů IEPC (Essa) pro impulsní čidla s výstupem TTL. Levá část blokového schématu v **obr.2** (až po filtr včetně) je vytvořena v MATLABu převedením spojitých přenosových funkcí na diskretní pomocí bilineární transformace se vzorkovací periodou. V polohové smyčce lze dosáhnout relativně vysokého zesílení při stále aperiodickém chování. Na **obr.3** nahoře je průběh polohové odchylky při zadání skoku rychlosti 240ot/min a následném zastavení (chod naprázdno), dole je průběh signálu na vstupu proudového regulátoru (výstupu filtru) již po DA převodu. Je vidět relativně malé zašumění výstupního

napětí DA převodníku. Vlastnosti pohonu jsou nejméně srovnatelné s vlastnostmi klasicky řízených pohonů posuvů, hlavně v rovnoměrnosti chodu a dynamické tuhosti (ta bude zmíněna v **kap.6**).



Obr.3: Dvojnásobná polohová smyčka - odezva na skok rychlosti 240ot/min,

4. Náhrada akcelerační zpětné vazby (algoritmus tří polohových vazeb)

Vysoká dynamická tuhost je jedním z nejméně sledovaných parametrů u pohonů posuvů obráběcích strojů. Zatímco přenosovou funkci řízení je možno obelstít vhodně zadávaným signálem ze strany řídicího systému, působení vnějších sil na pohon (hlavně třecích a řezných) je více-méně náhodné. Test poddajnosti (nejčastěji měření odezvy na skokovou změnu síly nebo momentu) má největší vypovídací schopnost o vlastnostech regulace.

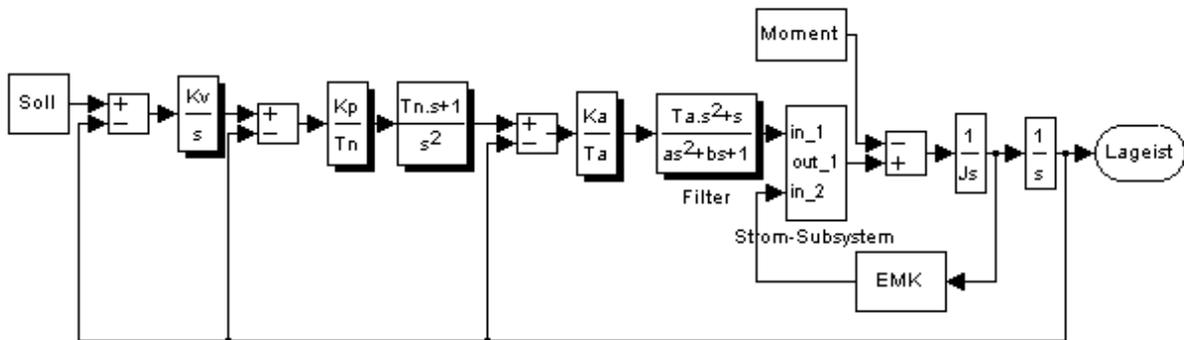
Poznámka: V tomto příspěvku není zkoumán vliv úprav řídicího signálu, ať se již jedná o tzv. feedforward (předkorekce potlačující polohovou odchylku za chodu), nebo o řízené rozjezdy a dojezdy pomocí tzv. S-funkcí (kdy se zadává nejen rychlost a zrychlení, ale též 1. a někdy i 2.derivace zrychlení).

Protože prvotním důsledkem působení síly na hmotu je zrychlení, i bez hlubšího teoretického rozboru je jasné, že při potlačení rušivých sil na pohon je nejučinnější akcelerační zpětná vazba, kterou je nutno vklínit mezi vnitřní proudovou a rychlostní smyčku. Přitom je ale problém s realizací, neboť klasické akcelerometry pracující na principu hmota-pružina snímají absolutní zrychlení (tedy i chvění okolí). Pro měření vzájemného zrychlení pohyblivé a pevné části motoru lze využít např. ferrariského akcelerometru, který pracuje na dvojnásobném indukčním principu s využitím vířivých proudů. Podle údajů výrobců pohonů se však zdá, že vývoj ještě nedospěl do stadia komerčního nasazení. Využití druhé derivace signálu snímače polohy jen umocňuje již dříve zmíněné potíže.

Pomoc nabízí následující postup, použitelný v případě, že v akcelerační smyčce je opět použit PI regulátor s přenosem . Podobnými přesuny a vzájemným vyrušením derivačních a

integračních členů jako v **kap.2** dospějeme posléze k blokovému schématu na **obr.4**, které obsahuje tři polohové vazby. Přitom vznikl ve vnější polohové vazbě opět integrační člen, rychlostní PI regulátor byl rozšířen o jednu integraci a čítec akceleračního regulátoru obsahuje derivaci navíc. Přídavný jmenovatel 2. řádu zajišťuje potřebnou filtraci sollwertu proudu - viz přenos "filtr". Pro jeho zlomový kmitočet

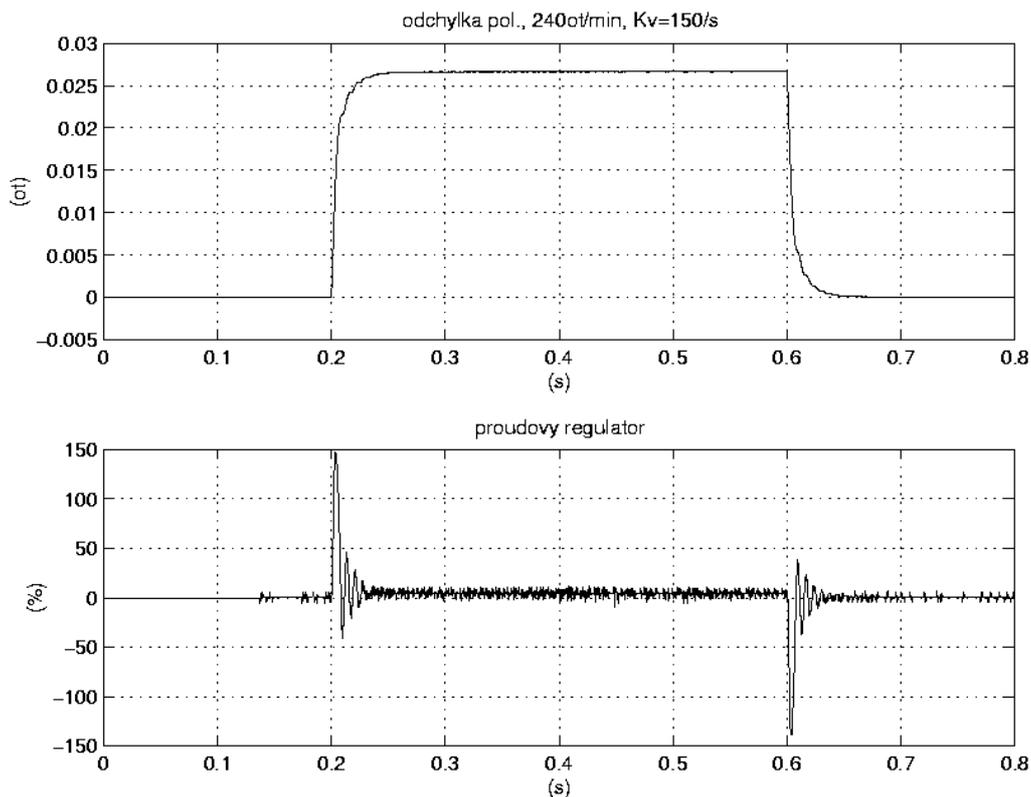
platí . DA převodník není pro stručnost již zakreslen.



Obr.4: Trojnásobná polohová smyčka

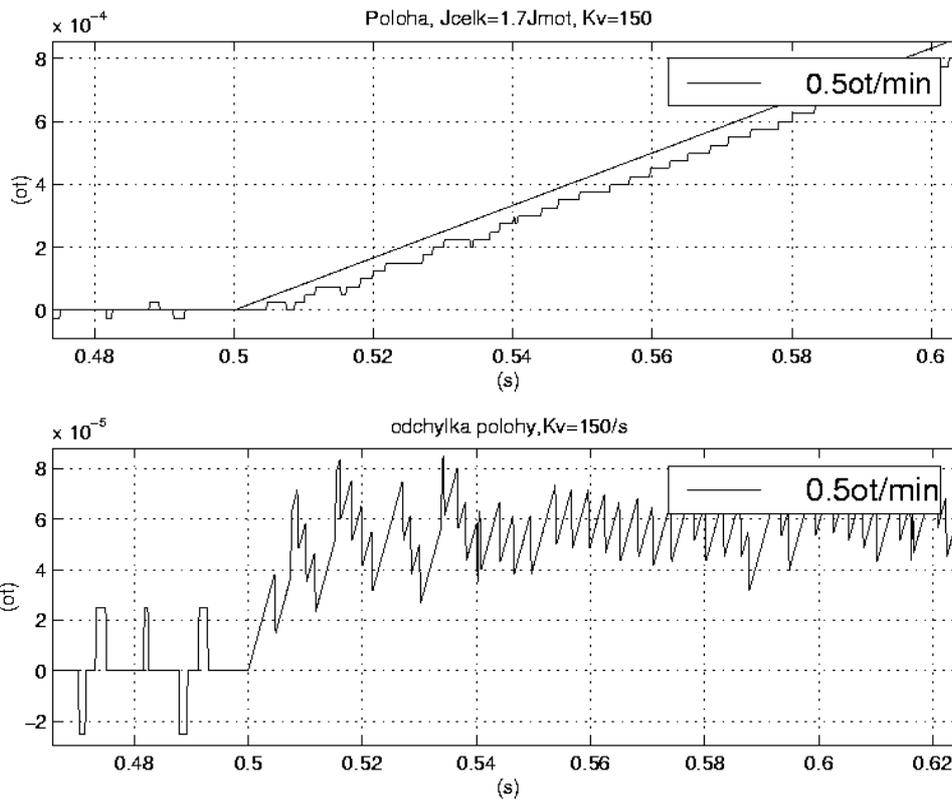
5. Realizace trojnásobné polohové vazby

Pokusy proběhly na stejném přístrojovém vybavení jako v **kap.3** opět se vzorkovací periodou . Výsledky ukazuje **obr.5**. Dovolená hodnota zesílení polohové smyčky při stále aperiodické odezvě na skok rychlosti vzrostla na . Průběh výstupního napětí DA převodníku již není tak klidný (viz v obrázku dole). Pohon lépe sleduje zadaný průběh polohy, takže v okamžiku startu vyvíjí větší zrychlení, což se projeví ve výraznější proudové špičce. Větší skok rychlosti než 400ot/min způsoboval proudovou špičku téměř 200% povolené hodnoty pro režim motoru S1 (trvalé zatížení). Řízení rozběhu pomocí S-funkcí se tedy při použití akcelerační vazby jeví jako nezbytné.

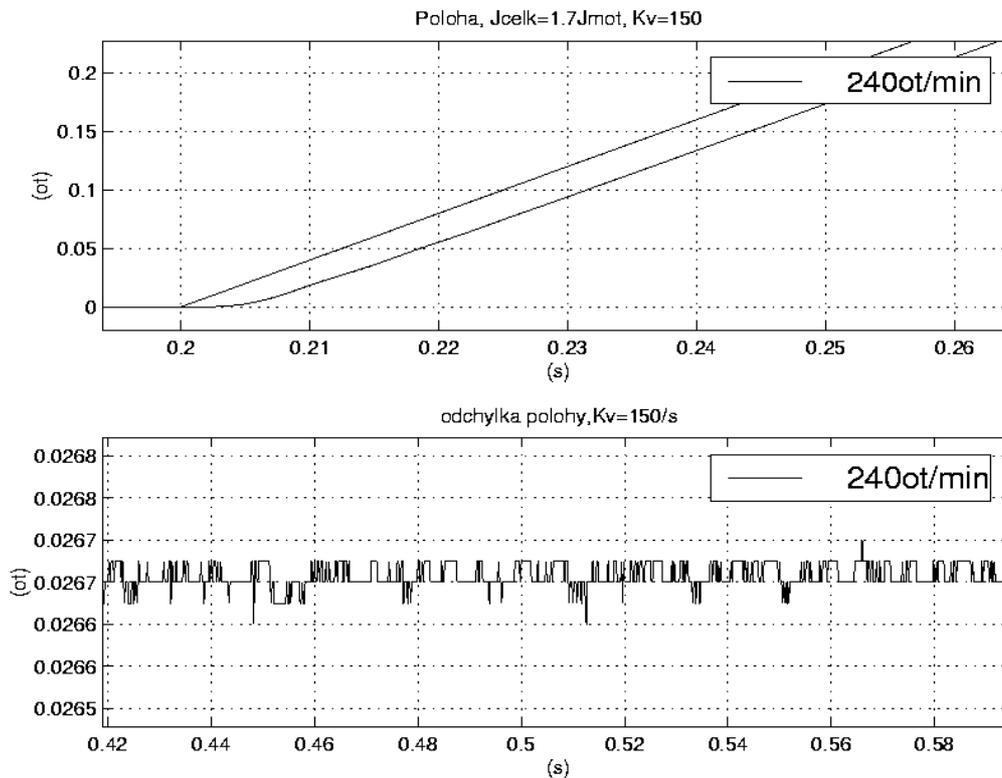


Obr.5: Trojnásobná polohová smyčka - odezva na skok rychlosti 240ot/min,

Rovnoměrnost chodu při 0.5ot/min a 240ot/min dokumentují **obr.6** a **obr.7**. Polohová odchylka kolísá v mezích 2–3 inkrementů. Dalším přínosem trojnásobné vazby kromě zvýšení dovolené hodnoty je výrazné zlepšení v odolnosti pohonu vůči vnějším silám, což bylo již předpovězeno v **kap.4**.



Obr.6: Trojnásobná smyčka - skok rychlosti 0.5ot/min (zvětšeno v okamžiku startu),



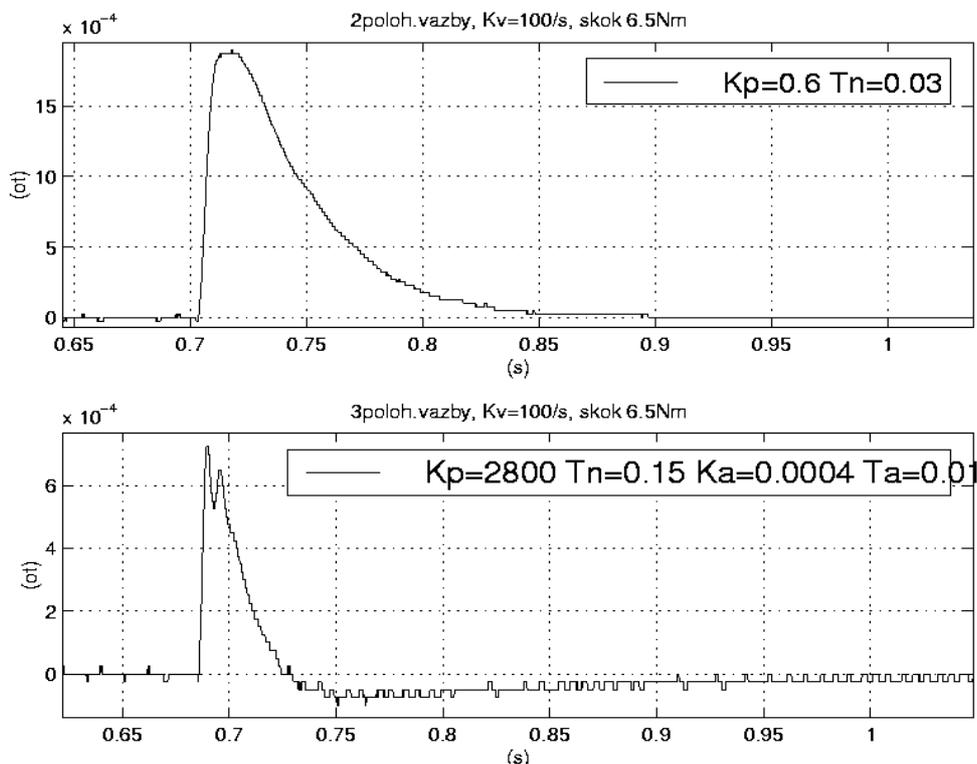
Obr.7: Trojnásobná smyčka - skok rychlosti 240ot/min (kolísání odchylky zvětšeno),
(viz též obr.5 nahoře)

6. Měření dynamické poddajnosti

U obou výše uvedených variant řízení byla měřena tzv. rázová poddajnost pohonu, tj. odezva na skokovou změnu momentu. Motor byl v režimu řízení polohy uveden do klidu a posléze staticky zatížen silou pružiny na definovaném poloměru. Skoková změna momentu zpět na nulovou hodnotu nastane po odstřižení závěsu pružiny. Tento děj odpovídá na obráběcím stroji náhlému vyjetí nástroje z řezu.

Srovnávací měření ukazuje **obr.8** (nahore dvojnásobná, dole trojnásobná polohová vazba, vždy pro $K_v=100/s$). Skok momentu činil 6.5Nm (zhruba trvalý dovolený moment podle katalogu). V obou případech byl splněn samozřejmý požadavek na pohony posuvů, tj. nezávislost polohy na velikosti statického zatížení (nekonečná statická tuhost polohové regulace). Krátkodobá špičková výchylka přechodového děje se u trojnásobné vazby při stejném zesílení asi 2.5-krát zmenšila a proces vyregulování do původní polohy se zrychlil.

Pro porovnání bývá zvykem moment i úhlovou výchylku redukovat přes stoupání pohybového šroubu 10mm/ot na sílu a délkovou výchylku suportu. U dvojnásobné polohové vazby činí redukováná špička poddajnosti 1.5×10^{-4} ot, u trojnásobné vazby dokonce 0.6×10^{-4} ot !!



Obr.8: Odezva na skok momentu 6.5Nm - porovnání dvoj-a trojnásobné smyčky,

7. Závěr

Program MATLAB s výše uvedenými doplňky dobře posloužil pro výzkum velmi nadějného a relativně jednoduchého regulačního algoritmu řízení polohy s trojnásobnou polohovou vazbou u rotačního elektromotoru. V další etapě výzkumu se počítá s jeho aplikací na elektromotory lineární. Dosažená dynamika překonává dosavadní obvyklé hodnoty u pohonů obráběcích strojů srovnatelných velikostí a zvláště poddajnost regulace se výrazně zmenšila, přičemž podstatně nevzrostly nároky na rozlišení snímače polohy. Další zlepšení rovnoměrnosti chodu při malých rychlostech lze jistě očekávat po přechodu z 12-ti na 16-bitový DA převod. Vzhledem k tomu, že další výzkumy se předpokládají na elektromotorech lineárních, bude nutno se zabývat přechodem z analogového na číslicový komunikační protokol, který je u nich obvyklý (např. CAN-bus, SERCOS aj.). Budeme se těšit, že i v tomto případě se potřeba návaznosti na MATLAB setká s pochopením jeho distributora při tvorbě driverů.

Literatura:

- [1] Vurm, V.: Elektrohydraulické polohové servomechanismy s přímočarými hydromotory
disertační práce ČVUT 1979
- [2] Souček, P.: Hochdynamische Antriebsysteme in NC Werkzeugmaschinen
44.internationales Kolloquium Ilmenau, 20.-23.9.1999, SRN
- [3] Zelený, J.: HSC stroje na Chicago Show 98, zpráva pro Společnost pro obráběcí stroje
Tento příspěvek vznikl v rámci řešení projektu GAČR č.101/98/0202
Doc.Ing.Pavel S o u č e k CSc, Ú208, strojní fakulta ČVUT v Praze
Horská 3 Praha 2, telef./fax 02 24913540