

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Regulace polohy v obráběcích strojích

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Milan GRUBER**
Osobní číslo: **E11B0022K**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Regulace polohy v obráběcích strojích**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište regulaci polohy v uzavřené a otevřené smyčce.
2. Popište problematiku nastavování parametrů regulace polohy obráběcího stroje.
3. Sestavte zjednodušený simulační model regulace polohy v jedné ose a proveďte nastavení parametrů regulátorů.
4. Zhodnoťte dosažené výsledky.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

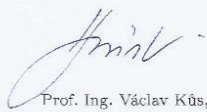
Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Martin Janda, Ph.D.
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: 14. října 2013
Termín odevzdání bakalářské práce: 9. června 2014


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt: Tato bakalářská práce popisuje způsoby a provedení regulace polohy na obráběcím stroji. Pomocí vytvořeného simulačního modelu jsou simulovány různé režimy pohonu a srovnávány s měřením na skutečném stroji. Jsou testovány různá nastavení zesílení regulátorů proudu, rychlosti a polohy a jejich vliv na průběh regulace a stabilitu regulační smyčky. Dále je testován vliv rychlostní předkorekce na regulační smyčku. V závěru je přehled v současnosti používaných typů servomotorů, a základní principy jejich řízení. Jedním z cílů této práce je vytvořit simulační model servopohonu, který by se dal využít při diagnostice obráběcího stroje.

Klíčová slova: regulační smyčka, PI regulátor, předkorekce, feedforward, AC servomotor, usměrňovač, Servozesilovač, PWM, elektrická komutace, simulace, backlash,

Abstract: This thesis details the usage guidelines of the position control on the machine tools. The simulation model is used to simulate different drive modes which are compared to the measurements of the machine. Also detailed are tested various settings of the amplification of the current control, the speed, and the position controller, along with their influence on the course of regulation and the stability of the control loop. Also tested is the effect of feed forward on the speed control loop. This detailed an overview of currently used types of motors and the basic principles of their control. One of the goals of this work is to develop a simulation model of the machine tool drive system, which could be used in the diagnosis of the machine.

Key words: control loop, PI controller, feedforward, AC servomotor, rectifier, servo amplifier, PWM, electrical commutation, simulation, backlash,

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 6.6.2014

Milan Gruber

Obsah

Obsah.....	7
Úvod.....	8
1. Regulace polohy obráběcích strojů	10
1.1 Uspořádání pohonu os obráběcího stroje.....	10
1.2 Princip a použití dopředné vazby	11
1.3 Otevřená regulační smyčka	13
1.4 Uzavřená regulační smyčka.....	16
2. Nastavování parametrů regulace polohy obráběcího stroje	18
2.1 Požadavky na regulaci polohy obráběcího stroje	18
2.1.1 Zesílení regulátoru.....	18
2.1.2 Lineární posuv	20
2.1.3 Kruhová interpolace	23
3. Simulace regulace polohy obráběcího stroje.....	25
3.1 Popis simulovaného stroje	25
3.2 Simulační program	26
3.3 Diagnostické rozhraní ServoGuide.....	27
3.4 Simulace 1mm dráhy v rychloposuvu	27
3.5 Simulace dráhy 1mm při řezném posuvu 1m/min.....	30
3.6 Porovnání vlivu změny nastavení regulační smyčky na stroji a při simulaci.....	32
3.7 Vliv předkorekce na regulaci polohy.....	33
4. Druhy motorů v pohonech obráběcích strojů.....	37
4.1 Konstrukční provedení servomotorů	37
4.2 Stejnoseměrné motory	38
4.2.1 Vlastnosti stejnosměrných motorů	38
4.3 Motory s elektrickou komutací.....	39
4.4 Synchronní motory s permanentními magnety.....	40
4.4.1 Lineární AC motory	42
4.5 Asynchronní motory	42
5. Řízení pohonů CNC obráběcích strojů.....	43
5.1 Regulace a řízení servopohonů se synchronními motory s permanentními magnety (AC servomotorů)	43
6. Závěr.....	44
7. Bibliografie.....	45

Seznam zkratk

F_M - přenos proudové smyčky

F_R - přenos rychlostní smyčky

K_E - napěťová konstanta motoru – back EMF

K_M - momentová konstanta motoru

K_{pi} - zesílení proudového regulátoru

K_p - zesílení polohového regulátoru

K_v - zesílení rychlostního regulátoru

K_w - koeficient rychlostního feedforwardu

M_k - krouticí moment

M_z - zátěžný moment

T_N - časová konstanta rychlostního regulátoru

T_{ni} - časová konstanta proudového regulátoru

y - regulovaná veličina

w - požadovaná hodnota

τ_v - časová konstanta při proporcionálním zesílení rychlostní smyčky

ÚVOD

Nároky na moderní obráběcí stroje kladou velký důraz na pohony těchto strojů. Pro pohony posuvů strojů a pohony vřeten se dnes používají výhradně elektrické pohony. Pneumatické nebo hydraulické pohony se dnes používají pouze pro pomocné funkce, jako je výměna nástrojů nebo obrobků pomocí výměnných stolů. I tyto pomocné funkce jsou někdy realizovány pomocí elektrických pohonů, rozhodující je ekonomická otázka. V případě pracovních posuvů a vřeten je použití elektrických pohonů jedinou možností jak dosáhnout vysoké dynamiky stroje.

Moderní CNC obráběcí stroje mají vysoké nároky na přesnost polohování a rychlost obrábění. To sebou přináší požadavek na velká zrychlení pohybových os, a zároveň rychlé odezvy na odchylku polohy. Tyto požadavky dnes nejlépe splňují elektrické pohony, které umožňují mnohem přesnější a uživatelsky jednodušší regulaci. Mnohé z těchto požadavků ani nejsou jinými způsoby realizovatelné.

V nejnovějších konstrukcích obráběcích strojů, se z důvodu stále zvyšujících potřeb přesnějšího polohování při vysoké rychlosti nahrazují mechanické systémy posuvových šroubů, lineárními motory. U rotačních os se místo šnekových či kuželových převodovek používají tzv. přímé pohony, kdy stator motoru je součástí pevné části rotačního stolu, a rotor je součástí otočné části. Tímto se eliminují vlivy mechanických částí, jako jsou vůle, nepřesnosti montáže, teplotní roztažnost, tuhost atd.

Tato práce popisuje regulace pohonů obráběcích strojů a problematiku jejich nastavování.

Dále se na základě rozboru chování skutečného stroje snaží vytvořit simulační model pohonu, který by bylo možné použít k diagnostice daného stroje. Rovněž jsou uvedeny typy servomotorů a jejich základní technické provedení.

1. Regulace polohy obráběcích strojů

1.1 Uspořádání pohonu os obráběcího stroje

Pokud budeme uvažovat klasické uspořádání pohonu posuvné osy obráběcího stroje, potom sestává z elektromotoru, kuličkového šroubu a samotné posouvané části stroje (supportu, stolu, vřeteníku).



Obrázek 1-1 4-osé horizontální obráběcí centrum [1]

Motor je ve většině případu synchronní s permanentními magnety. Z důvodu požadavku velkých posuvových rychlostí a zrychlení musí mít motor relativně velké otáčky, běžně používaný rozsah jmenovitých otáček je v rozmezí 2000 – 6000 ot/min. Motory jsou vyráběny v několika průměrových řadách, kdy se zvětšení výkonu dosahuje změnou délky motoru. Průměr motoru by měl být z důvodu momentu setrvačnosti co nejmenší, aby bylo dosaženo jeho dobré dynamiky. Součástí motoru je čidlo polohy, které v případě regulace v uzavřené smyčce slouží pouze k snímání otáček.

Kuličkový šroub slouží ke změně rotačního pohybu na podélně posuvný. Oproti dříve používaným šroubům s lichoběžníkovým závitem mají kuličkové šrouby vysokou účinnost, vysokou životnost a kvůli malému tření i malé oteplení, díky možnosti předpětí mají větší tuhost a přesnost. Určitou nevýhodou může být, že nejsou samosvorné tj. i v klidu vyžadují moment na motoru, popř. brzdu.

Kuličkový šroub a spojka mezi ním a motorem mají největší podíl na vzniku odchylky polohy. To je dáno tuhostí spojky motor – kuličkový šroub, tuhostí uložení kuličkového

šroubu, tuhosti samotného kuličkového šroubu, přesností kuličkového šroubu a jeho teplotní délkovou stabilitou. Z hlediska regulace polohy se díky akumulární schopnosti jeví jako zpožďovací člen, což se projeví u uzavřené smyčky.

Poslední část regulované soustavy je pohybující se část stroje stůl, support, vřeteník. Právě setrvačné hmoty této části a řezné síly při obrábění vytvářejí zatížení na kuličkovém šroubu.

1.2 Princip a použití dopředné vazby

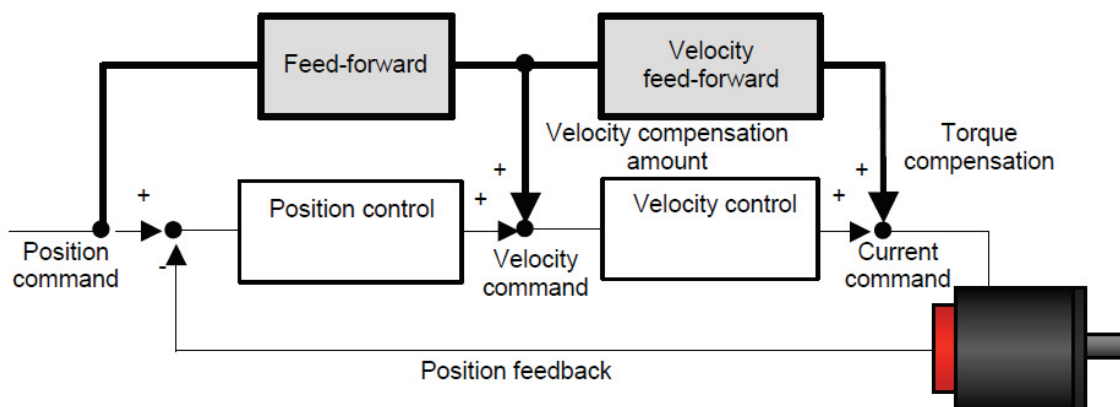
Nepřesnosti vznikající nedostatečnou tuhostí stroje lze omezit pouze správným dimenzováním stroje a lze je z časového hlediska považovat za konstantní. Tepelnou dilataci lze omezit umístěním stroje do stálých teplotních podmínek, tepelnou izolací stroje. Nejvíce ohrožené části z hlediska teplotní roztažnosti jsou vřeteno a kuličkový šroub, proto jsou dnes temperovány olejovým okruhem, který jejich teplotu stabilizuje.

Z hlediska řízení polohy v otevřené regulační smyčce je třeba řešit 2 problémy. Za první nepřesnost stoupání kuličkového šroubu, danou přesností výroby šroubu. Za druhé vůli matky vůči kuličkovému šroubu, ta je daná jednak přesností výroby a za druhé opotřebením. U uzavřené smyčky je problémem nepřesnost snímače polohy, a díky vyšší přesnosti stroje se více projeví dynamické deformace.

K řešení těchto dvou problémů jsou mimo jiné použity tzv. dopředné vazby neboli kompenzace chyb.

V odborné literatuře české i zahraniční se pro dopřednou vazbu zažil anglický výraz feedforward, v české literatuře se objevuje také výraz předkorekce, nebo předvýpočet. V textu budou používány oba výrazy feedforward i předkorekce.

Při řízení rychlosti (otáček) nastává problém, že může zareagovat až po regulaci polohové, toto zpoždění lze snížit přednastavením rychlostní – otáčkové smyčky, rychlostním feedforwardem. U proudové smyčky vzniká ten samý problém a řeší se proudovým feedforwardem.



Obrázek 1-2 Schéma použití feedforwardů, polohového a rychlostního [2]

Hodnoty polohových feedforwardů musí být zjištěny pro každý stroj měřením po konečné montáži stroje. V případě, že provozní podmínky v místě umístění stroje jsou odlišné od podmínek, při kterých byly feedforwardy měřeny, může být z důvodu zachování přesnosti nutné provést nová měření. Tato měření je třeba znovu provést při výměně snímačů polohy při uzavřené regulační smyčce, nebo po výměně kuličkových šroubů u otevřené smyčky. Jak už bylo popsáno výše, jedná se o kompenzace mechanických vůlí a nepřesností daných

způsobem výroby a montáže. Dále je třeba vzít v úvahu setrvačné hmoty pohybujících částí stroje.

Funkce kompenzace chyby stoupání šroubu je založena na tom, že se celková dráha posuvu dané osy rozdělí na shodně dlouhé intervaly např. 10mm. Po té se spustí program, který danou osou posouvá od „0“ (referenční polohy) a v 10mm intervalech je pomocí externího měřiče vzdálenosti (v dnešní době většinou laserového interferometru) měřena skutečná poloha, která se srovnává s hodnotou, udávanou snímačem polohy stroje, rozdíl kladný či záporný je hodnota feedforwardu pro daný bod. Tyto hodnoty jsou po té zapsány do CNC řízení a při řízení posuvu osy jsou připočítávány k hodnotě požadované polohy a po té je skutečná poloha upravena.

Kompenzace vůle matky a kuličkového šroubu se provádí dvěma hodnotami jednou pro řezné posuvy a druhou pro rychloposuv. Příčná vůle se měří v nejméně 3 bodech pojezdu a za feedforward se použije průměr těchto hodnot. Důvod oddělení kompenzace pro řezný a rychloposuv spočívá v tom, že rychloposuv dosahuje desítek metrů za minutu, při těchto posuvech se skutečná vůle šroubu sčítá s deformací šroubu a jeho uložení vlivem velkých setrvačných hmot a nabývá větší hodnoty.

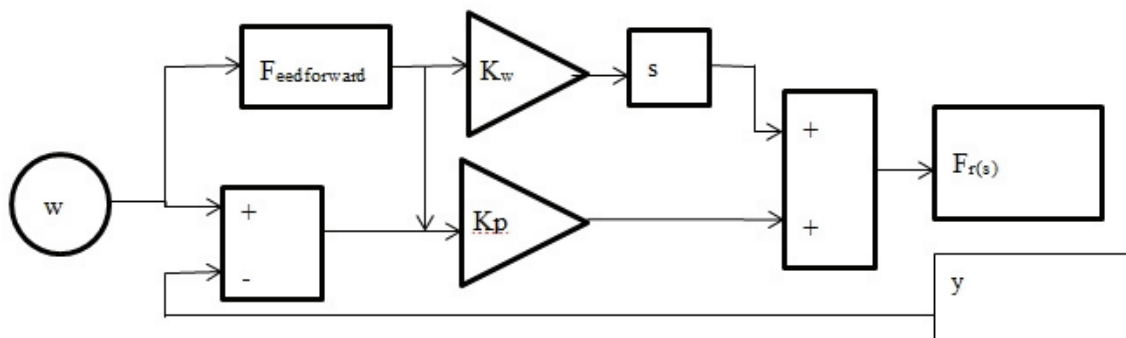
Tyto dva polohové feedforwardy jsou základní a dnes patří ke standardu používanému všemi výrobci strojů.

V případě potřeby dosažení vyšší přesnosti stroje lze použít dalších kompenzací. Např. oboustranná kompenzace chyby stoupání, která umožňuje kompenzovat chybu vůle šroubu a matky v každém bodě měření.

Dalším vyšším způsobem jsou kompenzace kolmosti a přímosti os, které už vyžadují společné řízení obou souvisejících os najednou. Kompenzace přímosti osy probíhá tak že případné prohnutí dráhy osy je kompenzováno posunutím druhé osy o hodnotu prohnutí. Např. osa X má na 100 mm prohnutí 0,01mm vůči ose Z, s tím že největší prohnutí je ve středu této vzdálenosti. Úsek se rozdělí na 10 mm úseky a při posuvu osy X se každých 10 mm osa Z posune 0,002 mm tak aby se průhyb vykompenzoval.

Princip kompenzace kolmosti pracuje na stejném principu. Takovéto feedforwardy vyššího řádu se nepoužívají běžně a nesou sebou i problémy s konečnou přesností obrobku. Co se týče polohových feedforwardů teoreticky lze jimi vykompenzovat i velkou chybu, ale prakticky hodnota 0.1 mm způsobí nestabilitu řízení a ve stroji začnou vznikat rázy z důvodu skokového kompenzování takto velké chyby. Většinou je v řídicím systému omezena maximální hodnota možné kompenzace na jeden krok, ta se u chyby stoupání pohybuje max. 0,01 mm a u kompenzace vůle šroubu a matky max. 0,05 mm.

Dalším feedforwardem je rychlostní. Jeho princip je zobrazen na Obrázek 1-3, kde K_p je zesílení polohového regulátoru, $F_r(s)$ přenos rychlostní smyčky, y aktuální poloha.



Obrázek 1-3 Rychlostní feedforward

Z požadavku polohy w je vypočtena požadovaná rychlost, ke které je přičten požadavek polohy vynásobený váhovým koeficientem K_w . Vyšší požadavek rychlosti způsobí vyšší požadavek na proud a větší kroutící moment. Výsledkem je zrychlení celého děje.

Tento feedforward umožní ihned nastavovat proudovou smyčku. Při rychlých změnách polohy ale vede ke kmitání [4]. Tento feedforward se uplatní při zrychlování a brždění, při pohybu konstantní rychlostí by K_w měl mít hodnotu 1.

Proudový feedforward někdy také označovaný silový nebo momentový, se použije v případě složitějších časových změn rychlosti. Zde je analogicky k rychlostnímu feedforwardu vypočítáno požadované zrychlení a s použitím hmotnosti pohybujících se částí je přes silovou konstantu vypočten požadavek na proud který se přičte k vstupnímu signálu proudového regulátoru.

Z vysvětlení je jasné že zatímco polohové feedforwardy jsou závislé na technickém stavu stroje a prostředí, rychlostní a proudový jsou dány především konstrukcí stroje.

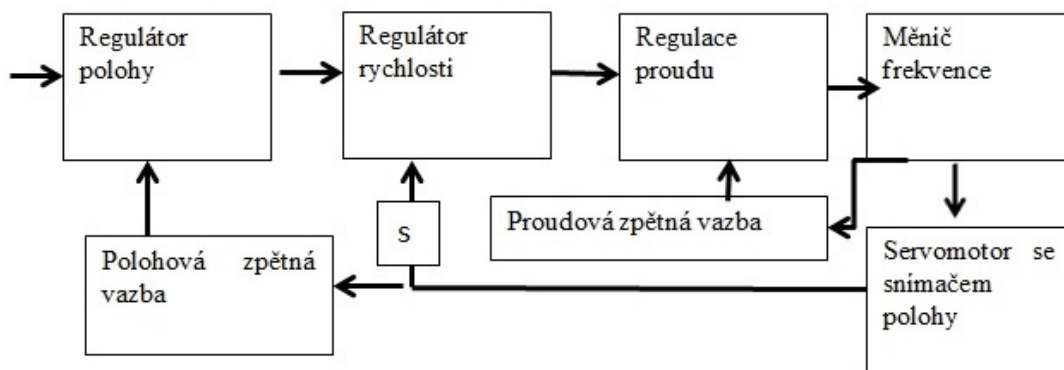
1.3 Otevřená regulační smyčka

Regulace v otevřené smyčce se používá u strojů, kde jsou menší nároky na přesnost polohy. Základním důvodem pro použití regulace v otevřené smyčce je cena, odpadá drahý snímač polohy namontovaný přímo na pevné a pohybující se části.

Nevýhodou tohoto způsobu regulace je, náročnější eliminace chyby polohy stroje vzniklé v mechanickém přenosu energie od motoru na posouvanou část (stůl nebo vřeteno). Tato náročnost je způsobena tím, že snímač polohy je umístěn přímo na motoru, tím pádem všechny části přenosu energie motoru se nacházejí za snímačem polohy. Tuto chybu lze vykompenzovat dodatečně, ale ne tak přesně a spolehlivě jako u uzavřené smyčky, viz výše polohové feedforwardy.

Polohová regulace je regulace vlečná, což znamená, že regulovaná veličina sleduje se zpožděním požadovanou veličinu.

Jak již bylo řečeno regulace polohy je kaskádní, třístupňová, základní je regulace proudová, té je nadřazená otáčková a nakonec je regulace polohová.



Obrázek 1-4 Blokové schéma otevřené smyčky

Na obrázku 1.5 je blokové schéma regulace polohy v otevřené smyčce, schéma je rozděleno na jednotlivé funkční bloky. Ty jsou ve skutečnosti všechny sdruženy v jednom zařízení nazývaném servozsilovač. Jednotlivé bloky budou dále popsány.

Jako první bude popsán proudový regulátor. K regulaci proudu je použit PI regulátor.

Servozsilovač a snímač polohy a otáček pracují s minimálním časovým zpožděním proto je lze považovat za proporcionální členy. Motor díky indukčnosti a vlivu indukovaného napětí

pracuje jako proporcionální člen s časovým zpožděním 1. řádu. Přenos regulátoru proudu je $K_{PI} \frac{T_{NI}s+1}{T_{NIS}}$, (1-1)

kde K_{PI} je zesílení (V/A) a T_{NI} integrační časová konstanta [3]. Odchylka požadovaného a skutečného proudu je vyjádřena jako požadované napětí na motoru, toho je dosaženo dobou sepnutí výkonových tranzistorů měniče řízených pulzně šířkovou modulací.

Jako snímače proudu se používají Hallovy sondy. Zpětnovazební člen K_E je napěťová konstanta (Vs/rad) vyjadřující poměr mezi úhlovou rychlostí a indukovaným napětím $U_e = K_e \omega$, (1-2)

její hodnota je uvedena v katalogu výrobce motoru a je specifická pro daný motor.

Vinutí motoru je na schématu dáno blokem $\frac{1}{L \cdot s + R}$, pro potřebu simulace byl synchronní motor nejdříve nahrazen stejnosměrným motorem, ale výsledky se značně rozcházel s naměřenými průběhy, proto byl nakonec použit aperiodický blok, který nahrazuje celou proudovou smyčku.

K_m momentová konstanta (Nm/A) je daná konstrukčním provedením motoru. Její hodnota vychází ze vzorce pro moment

$$M_K = \frac{N \cdot B_M \cdot L \cdot D}{2} \cdot I \quad (1-3)$$

kde N je počet vodičů, B_M indukce ve vodičích vyvolaná polem permanentních magnetů, L délka vodičů, D průměr rotoru. Potom $M_K = K_M \cdot I$, (1-4) hodnotu lze opět najít v katalogu výrobce.

U synchronního motoru je třeba pro každou fázi, mít vlastní regulátor proudu, protože každá z nich musí mít jiný průběh proudu. V diagramu je toto zanedbáno z důvodu použití modelu ss motoru a je nakreslen pouze jeden regulátor.

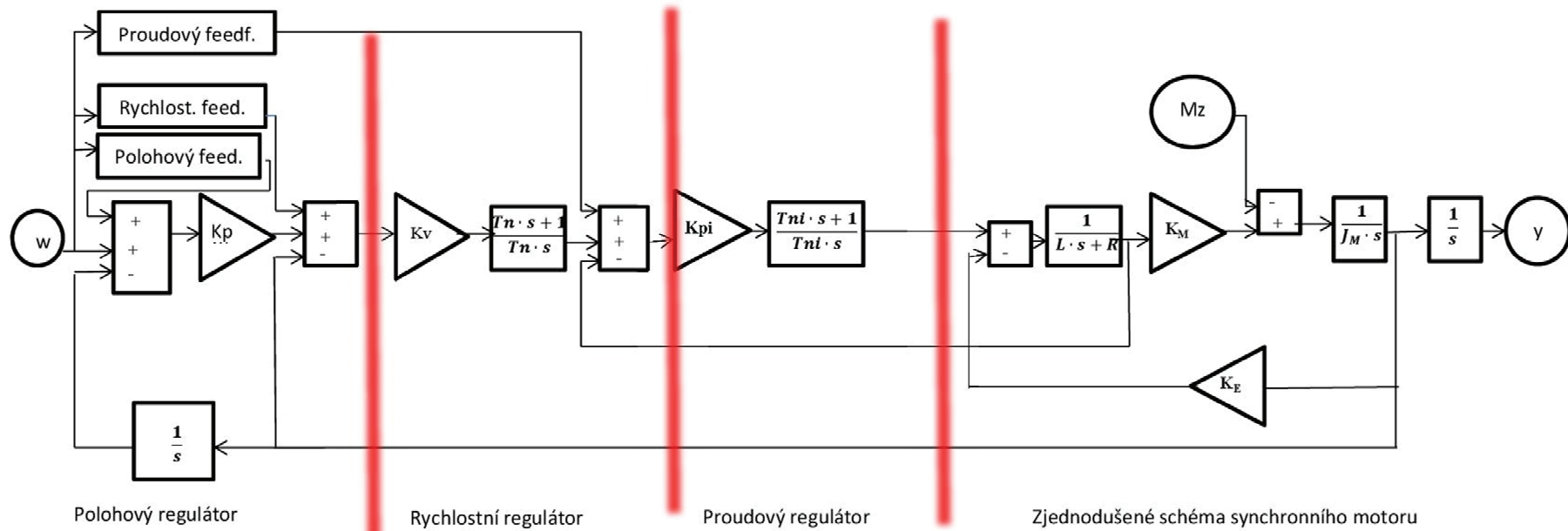
Regulátor rychlosti je rovněž typu PI, jeho přenos je $K_v \frac{T_N s + 1}{T_{NS}}$, K_v zesílení (A/rad/s), T_N opět integrační časová konstanta. K rozdílu mezi požadovanou a skutečnou rychlostí je přičtena hodnota rychlostního feedforwardu a je vytvořen požadavek na proud. Pro správné fungování regulace polohy je rychlostní smyčka nejvýznamnější. Zejména důležitá je frekvenční charakteristika a její propustné pásmo, mělo by být co nejširší.

Regulátor polohy je posledním členem a většinou je typu P. U otevřené smyčky je pro určení polohy použita zpětná vazba od snímače polohy na motoru, kdy je dán počet pulzů na otáčku, výsledná polohy je pak $= \frac{\text{počet pulzů na otáčku}}{\text{stoupání šroubu}} \times \text{aktuální počet pulzů}$. Z rozdílu požadované a skutečné polohy plus polohový feedforward je vytvořen požadavek na rychlost.

Zesílení polohové smyčky je dáno konstantou K_p , jednotky se používají buď s^{-1} nebo zejména v německé literatuře $\frac{m}{\text{min} \cdot \text{mm}}$.

Blok M_z je zátěžný moment a v schématu představuje vstup chyby.

Uvedený model regulační smyčky je značně zjednodušený, při podrobném vyšetřování chování polohové regulace stroje vede na rovnice druhého a třetího řádu [3].



Obrázek 1-5 Blokové schéma regulace polohy v otevřené smyčce

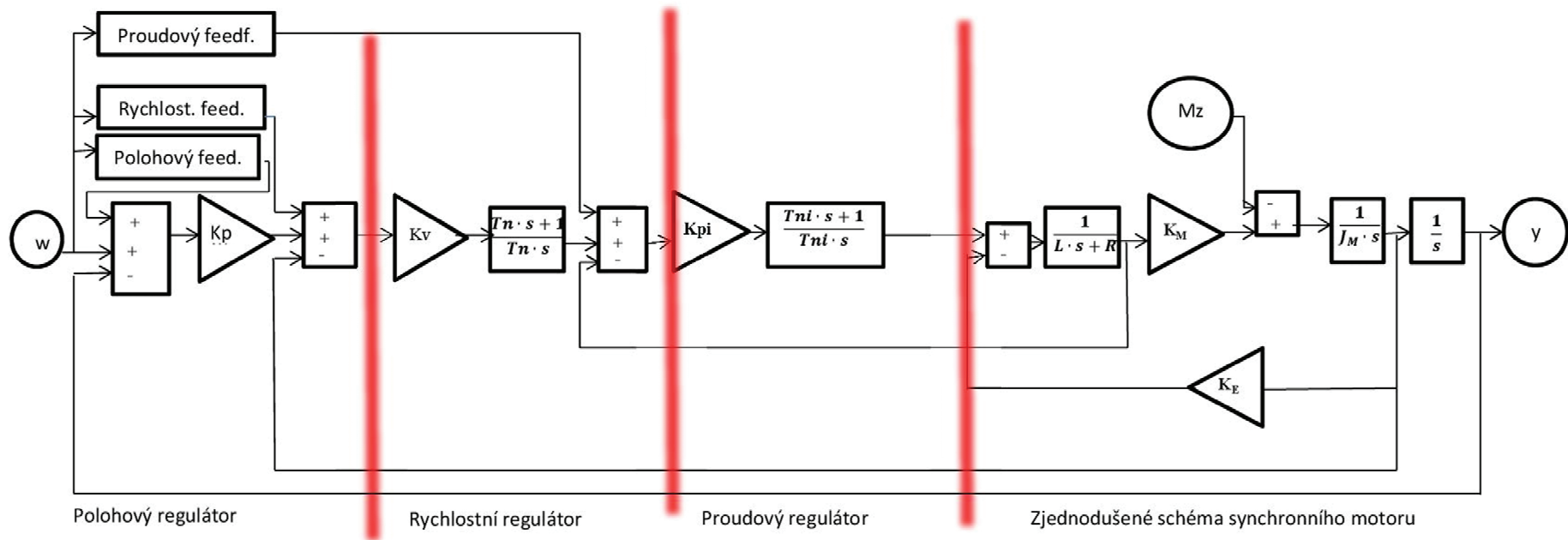
1.4 Uzavřená regulační smyčka

Rozdíl oproti otevřené smyčce spočívá v umístění lineárního snímače (tedy v případě lineární osy) přímo na pohybující se část. Tím je dosaženo toho, že naměřená poloha skutečně odpovídá skutečné poloze stroje. Tím jsou odstraněny téměř všechny chybové vlivy způsobené mechanikou pohonu a nepřesnostmi výroby. Přesnost stroje se značně zvýší a to až o jeden řád. V případě použití přímých pohonů může být zvýšení přesnosti i vyšší. [5]

Jako snímače polohy jsou nejčastěji používány pravítka na optickém principu, kdy na skleněném pravítku jsou vyleptány referenční značky a pomocí LED diody a fotodiody jsou snímány. Méně často jsou použity snímače na magnetickém principu, a ve speciálních případech je použito interferometru namontovaného přímo na stroji.

Na Obrázek 1-6 je schéma polohové regulace v uzavřené smyčce. Někteří výrobci z důvodu úspory volí způsob, kdy není použit snímač rychlosti na motoru a rychlost je vypočítávána z polohy. Jedná se vlastně opak otevřené smyčky, kde se vypočítává poloha z rychlosti. To ale klade větší nároky na řídicí systém, protože pro řízení proudu je potřeba znát přesnou polohu rotoru, zpoždění výpočtu může mít vliv na dynamiku pohonu. Nehledě nato že při použití plnohodnotného snímače na motoru lze v případě poruchy lineárního odměřování regulaci přepnout do otevřené smyčky a stroj je bez větší odstávky schopen provozu do doby výměny odměřování.

U lineárních motorů, kde není možné snímat otáčky nezbývá jiná možnost než provádět přepočet rychlosti z polohy. I když existují řešení se snímači zrychlení, ale to v konečném důsledku znamená další snímač a tím vyšší cenu. I tak je nutné provádět přepočet rychlosti, tentokrát ze zrychlení.



Obrázek 1-6 Regulace polohy v uzavřené smyčce

2. Nastavování parametrů regulace polohy obráběcího stroje

2.1 Požadavky na regulaci polohy obráběcího stroje

K dosažení co nejpřesnější regulace polohy je třeba splnit tyto požadavky:

- Velké zesílení regulátoru
- Vysoké tlumení k zajištění stability a zamezení překmitů
- Co nejnižší časové konstanty pohonu
- Co nejmenší momenty setrvačnosti rotujících částí
- Vysokou mechanickou mezní frekvenci
- Vysoká tuhost mechanických částí
- Co nejmenší mechanické vůle

Podmínka vlastních frekvencí stroje a regulační smyčky $\frac{\omega_{0mechanika}}{\omega_{0reg.smyčky}} > 2$ (2-1)

Mechanické vlivy závisí na konstrukčním provedení stroje a kvalitě a přesnosti použitých částí přenosového systému. Proto dále budou mechanické vlivy brány jako konstanty dané provedením stroje.

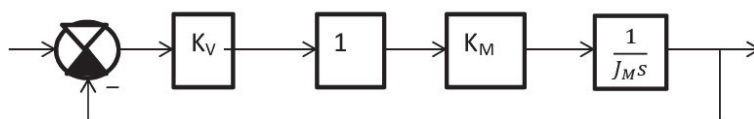
2.1.1 Zesílení regulátoru

Co největší zesílení regulátoru je důležité k tomu, aby bylo dosaženo co nejrychleji nulového rozdílu mezi žádanou a skutečnou polohou, tedy nulové regulační odchylky. Teoreticky při nekonečném zesílení by toto bylo dosaženo v nekonečně malém čase. Ale příliš velké zesílení vede k překmitům regulované veličiny a tím k nestabilitě. Proto je třeba najít takovou hodnotu zesílení, aby rychlost regulace byla dostatečná a zároveň stabilní.

V případě regulace polohy se jedná o zjištění a nastavení 3 zesílení, neboť regulační smyčka obsahuje 3 regulátory. Jak již bylo řečeno výše nejdůležitější je nastavení regulátoru rychlosti, k tomuto zjištění se dospělo experimentálně [3].

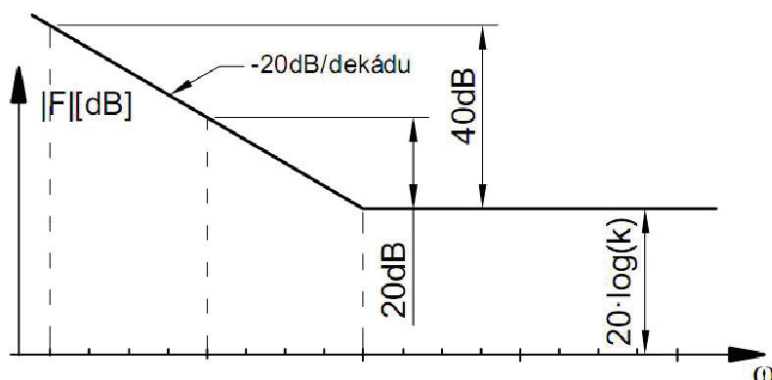
Proudový regulátor je z důvodu napěťové konstanty K_E a momentové konstanty K_M přednastaven výrobcem motoru [6]. K_E a K_M jsou dány konstrukcí motoru, tedy rozměry L , D , velikostí vzduchové mezery a indukcí B_M , a nesouvisí s provedením stroje. Maximální hodnota proudu je daná izolací vinutí a maximální hodnota derivace proudu omezuje frekvenci PWM. Nicméně při ladění pohonu může vyvstat potřeba upravit zesílení proudového regulátoru K_{pi} pak by mělo být postupováno podle doporučení výrobce motoru a měniče. Propustné pásmo proudové smyčky je ve srovnání s rychlostní a polohovou vysoké, pohybuje se v rozmezí 1 – 1,2 kHz. Z tohoto důvodu je možné uvažovat přenos proudové smyčky za 1 [3].

Rychlostní regulátor je nejlépe začít nastavovat tak že se vyloučí vliv integrační složky. Zvolí se velká hodnota T_N aby se fázové zpoždění přesunulo k malým frekvencím. Potom je možné začít zvyšovat zesílení rychlostního regulátoru K_v . Pokud v tomto případě uvažujeme přenos proudové smyčky 1, pak získáme zjednodušené schéma rychlostní regulace.



Obrázek 2-1 Zjednodušená rychlostní smyčka

V tomto případě bude přenosová funkce celé smyčky $F_R(s) = \frac{1}{\tau_v \cdot s + 1}$, (2-2) kdy časová konstanta $\tau_v = \frac{J_M}{K_v \cdot K_M}$ (2-3) ukazuje, že zvyšováním zesílení rychlostního regulátoru zkracujeme dobu dosažení požadované rychlosti, K_M a J_M jsou konstanty. K_v ale nemůžeme zvyšovat neomezeně, jinak dojde k velkému překmitu a nestabilitě.



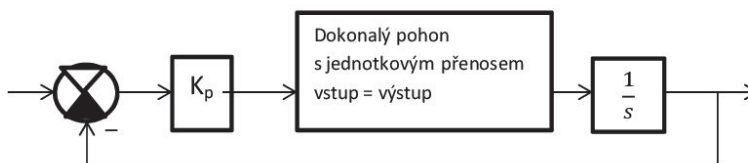
Obrázek 2-2 Amplitudová charakteristika PI regulátoru

Polohová regulace se musí chovat aperiodicky. Proto je důležité tlumení, které by v tomto případě bylo pro polohovou smyčku $\theta = \frac{1}{2\sqrt{\tau_v K_v}}$, (2-4) kvůli aperiodicitě musí být $\theta \geq 1$, velikost polohového zesílení proto nesmí překročit $K_p \leq \frac{1}{4\tau_v}$, (2-5)

Nicméně po prvním nastavení zesílení K_v bez uvažování integrační složky je třeba tuto brát do úvahy a v dalším kroku upravovat hodnotu integrační konstanty T_N . Celkové zesílení rychlostní smyčky je potom $K_R = \frac{K_v M_K}{T_N J_M}$ [3] (2-6). Snižováním T_N lze zvyšovat zesílení, ale jen do té míry aby tlumení bylo $0,8 < \theta < 1$ [3].

Reálné řešení polohového regulátoru vede na zpětnovazební obvod s nejméně jedním proporcionalním přenosem 2. řádu a jedním integračním členem [3], pro náš případ ale budeme nadále uvažovat zjednodušené schéma viz. Obrázek 2-3, kdy můžeme při správném nastavení proudové a rychlostní smyčky považovat jejich celkový přenos $F_R = 1$.

Přenos polohové smyčky v takovém případě bude $F_P(s) = \frac{K_p}{K_p + s}$. (2-7)



Obrázek 2-3 Zjednodušená polohová smyčka

Z hlediska kvality regulace je opět vhodná co nejvyšší hodnota K_p a tím co nejširší propustné pásmo. Ale při velkých hodnotách K_p se projeví zanedbání podřízených smyček, jejichž přenos byl idealizován na 1. Podřízené smyčky pak mohou způsobit kmitání.

K určení velikosti K_p můžeme vycházet ze vztahů pro optimální tlumení polohové smyčky $\theta_{pol} \approx 0,687$ a optimální $K_p = 0,272 \Omega_M$ [3] (2-8). Ω_M je vlastní kmitočet smyčky.

Vlastní frekvenci smyčky lze určit ze vztahu $\Omega_M \cong \sqrt{\frac{K_v K_p M_K}{T}}$ [3] (2-9)

2.1.2 Lineární posuv

Lineární posuv stroje je nejzákladnější pohyb stroje. Lze jej rozdělit na dva druhy rychloposuv a řezný posuv. Na každý z nich je kladený jiný požadavek.

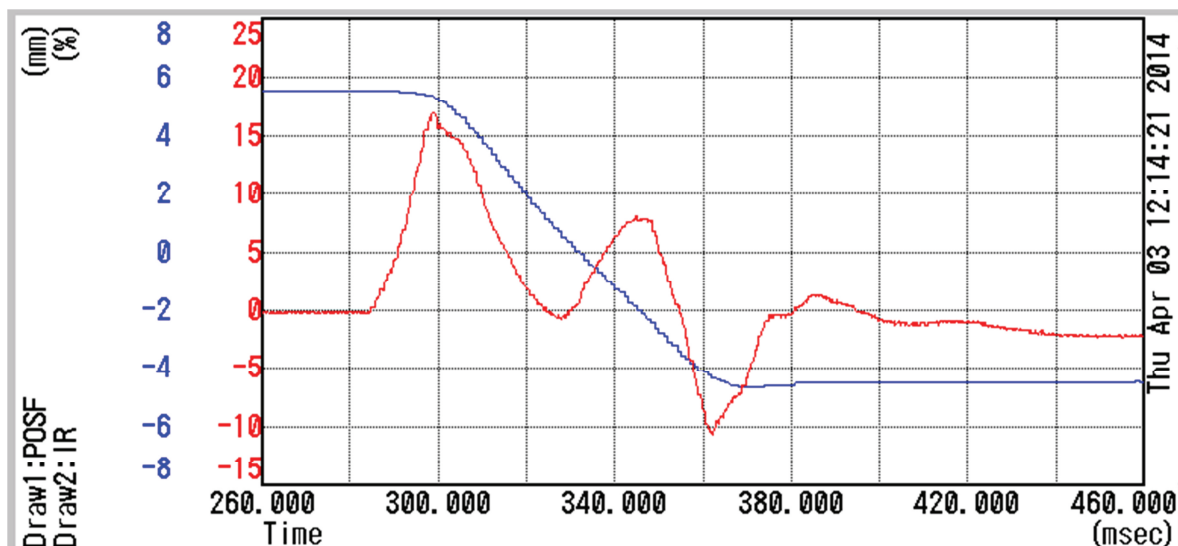
Rychloposuv slouží k přesunu os mimo obrábění, jako je odjetí nástroje od obrobku, dojetí pro nástroj do výměnné pozice a mezioperační přesuny os. Hodnoty rychloposuvu na moderních strojích dosahují desítek metrů za minutu (50 m/min i více). V případě rychloposuvu je kladen hlavní důraz na rychlost, tedy čas přejezdu, odchylku polohy respektive její překmit a dobu trvání děje než se poloha ustálí. Doba trvání aperiodického děje je myšlena vzhledem k času přejezdu. Zatímco přejezd trvá podle délky dráhy řádově stovky milisekund, ustálení polohy by nemělo překročit 30 ms.

Při rychloposuvu se výrazně projeví setrvačné hmoty stroje, což klade velké nároky na proudové zatížení motoru. Proudový regulátor je nastaven pro všechny druhy posuvu stejně, jelikož je dán provedením motoru. Pro rychloposuv ale bude jiné zejména nastavení rychlostního regulátoru, kde zesílení K_v bude podstatně vyšší, rovněž časová konstanta bude menší. Rychloposuv slouží k co nejrychlejšímu dosažení požadované polohy, s tím že určitý překmit v přesnosti polohy je možný, protože je kladen důraz na rychlost. Samozřejmě doba pro stabilizaci polohy po překmitu nesmí být tak dlouhá, jako kdyby stroj najížděl pomaleji, ale bez překmitu. Tím by se efekt velké rychlosti ztratil pomalou stabilizací.

Prakticky může nájezd osy do polohy v režimu rychloposuvu s použitím všech předkorekcí vypadat následovně:

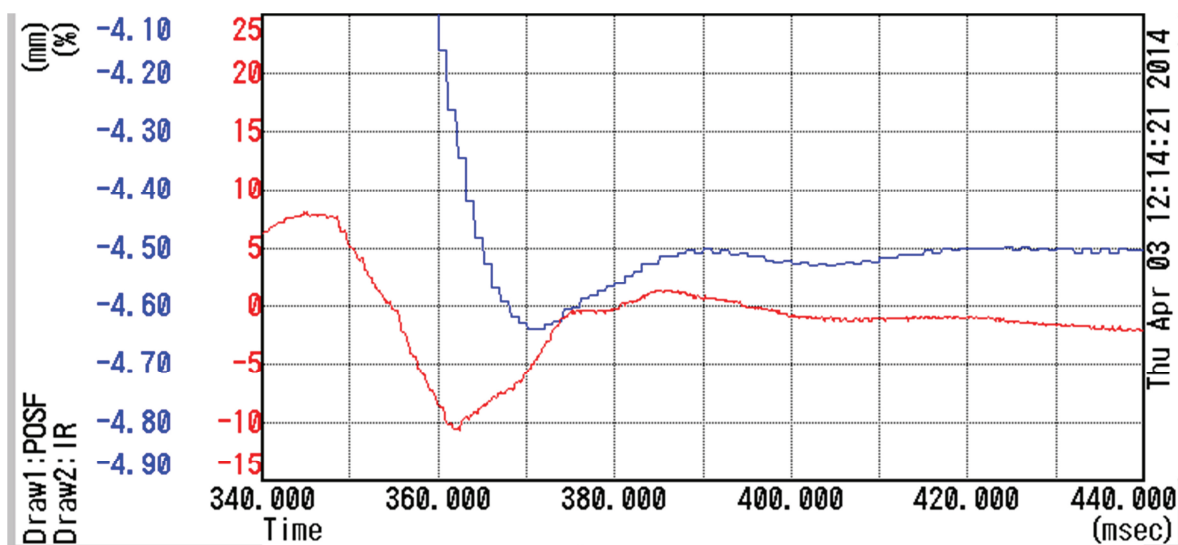
1. Požadavek na posun z 0 do 100mm
2. Polohovou předkorekcí je odečtena kumulativní chyba odměřování pro polohu 100 např. -0.004 dále chyba příčné vůle např. -0.005, takže výsledný požadavek je 99.991
3. Regulátor rychlosti na tento upravený požadavek provede výpočet rychlosti, s použitím rychlostních předkorekcí pro danou dráhu, rychlost, velikost polohových předkorekcí ji upraví tak že výsledný požadavek na rychlost odpovídá např. nájezdu na polohu 99.985 bez jakýchkoli předkorekcí
4. Regulátor proudu na základě požadované rychlosti vypočte požadovaný proud, který je opět předkorekcemi upraven.
5. Osa se dá do pohybu a podle délky dráhy dosáhne nebo nedosáhne max. rychlosti a zastaví na požadované poloze

Zjednodušeně se dá říct, že ačkoli původní požadavek na posun byl 100 mm, stroj se po zohlednění předkorekcí chová tak že interní posun je „jen“ např. oněch 99.985 mm. Správným nastavením předkorekcí, zesílení a časových konstant lze teoreticky dosáhnout toho, že stroj započítá překmit při zastavení tak, že překmitem dosáhne požadované polohy. Na následujících grafech není použití předkorekcí vidět neboť jsou už obsaženy v údajích o poloze.



Obrázek 2-4 Průběh regulace polohy a proudu při rychloposuvu na reálném stroji (červeně - proud, modře - poloha)

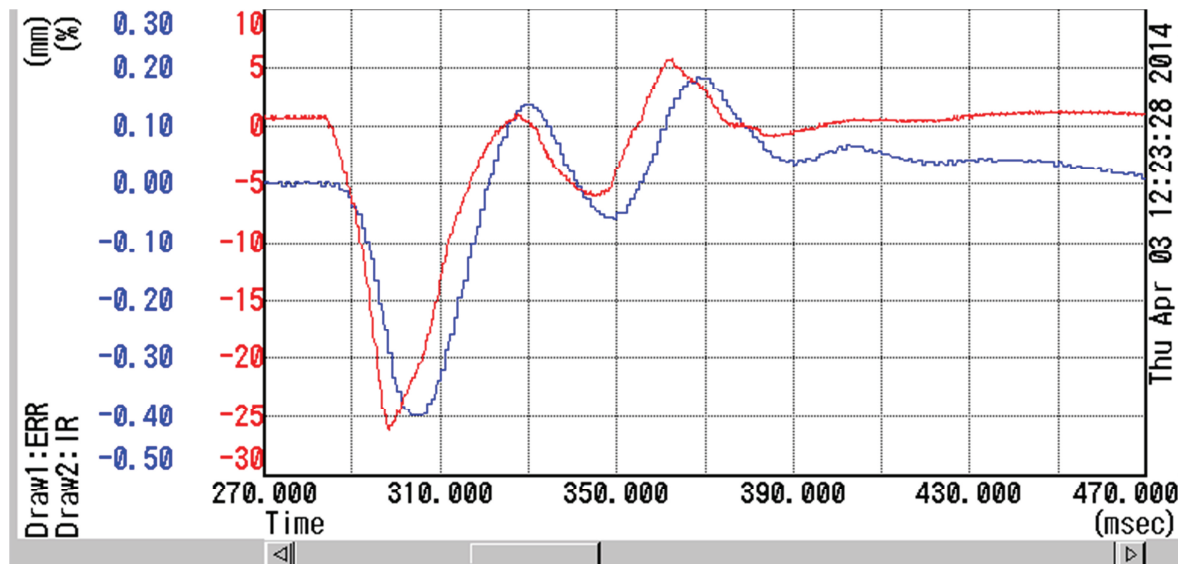
Obrázek 2-4 ukazuje posunutí lineární osy o 1mm v režimu rychloposuvu (rychlost 48m/min), na grafu je dobře viditelné zpoždění způsobené přenosem na kuličkovém šroubu. Při snímání byla špatně nastavena konverze POSF, proto neodpovídá zobrazená hodnota posunu. Strmý nárůst proudu (červená křivka) dosáhne svého maxima ve chvíli kdy je posun osy minimální cca 0,02 mm. To je proud potřebný k překonání setrvačnosti a tření. Po té proud klesá až na 0 zhruba v polovině dráhy, s tím jak klesá odchylna polohy. To už působí setrvačnost pohybující se osy a po té co proud klesne na 0, dosáhne odchylna polohy kladné hodnoty. Osa se předbíhá, ale jelikož ještě osa nedosáhla požadované polohy, začíná proud znovu růst. Po druhém menším nárůstu proudu už dochází k brždění, přechodu proudu do záporných hodnot. Následující malé zvlnění je způsobeno přesnou stabilizací polohy. Průběh stabilizace při brždění je na Obrázek 2-5, kde je vidět překmit o cca 0,012mm a následné ustálení polohy.



Obrázek 2-5 Průběh brždění a stabilizace polohy

Lépe lze celý děj vysvětlit na průběhu proudu vzhledem k odchylce polohy, kde je vidět, že křivky odchylky a proudu mají v podstatě stejný průběh, s posunem odpovídajícím zpoždění regulační smyčky. Z Obrázek 2-6 je i jasné proč je průběh proudu s dvěma špičkami, tak jak

nejdříve chyba polohy narůstá vlivem setrvačnosti po rozjetí, začne se zmenšovat a klesá i proud. Proud začne klesat o něco dříve právě vlivem proudové a rychlostní předkorekce. Následně dojde vlivem setrvačnosti k překmitnutí z požadované polohy. Ale pozor nejedná se o konečnou, požadovanou polohu ale o polohu vypočtenou, průběžnou kde by se v danou chvíli měla osa nacházet, ještě nebylo dosaženo požadované polohy. Nato zareaguje proudová regulace opětovným zvýšením proudu, ale násobně menším, neboť už není třeba překonávat tření a setrvačnost osy. Navíc potřebná dráha už je jen poloviční. Další překmit odchylky už je v oblasti požadované oblasti a proud má opačnou hodnotu, motor brzdí.



Obrázek 2-6 Průběh proudu a odchylky polohy

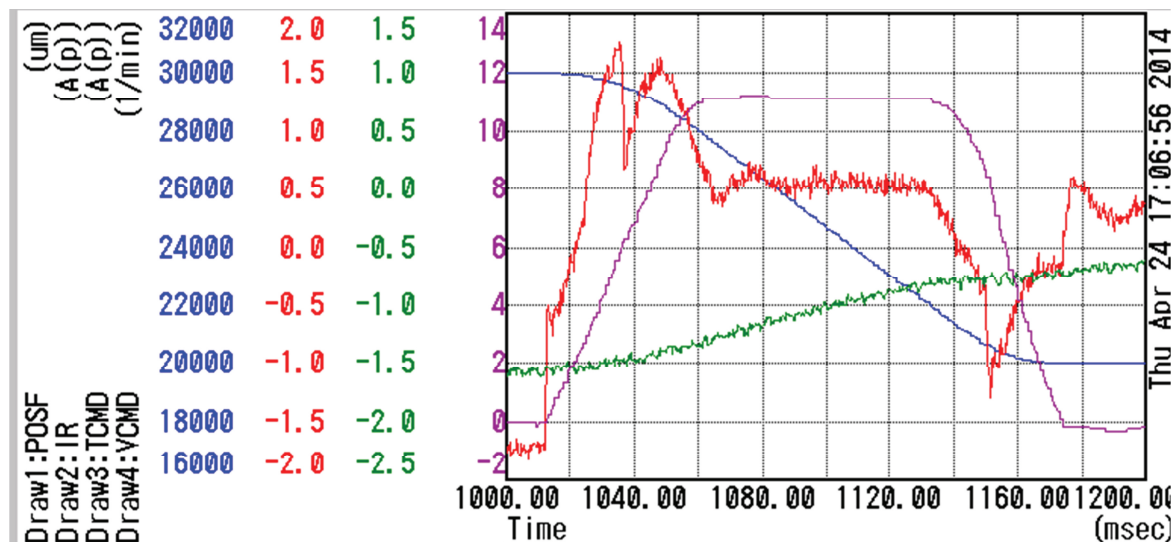
U lineárních motorů nebo přímých rotačních pohonů nastává problém s hmotností obrobku, která je proměnná a tím pádem zátěžný moment soustavy se mění a nastavení je „bezchybné“ jen v určitém rozsahu. U pohonů s kuličkovým šroubem tento problém nenastává, protože potřebný krouticí moment na šroubu se zatížením mění jen velmi málo. Naopak u přímých pohonů lze využít toho, že zátěžná síla je shodná se silou potřebnou k pohybu a provede se vážení obrobku. Spuštěním speciálního programu který provádí rozjetí osy na požadovanou rychlost a zastavení. Na základě snímání odezvy zatížení motoru, zrychlení a chyby polohy provede výpočet parametrů regulační smyčky a jejich nastavení tak aby bylo možné dosáhnout buď co největší rychlosti nebo přesnosti obrábění. Pokud stroj s přímým pohonem takovou funkci nemá, provádí se nastavení na cca 2/3 maximálního zatížení stroje, kdy chyba při plném zatížení je ještě přijatelná. Pokud však někdo bude používat stroj s max. nosností stolu 2t na obrobky o hmotnosti 2kg, může být chyba výrazná, nicméně v případě rychloposuvu se nejedná o zásadní problém.

Naopak pro řezný posuv z důvodu přesnosti obrobku je důležitý průběh ustálení požadované polohy bez překmitu. Rovněž bude kladen důraz na rychlost odezvy na skok poruchy (např. řezný odpor), která by mělo být opět z důvodu přesnosti obrobku co nejvyšší.

Průběh regulace polohy přímého pohonu je vidět na Obrázek 2-7. modře je průběh polohy, červeně proud. Je zde vidět že proud nejdříve roste, aby překonal setrvačné hmoty a tření po té je konstantní po dosažení požadované rychlosti a pak změní polaritu pro brzdění.

Na grafu je zavádějící počátek proudu v záporné oblasti, to je způsobeno tím, že snímaná osa je gravitační a po odblokování brzdy jí motor musí držet. Fialovou barvou je znázorněn požadavek na rychlost.

U přímých pohonů je v případě použití brzdy dané osy nutné provést dobře načasování předávání držení osy mezi brzdou a motorem. Pokud bude časová prodleva moc velká, dojde k samovolnému posunutí osy vlivem gravitace, což může způsobit poškození stroje nebo přetížení pohonu v případě že by zachytával padající část stroje. Pokud dojde k zapnutí pohonu příliš brzy, v době kdy je ještě držen brzdou může opět dojít k přetížení motoru, nebo poškození brzdy. Dalším problémem je nenadálý výpadek napájení pohonu kdy musí brzda okamžitě zareagovat v řádech desítek milisekund, zatímco u pohonu s kuličkovým šroubem může být tato prodleva až 200 ms.



Obrázek 2-7 Průběh regulace polohy na stroji s přímým pohonem (modře – poloha, červeně – proud, fialová – rychlost)

Z důvodu co nejvyšší dosažitelné přesnosti stroje je možné zadávat různá zesílení rychlostního a polohového regulátoru pro různé režné režimy jako je řezání závitů, frézování kontur, čelní frézování. Při řezném posuvu je hlavním požadavkem přesnost najetí bez překmitu, aby byla dodržena přesnost obrobku. Když vezmeme v úvahu, že při HSC (vysokorychlostním obrábění) řezné posuvy dosahují i desítek metrů za minutu nejedná se o jednoduchý úkol.

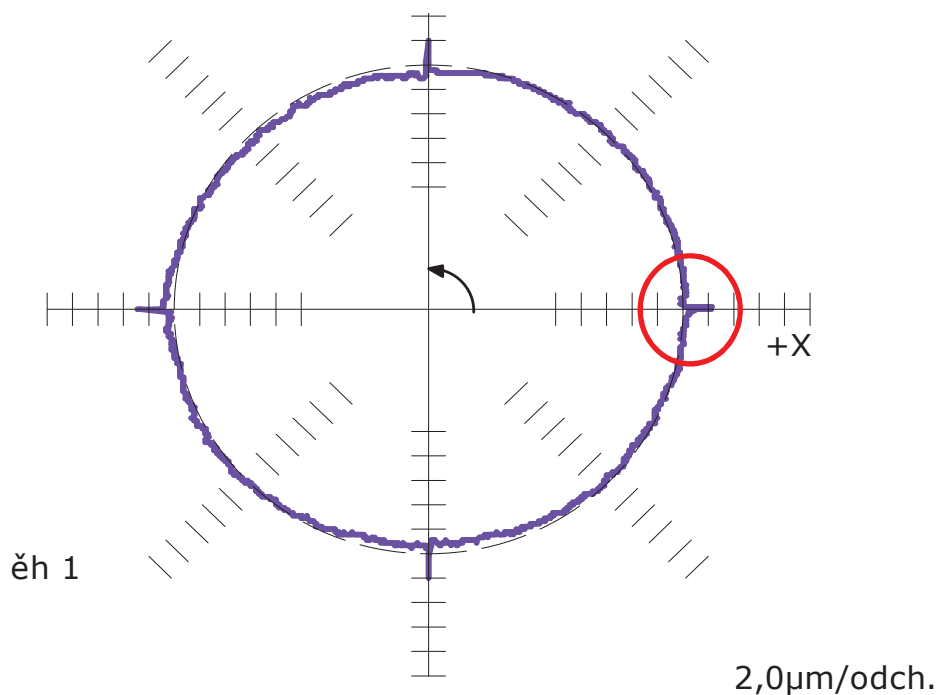
Hodnoty zesílení a časových konstant pro jednotlivé režimy jsou odladěny a zapsány do CNC řídicího systému, který je aktivuje dle zadaného režimu.

2.1.3 Kruhá interpolace

Kruhá interpolace vyžaduje součinnost dvou os najednou, a z hlediska seřízení regulace pohonů je nejproblematictější seřízení přechodů z jednotlivých kvadrantů. V přechodech kvadrantů, kde vždy jedna osa mění směr pohybu se projeví příčná vůle a tření.

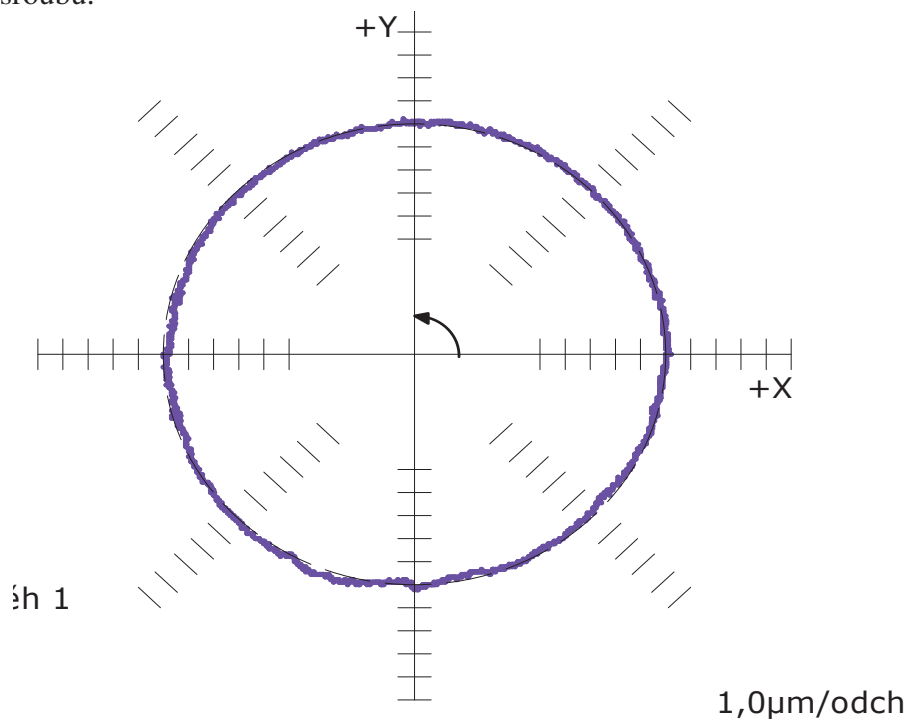
Na Obrázek 2-8 je vidět výsledek měření kruhovitosti přístrojem Ballbar firmy Renishaw. Špičky objevující se na přechodech kvadrantů jsou mimo jiné způsobené třením vodících ploch. V červeně označené oblasti se dráha osy X vůči Y stále zkracuje až nakonec osa X změní směr pohybu. Při změně směru se právě uplatní polohový feedforward na příčnou vůli. Samotná velikost feedforwardu způsobí posun spodní a horní poloviny kružnice proti sobě. Ale dále je možné volit zrychlení pro uplatnění tohoto feedforwardu. Pokud je toto zrychlení správně nastaveno, může špičky potlačit nebo úplně odstranit. Úplné odstranění je možné pouze tehdy, pokud jejich vznik je způsoben špatným nastavením, když je problém v mechanice stroje špičky lze pouze potlačit. Špatné nastavení zrychlení pro tento

feedforward může způsobit větší protažení špiček, nebo naopak jejich obrácení dovnitř kružnice. Popsaný problém se ale vyskytuje pouze u pohonů s kuličkovým šroubem.



Obrázek 2-8 Graf měření kruhovitosti u stroje s třením ve vodících plochách

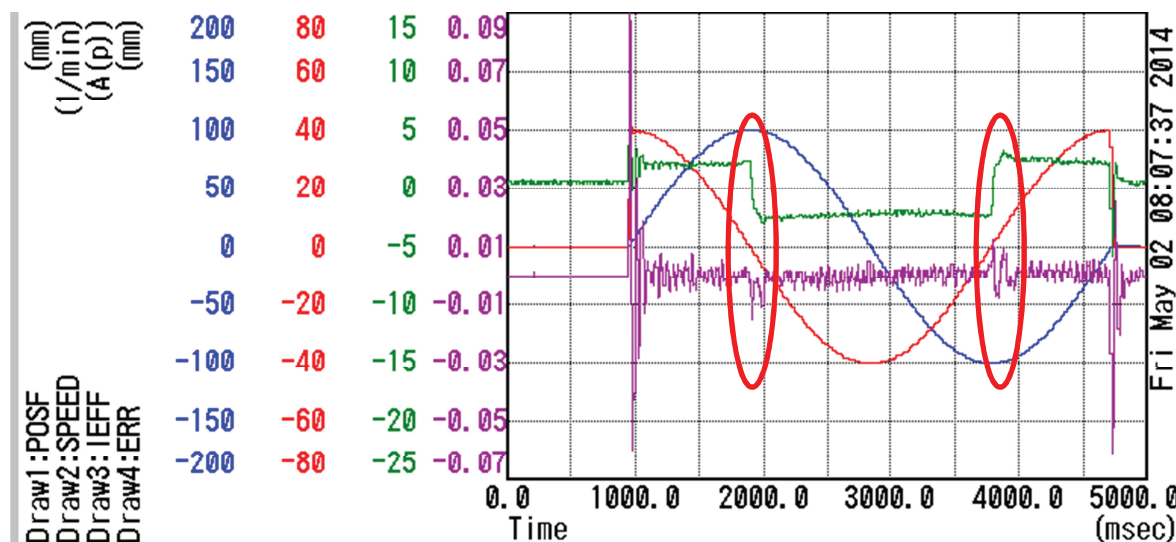
U přímých pohonů s lineárními motory se nevyskytují, neboť chybí jejich hlavní příčina – nepřesnost šroubu.



Obrázek 2-9 Graf měření kruhové interpolace na stroji s lineárními motory

Na Obrázek 2-9 je vidět absence špiček u pohonu s lineárními motory, a to i přesto že rozlišení je dvojnásobné.

Toto je jeden z důvodů použití lineárních motorů v obráběcích strojích, že kruhová interpolace je snáze nastavitelná a zároveň se dosahuje až dvojnásobku přesnosti oproti podobnému stroji s kuličkovým šroubem. Navíc je přesnost kruhové interpolace déle udržitelná, co se týče vůlí z opotřebení.



Obrázek 2-10 Průběh polohy, proudu a rychlosti při kruhové interpolaci (modře – poloha, červeně – rychlost, zelená – proud, fialová – odchylka polohy)

Obrázek 2-10. ukazuje průběh polohy, rychlosti, proudu a odchylky polohy při kruhové interpolaci. Zobrazen je průběh pouze na ose X. Průběh proudu a odchylky polohy kromě rozjezdu a brždění vykazuje právě v oblasti přechodu kvadrantů, tj. v oblasti kdy je rychlost téměř nulová, odchylku která se na kruhovém grafu projeví jako špičky, viz výše. Změna proudu není díky měřítku grafu moc znatelná, ale na průběhu chyby polohy je problém dobře vidět.

3. Simulace regulace polohy obráběcího stroje

3.1 Popis simulovaného stroje

Simulace bude porovnávána se skutečným průběhem regulace na stroji a61 výrobce Makino. Jedná se o horizontální obráběcí centrum. Pro simulaci i skutečný průběh je použita osa X. Osa X je poháněna synchronním motorem s permanentními magnety od firmy Fanuc, který pohání kuličkový šroub. Typ motoru je α F 22/ 3000. Označení znamená F, že jsou použity feritové magnety, 22 [Nm] je max. krouticí moment při stojícím motoru. 3000 jsou maximální otáčky motoru.

Další katalogové hodnoty:

Max. proud (špičkový)	80	A
Momentová konstanta K_M	1,8	Nm/A
Napěťová konstanta K_E	0,4	Vs/rad
Odpor jedné fáze R	0,16	Ω
Výkon P	4	Kw
Max.(špičkový) krouticí moment M_K	64	Nm

Bohužel výrobce v katalogu neuvádí parametry náhradního parametry náhradního schématu motoru nutné pro vytvoření modelu motoru při simulaci. Nicméně dle informací od techniků firmy Fanuc by indukčnost jedné fáze měla být 0,018 H

Dále je třeba znát mechanické údaje pro určení momentu setrvačnosti. Kuličkový šroub o průměru 45mm a délce 1200mm, má stoupání 16mm/ot. Šroub posouvá celý vřeteník i s vertikální osou Y, hmotnost celé soustavy je 1100kg.

Z těchto hodnot určíme moment setrvačnosti šroubu $J_{\xi} = \frac{7.8 \times 10^3 \times \pi}{32} \times 0,04^4 \times 1,2 = 0,0038 [kg \cdot m^2]$

Moment setrvačnosti motoru z katalogu je $J_M = 0,012 [kg \cdot m^2]$

Moment setrvačnosti celého vřeteníku je $J_V = 1100 \times \left(\frac{0,016^2}{2 \times \pi} \right) = 0,045 [kg \cdot m^2]$

Celkový moment setrvačnosti osy X je $J_X = J_{\xi} + J_M + J_V = 0,0606 [kg \cdot m^2]$.

Parametry nastavení regulátorů na skutečném stroji.

Proudový regulátor:

- Proporcionální zesílení -5416
- Integrální zesílení 1458

Rychlostní regulátor:

- Proporcionální zesílení -1775
- Integrální zesílení 198

Polohový regulátor:

- Proporcionální zesílení 5000

Jako další nastavení jsou k dispozici časové konstanty pro zrychlení-zpomalení v různých režimech, násobitele zesílení jednotlivých regulátorů pro různé režimy. Je možné volit zrychlení buď lineární nebo S-křivka.

Na stroji použitým k srovnání se simulací byl nastaven lineární průběh zrychlení, a pro sledované režimy řezného posuvu a rychloposuvu následující časové konstanty pro zrychlení-zpomalení. Pro rychloposuv je časová konstanta 120ms, pro řezný posuv je dána maximální hodnota zrychlení 1,025 m/s².

Maximální rychlost rychloposuvu je nastavena na 48 m/min, což odpovídá max. otáčkám motoru $v = 3000 * 0,016$ (stoupání šroubu) = 48.

Maximální rychlost řezného posuvu je nastavena na 40 m/min.

Stroj je vybaven lineárním odměřováním - snímačem polohy přímo na pohybující se části, tzn., jedná se o regulaci v uzavřené smyčce.

Snímač polohy je inkrementální optické pravítko Futaba FMC s rozlišením 0,1μm.

3.2 Simulační program

K simulaci servopohonu byl použit free software Scilab 5.5.0, který v rozhraní Xcos umožňuje sestavení simulací podobně jako Simulink. Software je dostupný na webových stránkách <http://www.scilab.org>. Simulovaný model lze vytvořit z předdefinovaných funkčních bloků. Vzhledem k tomu, že takto provedená simulace podle schématu uzavřené smyčky z Obrázek 1-6 se značně rozcházela s reálnými výsledky získanými ze stroje, byl vytvořen nový simulační program. V simulačním programu byla proudová smyčka nahrazena aperiodickým blokem, jehož parametry byly nastaveny s využitím reálných výsledků a údajů v literatuře.

Při simulaci pohonu bylo jedním z problémů určení počátečních hodnot zesílení a časových konstant. Nejdříve byly použity stejné hodnoty jako na stroji a po té byly upravovány. Jako další problém se ukázalo samotné provedení požadavku polohy, kdy bylo potřeba použít rampy, aby se průběhy simulace přiblížily skutečnosti.

Výstup simulace byl porovnáván s výstupem z diagnostického systému stroje ServoGuide. Bohužel tento diagnostický systém nemá výstup dat a provedená měření lze zaznamenat pouze snímáním obrazovky.

Simulace a porovnání se skutečným průběhem byla prováděna na dráze 1mm při omezení rychlosti na 48 m/min, a při omezení rychlosti na 1 m/min. 1mm dráha má simulovat jednotkový skok – poruchu polohy.

3.3 Diagnostické rozhraní ServoGuide

Jedná se o diagnostické rozhraní integrované v řídicím systému Fanuc 300i A. Pomocí tohoto rozhraní je možné kontrolovat, diagnostikovat a ladit pohony stroje.

Systém umožňuje 5 diagnostických režimů:

1. Y-time graf – sledování až čtyř veličin v čase
2. X-Y graf – sledování až čtyř veličin vzájemně vůči sobě
3. Kruhová interpolace – sledování až čtyř veličin při kruhové interpolaci
4. FFT analýza – rychlá Fourierova transformace
5. Bode graf – měření frekvenční charakteristiky daného pohonu

Je možné snímat více než 20 veličin, pro účely této práce budou použity tyto:

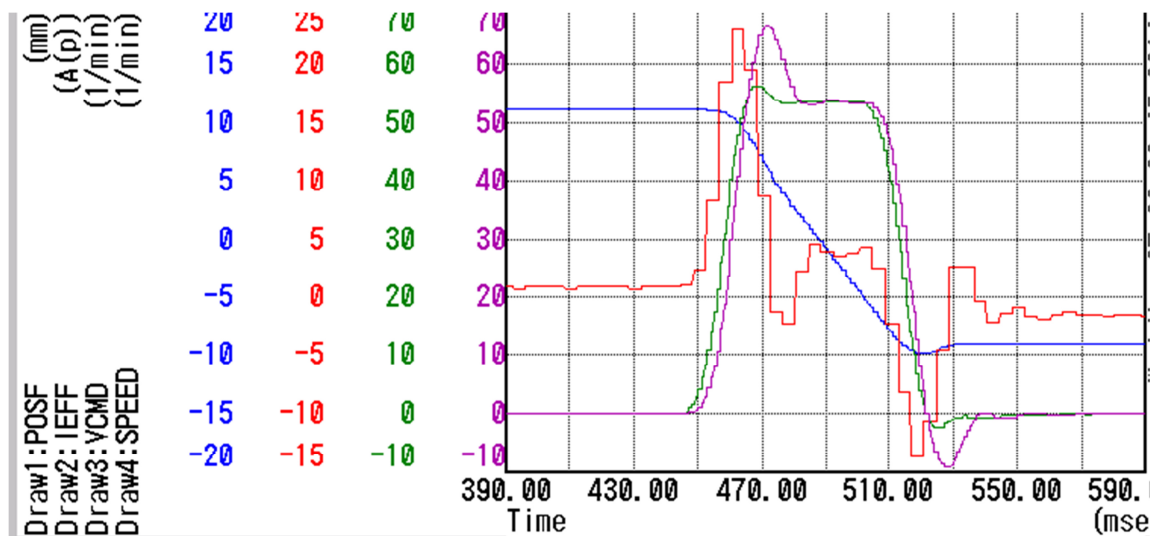
- POSF – poloha
- ERR – odchylka polohy
- IR nebo IEFF – proud ve fázi R, popř. efektivní hodnota proudu
- SPEED – otáčky motoru
- VCMD – požadavek na rychlost – výstup regulátoru polohy
- TCMD – požadavek na krouticí moment - výstup regulátoru rychlosti

Vzorkování signálu lze nastavit od 62,5 μ s až 100ms, z důvodu omezené paměti pro snímání je pro periody 62,5 a 125 μ s možné snímat max. 2 veličiny. Pro snímání dat v této práci je ve většině případů použita perioda 250 μ s, a to z důvodu že menší perioda nepřinesla přesnější výsledky a zároveň 0,25ms umožnilo nejlépe využít paměť vzorkování která je 10000 bodů. Pouze u měření na dráze 100mm a více byla použita perioda 1ms aby bylo možné nasnímat celý průběh. Bohužel při snímání dat se objevil problém kdy na jednom kanálu pro výstup byl střídavě nastaven POSF nebo ERR a při změně výstupu došlo ke špatné konverzi dat. Problém byl způsoben tím že POSF mělo výstup v mm a ERR v μ m. Proto na některých měřeních velikost neodpovídá, ale pokud není v popisu uvedeno jinak vždy byla dráha 1mm.

3.4 Simulace 1mm dráhy v rychloposuvu

Při této simulaci není maximální rychlost 48 m/min na 1mm dráze dosaženo, neboť celý děj trvá 80 – 90 ms jak je vidět na Obrázek 3-1 dole, přičemž časová konstanta pro zrychlení/zpomalení je v tomto případě 120 ms. Fialová křivka ukazuje rychlost motoru, zelená požadavek na rychlost. Je vidět že skutečná rychlost překmitne vlivem setrvačnosti o 10 otáček což je skoro 20%. Motor dosáhne 68 ot/min což odpovídá 1,1 m/min. Pokusem bylo zjištěno, že dráha musí být cca 130 mm, aby bylo dosaženo maximální rychlosti rychloposuvu 48 m/min. Omezující je na takto krátké dráze rychlý nárůst proudu, který dosahuje 22 A. Patrný je taky překmit polohy na modré křivce při brzdění. Pro sledování

regulace je zajímavější sledovat průběh odchylky polohy než samotnou polohu. Graf s průběhem chyby polohy je uveden v příloze. Odezva změny polohy na proud při rozjezdu je 10,5 ms, tato hodnota vyjadřuje mechanickou konstantu systému. Dosažení max. rychlosti je 20 ms což odpovídá časové konstantě dle rovnice (2-3) $\tau_v = \frac{J_M}{K_v \cdot K_M} = \frac{0,0606}{1,7 \times 1,8} = 0,019 \text{ ms}$.

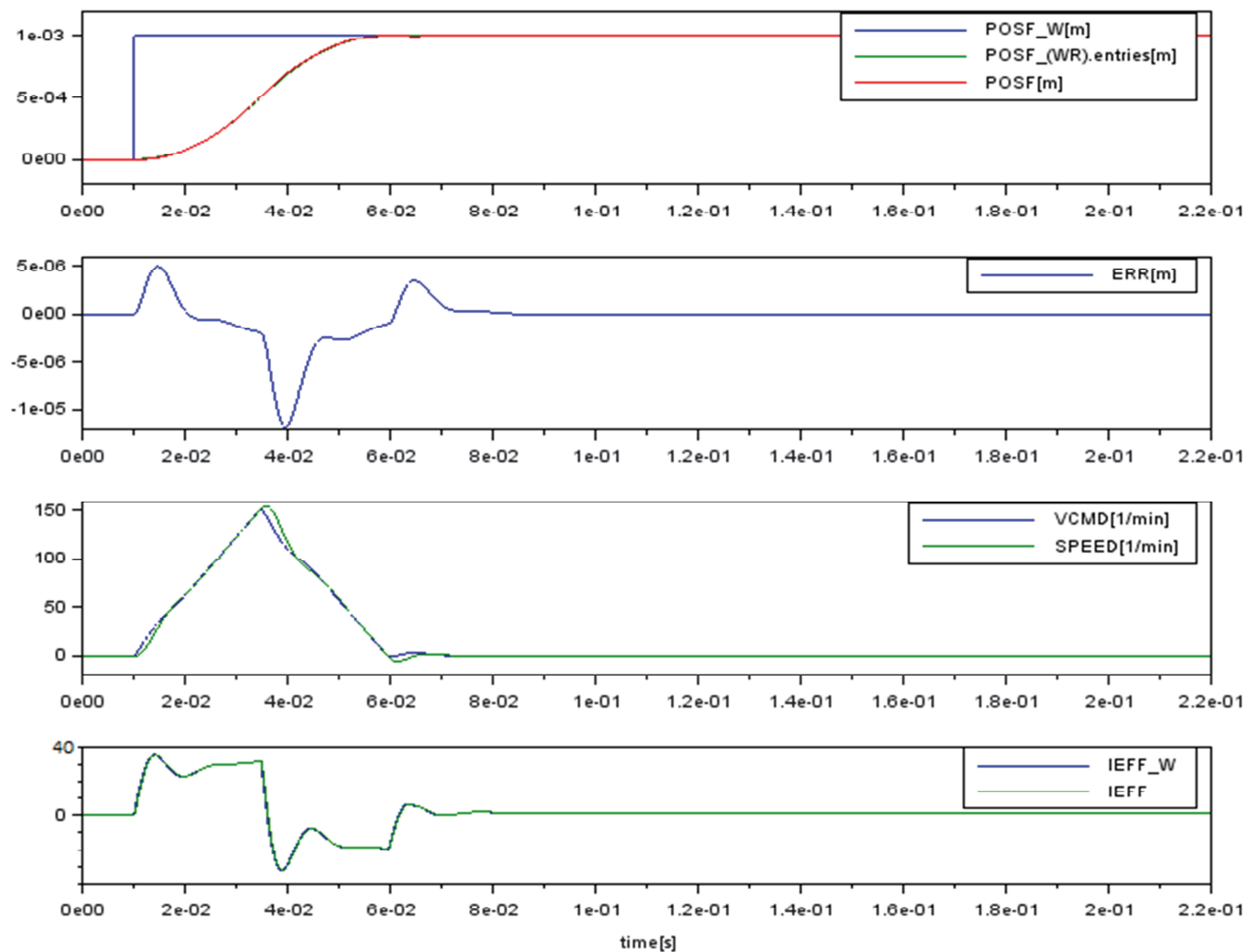


Obrázek 3-1 Posuv stroje o 1mm s průběhem proudu motoru(modře – poloha, červeně – proud, zelená – požadavek na rychlost, fialová – rychlost)

Při simulaci byly nejdříve dosazeny hodnoty zesílení jednotlivých regulátorů stejně jako na stroji. Vzhledem k tomu, že model je značně zjednodušený a přesný způsob použití hodnot zesílení v řídicím software stroje není znám, musely být hodnoty značně upraveny. Pro simulaci na obrázku 3-2 byly nastaveny následující parametry:

- Polohové zesílení: K_p 100000
- Omezovač výstupu reg.polohy : 3000
- Rychlostní regulátor: $K_v = 20$, $T_N = 0,0028$
- Omezovač výstupu reg. Rychlosti : 3000
- Omezovač výstupu reg. Proudu: 80

Takže hodnoty nastavení regulátorů se značně liší od hodnot na stroji. Důvod zřejmě bude, jak je uvedeno již výše v zjednodušení modelu a v tom, že výstupy regulátorů ve stroji jsou softwarově upravovány konstantami pro jednotlivé režimy. Rovněž jsou filtrovány tak aby se zamezilo vibracím stroje.

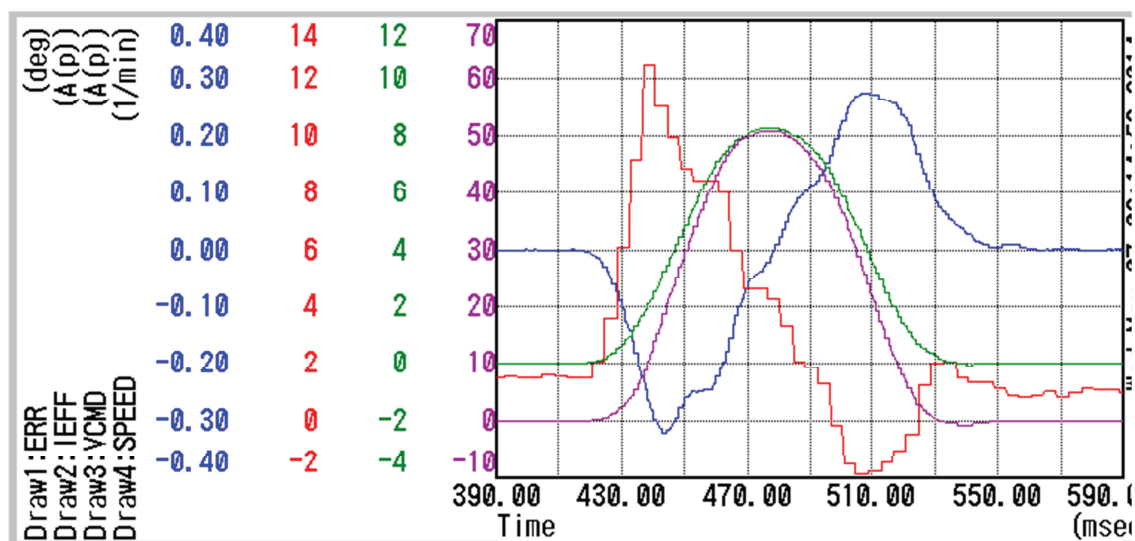


Obrázek 3-2 Průběh simulace rychloposuvu (POSF průběh polohy, ERR průběh chyby polohy, VCMD/SPEED průběh rychlosti, IEEF průběh proudu)

Průběh simulace je rychlejší než na stroji a motor dosáhne vyšších otáček 100 min^{-1} oproti 68 min^{-1} na stroji. Trojúhelníkový průběh bude zřejmě zapříčiněn jednak zanedbáním vlivu mechanických částí. Další důvod může být, že bude na stroji zrychlení řízeno S-křivkou. Hodnota proudu v simulaci je dvojnásobná 40A proti 20A na stroji, problém bude v náhradě proudové smyčky, která při vyšších rychlostech nevyhovuje. Průběh chyby je podobný jako na stroji, viz Obrázek 2-6.

3.5 Simulace dráhy 1mm při řezném posuvu 1m/min

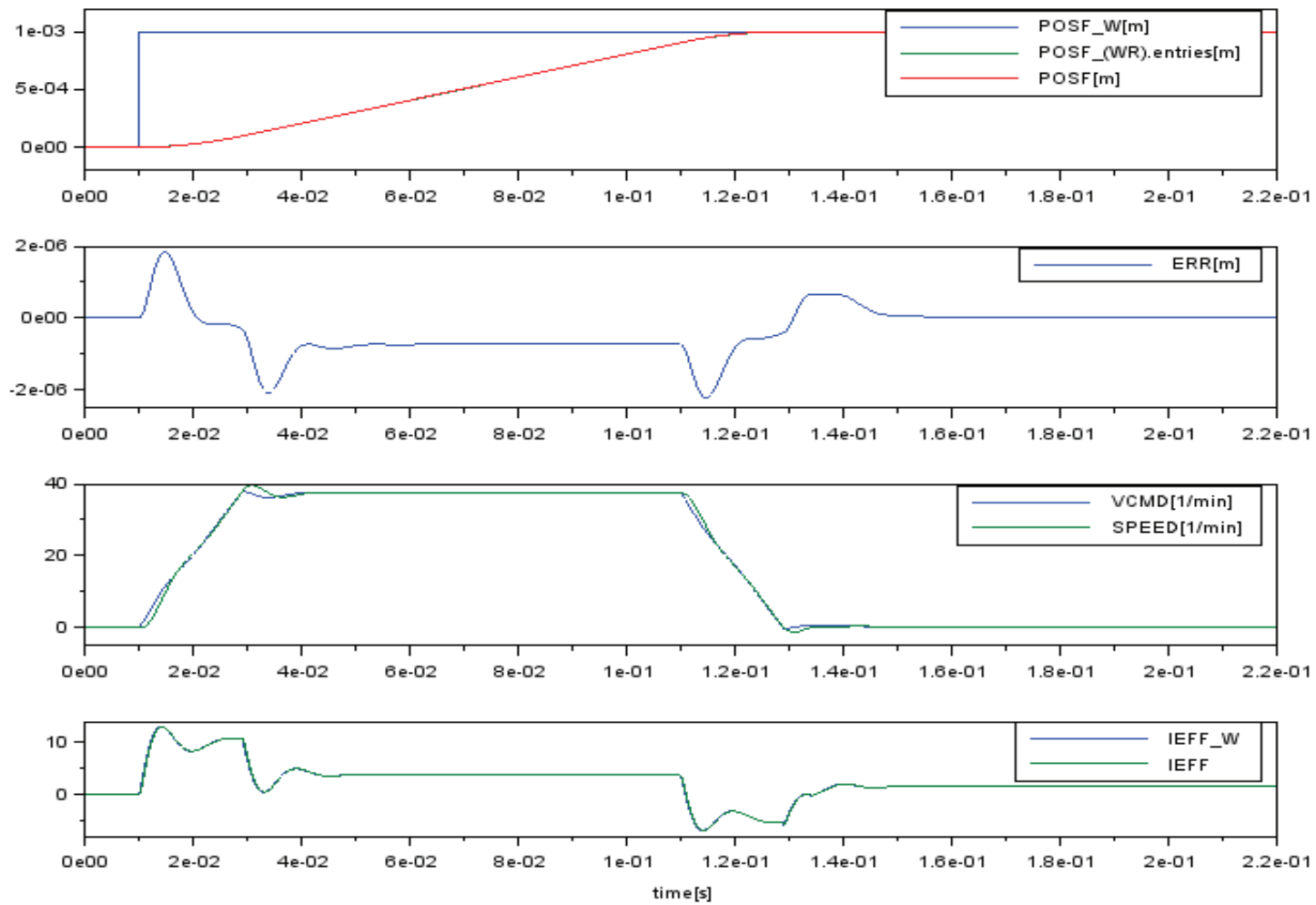
Při tom tomto posuvu je rychlost motoru omezena na $62,5 \text{ ot/min}$, maximální zrychlení je omezeno na $1,025 \text{ m/s}^2$. Rovněž hodnota maximálního proudu je omezena, dle návodu výrobce by měla hodnota proudu omezena na 70%. Zda skutečně je takto proud omezen se nepodařilo prokázat, protože se při tomto posuvu dostaneme na hodnoty kolem 12A, tedy asi pětinové



Obrázek 3-3 Průběh posuvu o 1mm rychlostí 1m/min

Zde je už použit graf s průběhem chyby polohy. Kvůli vertikálnímu posuvu požadavku na rychlost (VCMD) a rychlosti (SPEED) není hned patrné, že rychlost překročí požadavek o 10. Zajímavé je, že oproti rychloposuvu je téměř dosaženo maximální rychlosti $62,5 \text{ ot/min}$ i na takto krátké dráze, dosažená rychlost je 52. Rovněž brzdění zde probíhá s podstatně menší chybou polohy než u rychloposuvu. Což naprosto odpovídá požadavku, že při řezném posuvu je kladen důraz na přesnost polohy. Detail překmitu polohy při rychlosti 1m/min je v příloze. Celý děj trvá 140 ms.

Pro simulaci tohoto posuvu bylo třeba upravit nastavení omezovačů výstupu rychlostního regulátoru a limit zrychlení. Maximální výstup rychlostního regulátoru může být $62,5$, zrychlení bylo omezeno na $1,025 \text{ m/s}^2$. Maximální hodnota zrychlení ale musela být snížena, protože simulace byla příliš rychlá. Samotný stroj tohoto zrychlení nedosáhne. Zrychlení na stroji vychází okolo $0,3 \text{ m/s}^2$. Při použití tohoto zrychlení se délka děje v simulaci přibližuje skutečnosti. Rychlost opět roste lineárně, a průběh proudu je spíše obdélníkový.



Obrázek 3-4 Průběh simulace řezného posuvu (POSF průběh polohy, ERR průběh chyby polohy, VCMD/SPEED průběh rychlosti, IEFF průběh proudu)

3.6 Porovnání vlivu změny nastavení regulační smyčky na stroji a při simulaci

Při měření na skutečném stroji byla zjištěna dost zásadní necitlivost nastavení proudové a rychlostní regulace na stabilitu regulace. Při změně zesílení proudové smyčky v rozsahu 50 - 200% odladěného zesílení se neprojeví žádné podstatné změny v průběhu regulace polohy. Byly odzkoušeny hodnoty zesílení:

- Proporcionální 2700 a 10800
- Integrovní 729 a 3000

Obě hodnoty byly vždy měněny současně.

U nastavení rychlostního regulátoru byl proveden stejný test s tím, že nastavení proudové regulace bylo vráceno zpět k odladěným hodnotám. Opět byly testovány hodnoty v rozsahu 50- 200% zesílení. I v tomto případě zůstala regulace stabilní, ale vliv změny zesílení se projevil v zrychlení nebo zpomalení regulace.

Byly odzkoušeny tyto hodnoty:

- Proporcionální 880 a 3500
- Integrovní 99 a 400

Grafy nasnímané při různém zesílení rychlostní smyčky jsou uvedeny v příloze.

Při simulaci byly použity také poloviční a dvojnásobné hodnoty zesílení a časových konstant. Vzhledem k tomu, že proudová smyčka byla nahrazena aperiodickým blokem, byly testovány pouze změny rychlostního a polohového regulátoru.

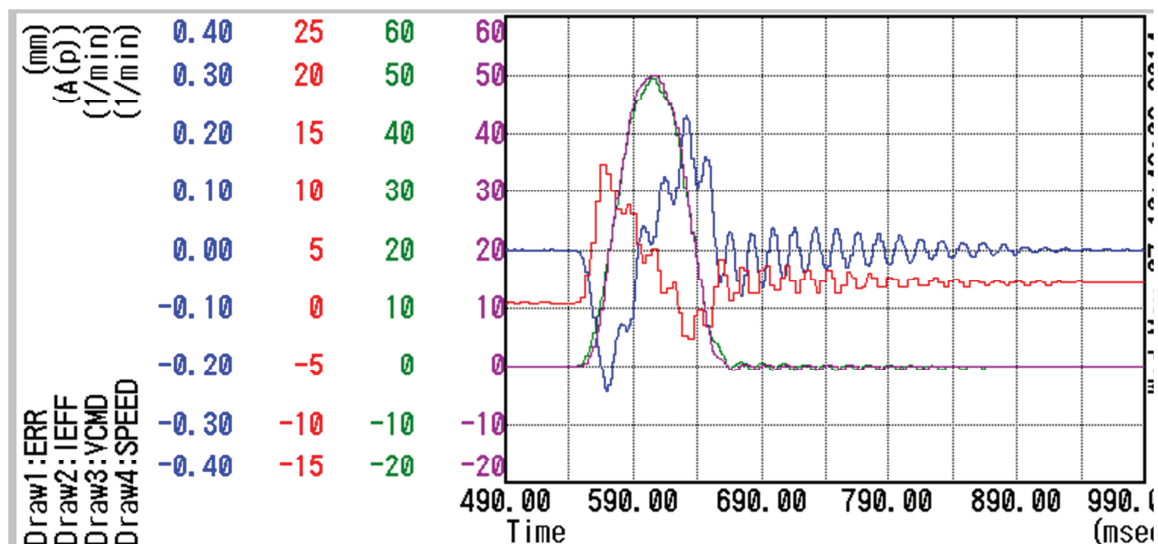
Pro rychlostní regulátor byly použity hodnoty

- $K_v = 10$ a $K_v = 40$
- $T_n = 0,006$ a $T_n = 0,0014$

Při větším zesílení rychlostního regulátoru se zmenší chyba polohy a to tak, že násobně úměrně tj. v tomto případě na polovinu. Při polovičním zesílení naopak chyba stejným způsobem vzroste. Ten samý efekt má změna zesílení i na stroji. Délka děje se ale tímto nastavením neovlivní. S klesajícím zesílením roste zvlnění proudu. Výstupy simulace s různým nastavením rychlostního regulátoru jsou uvedeny v příloze.

Dále byl testován vliv zesílení polohového regulátoru na stroji.

Při polovičním zesílení se regulace polohy prodloužila o 10ms, respektive o tuto dobu se prodloužila doba akcelerace. Při dvojnásobném zesílení se naopak doba akcelerace zkrátila o 12 ms. Doba akcelerace při originálním nastavení je 62 ms, takže vyjádřeno v procentech je vliv zesílení celkem významný $\pm 16\%$. Ale v praktickém vyjádření je nevýznamný, protože by dobu obrábění zkrátil v řádu sekund. Navíc zde hrozí riziko vzniku rázů a vibrací, neboť test byl prováděn na nezatíženém stroji a pouze při posuvu 1m/min. Pokud by stroj s takovým to nastavením obráběl, mohlo by se chování regulace podstatně změnit, nehledě na to že pro různé režimy stroje je hodnota zesílení rychlostního regulátoru násobena nejrůznějšími koeficienty, a pak by výsledná hodnota mohla dosáhnout extrémních hodnot.



Obrázek 3-5 Chování regulace při dvojnásobném zesílení polohy

Při ještě větším zesílení by kmitání trvalo tak dlouho, že by po uplynutí doby na stabilizaci chyba polohy v ustáleném stavu překročila nastavenou hodnotu a CNC řízení by pohon vypnulo a stroj by spadnul do poruchy. Naopak při dalším snižování zesílení by chyba polohy překročila přednastavenou max. chybu při pohybu a opět by byl pohon vypnut z důvodu poruchy. Tento stav byl na stroji odzkoušen a graf s měřením je uveden v příloze.

Při simulaci se vycházelo z hodnoty zesílení $K_p = 100000$, odladěné při prvním nastavování simulačního modelu. Při polovičním zesílení $K_p = 50000$, opět jako u změny rychlostního regulátoru dojde k zvětšení odchylky polohy.

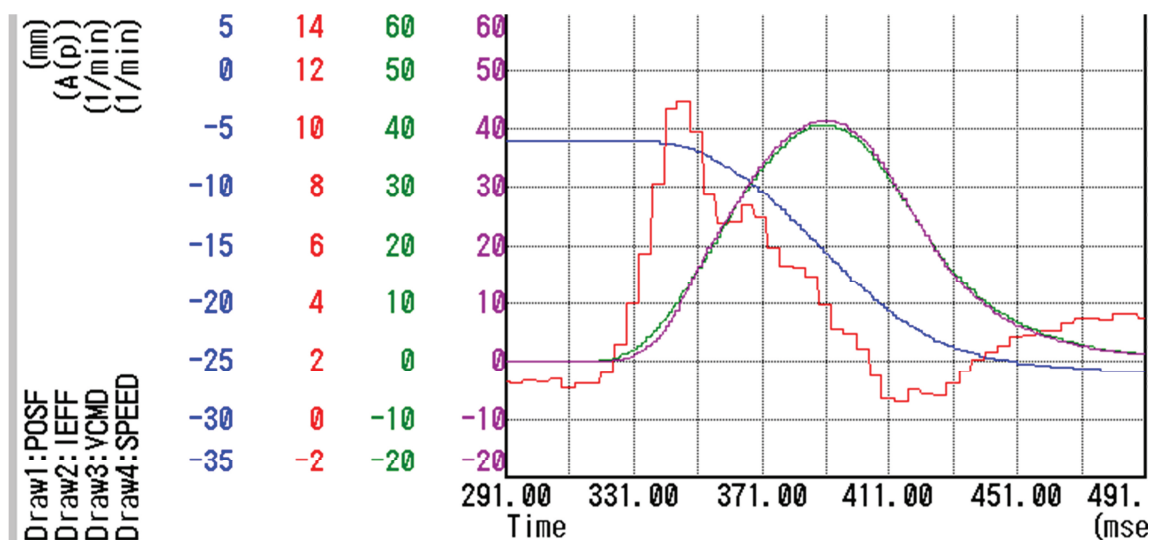
Dvojnásobné zesílení způsobí sice zmenšení maximální odchylky polohy, ale také zvlnění proudu.

3.7 Vliv předkorekce na regulaci polohy

Zde byl zjišťován vliv feedforwardů na průběh regulace polohy. Vzhledem k tomu že polohový feedforward kompenzuje chybu montáže a nepřesnost výroby a vyžadoval by simulační model stroje, nebude v simulaci ani na stroji jeho vliv testován. Rovněž proudový feedforward je záležitost software měniče a přístup k jeho nastavení je zablokován.

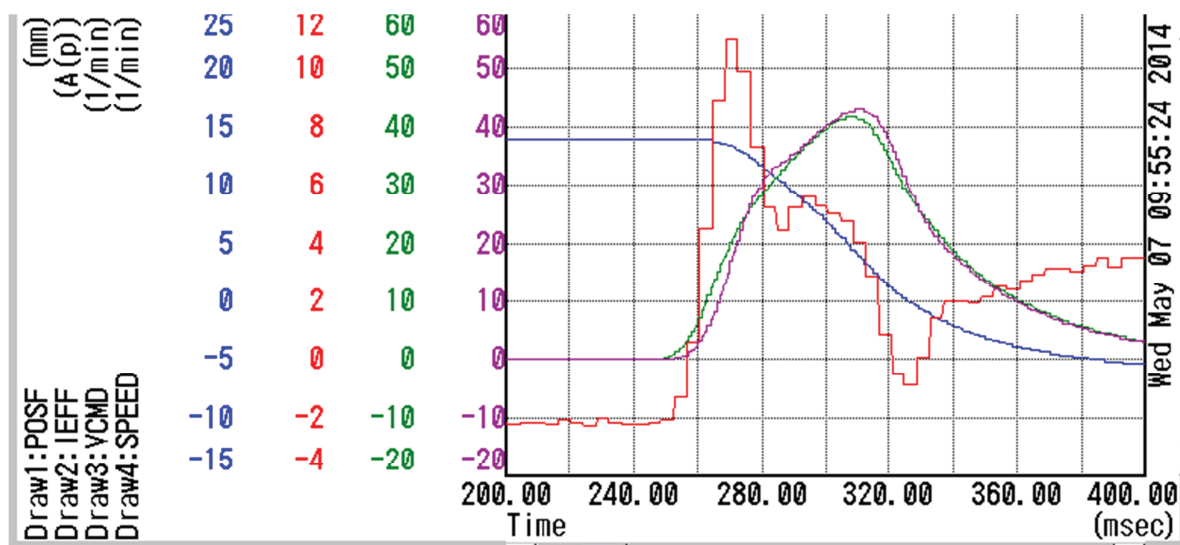
Proto bude test prováděn jen s rychlostní předkorekcí. Pro zjištění vlivu rychlostního feedforwardu bude použit podobný postup jako u testování zesílení. Na stroji dosud provedená měření byla se zapnutou předkorekcí, takže bude provedeno měření bez předkorekce a po té s poloviční a dvojnásobnou hodnotou.

Hodnota rychlostního feedforwardu na stroji je nastavena na 300.



Obrázek 3-6 Regulace polohy bez rychlostní předkorekce, řezný posuv

Obrázek 3-6 ukazuje, jak se změnila regulace polohy bez předkorekce, absence předkorekce se projeví menším zrychlením a tím prodloužením děje. Přičemž na dráze 1mm při rychlosti 1m/min je vliv feedforwardu zanedbatelný. Dosažené otáčky motoru jsou sice o 10 menší, ale celková doba děje je jen o 20 ms delší. U delších drah a zejména větších rychlostí se vliv předkorekce projeví razantněji. Nejvíce je vidět vliv při rychloposuvu kdy křivka rychlosti má mnohem menší strmost a je zhruba v polovině zalomená oproti průběhu s předkorekcí.



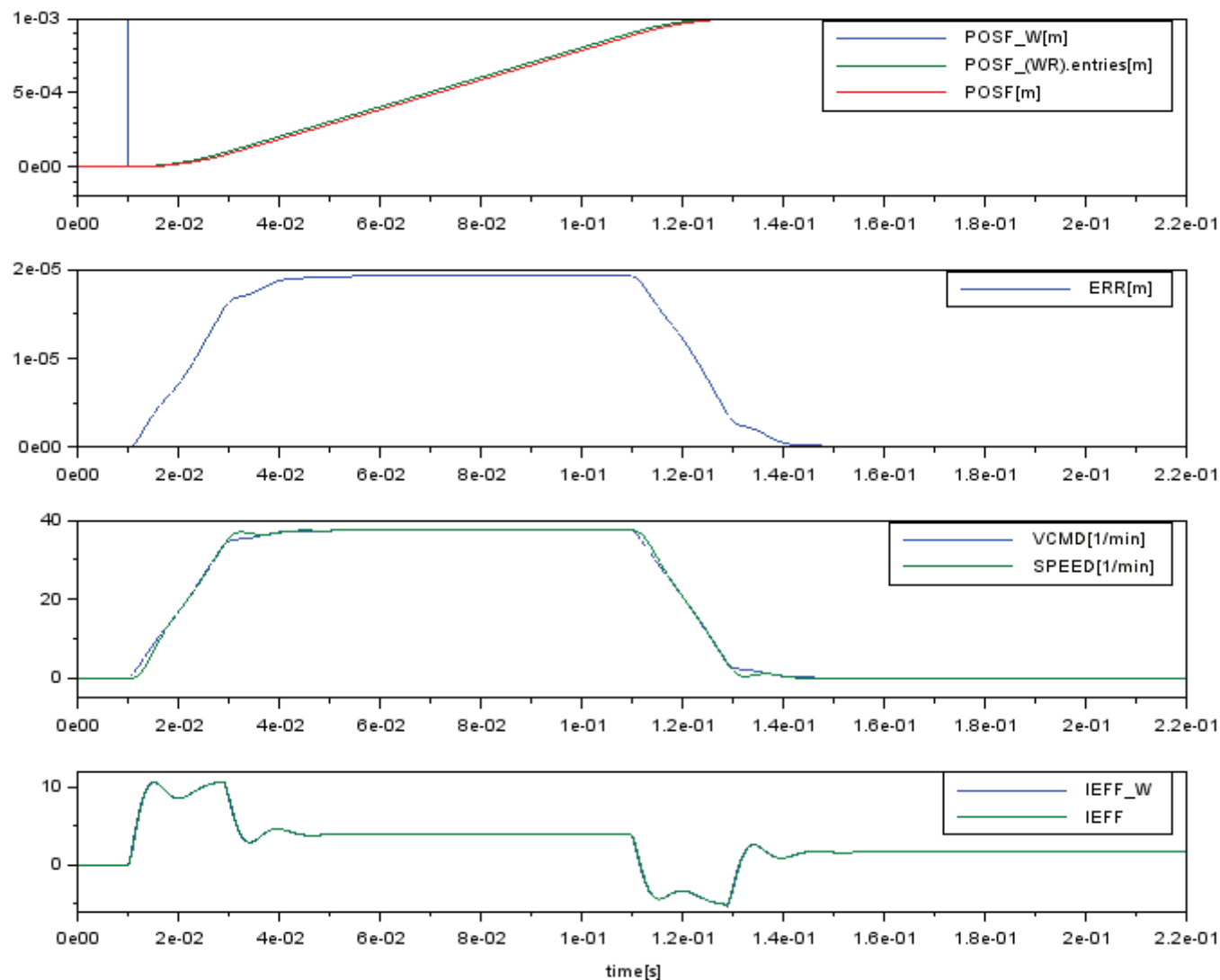
Obrázek 3-7 Rychloposuv bez rychlostního feedforwardu

Doba celého děje se prodlouží z 90 ms na 170ms, což je téměř dvojnásobek

Při nastavení poloviční předkorekce je se děj příliš nezmění, jen dojde k nepatrnému zrychlení. Při nastavení hodnoty 600 tedy dvojnásobku dojde k zvětšení zrychlení, ale opět na dráze 1mm při rychlosti 1m/min není rozdíl podstatný. Grafy nasnímané při různých hodnotách feedforwardu jsou uvedené v příloze.

Feedforward je proveden tak že požadavek na polohu je vynásoben koeficientem, zderivován a předán rovnou do regulátoru rychlosti. Koeficient je udáván v procentech, takže 300 znamená 3 násobné zesílení. Pro simulaci byla nejdříve zvolena hodnota 300 tak jako na stroji. Ale experimentálně byla odladěna hodnota 400, kdy průběh simulace přibližuje stroji.

Vliv feedforwardu v simulačním modelu je tak velký, že potlačí vliv polohového zesílení K_p . Při nastavené hodnotě $K_w = 400$ je možné měnit polohové zesílení ve velkém rozsahu, aniž by se podstatně změnil průběh regulace. Naopak změna K_w má na celý děj velký vliv. Při polovičním K_w se naprosto změní průběh odchylky polohy, a chyba vzroste o jeden řád. Při dvojnásobném K_w je chování smyčky podobné, jen chyba polohy nabývá záporných hodnot, tj. skutečná poloha předbíhá požadovanou. Toto vlastně odpovídá specifikaci feedforwardu, že na vstup rychlostního regulátoru přivádí násobně zvýšený požadavek. Nicméně v tomto případě se simulace rozchází se strojem nejvíce. Na stroji má velikost feedforwardu vliv především na délku průběhu děje. V simulaci ovlivňuje pouze průběh chyby. Toto bude zřejmě způsobeno špatně provedeným modelem feedforwardu v simulaci. Z provedených pokusů je zřejmé, že vliv rychlostní předkorekce roste s délkou dráhy a zejména s rostoucí rychlostí. Vhodně nastavená předkorekce může výrazně zrychlit regulaci a zároveň umožní snížit polohové zesílení a tím udržet stabilitu.



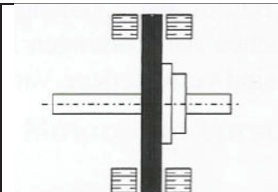
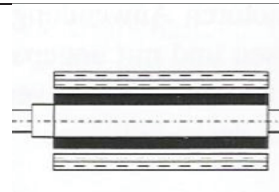
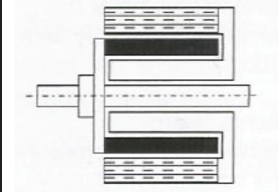
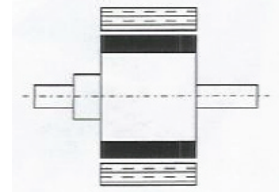
**Obrázek 3-8 Simulace dráhy 1mm při rychlosti 1m/min s předkorekcí $K_W = 200$
 (POSF průběh polohy, ERR průběh chyby polohy, VCMD/SPEED průběh rychlosti, IEEF průběh proudu)**

4. Druhy motorů v pohonech obráběcích strojů

4.1 Konstrukční provedení servomotorů

Servomotory se podle použití dají rozdělit do 4 konstrukčních skupin, podle způsobu uspořádání rotoru a statoru, viz Obrázek 4-1. Toto rozdělení je shodné pro střídavé i stejnosměrné servomotory. Zcela zvláštní kapitolou jsou lineární motory, které jsou konstrukčně naprosto odlišné.

Dalším rozdílem může být způsob chlazení motoru, kdy je servomotor chlazen vzduchem s buď externím nebo integrovaným ventilátorem. Druhým způsobem je kapalinové chlazení, kdy se někdy využívá vodního chlazení ale častěji olejové chlazení. Kdy se chladicí olej používá jak chlazení motoru tak třeba i dutých kuličkových šroubů a dalších pohybových částí stroje kde hrozí oteplení vlivem pohybu stroje.

	<p>Kotoučový rotor Vysoká přesnost polohování Široký rozsah otáček</p>		<p>Štíhlý rotor Malý moment setrvačnosti Vysoká tuhost</p>
	<p>Bubnový rotor Pro vysoké otáčky Nízký moment setrvačnosti</p>		<p>Široký rotor Velká proudová přetížitelnost Vysoké krouticí momenty</p>

Obrázek 4-1 Konstrukční provedení servomotorů [5]

Každé provedení je vhodné pro jiné použití. Provedení se štíhlým rotorem je velmi vhodné pro použití v elektrovřetenech pro vysoké otáčky, široký rotor je naopak vhodný pro přímé pohony rotačních stolů, které pracují s velkými momenty při malých otáčkách.



Obrázek 4-2 Lineární motor Siemens [7]

4.2 Stejnosměrné motory

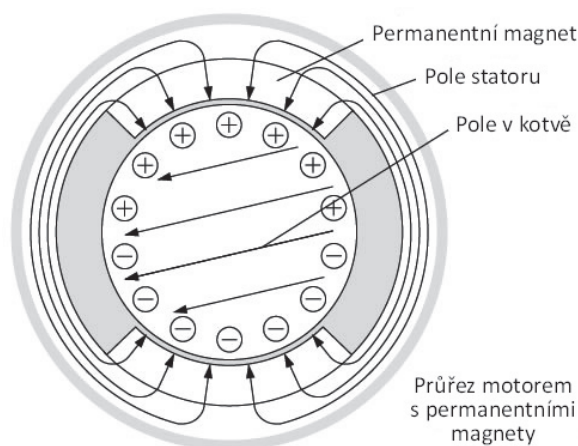
Jako pohony obráběcích strojů se běžně používali asynchronní motory spolu s přestavitelnou převodovkou. Tento způsob, který se i dnes stále používá u konvenčních obráběcích strojů, byl pro použití na CNC strojích problematický, regulace by byla stupňovitá a samotné provedení by bylo dost komplikované.

Vzhledem k tomu že počátky CNC strojů spadají do začátku 50. let 20. století, kdy nebyli výkonové polovodičové prvky na vysoké úrovni, byly hlavně používány hydromotory které díky servoventilům nabízely v té době vynikající regulovatelnost.

Posléze v průběhu 50. let se začali používat stejnosměrné motory s permanentními magnety regulovatelné změnou napětí. Stejnosměrné motory byli dominantním pohonem až do konce 60. let minulého století [8] kdy se díky rozvoji polovodičových součástek daly sestavit měniče umožňující použití střídavých motorů.

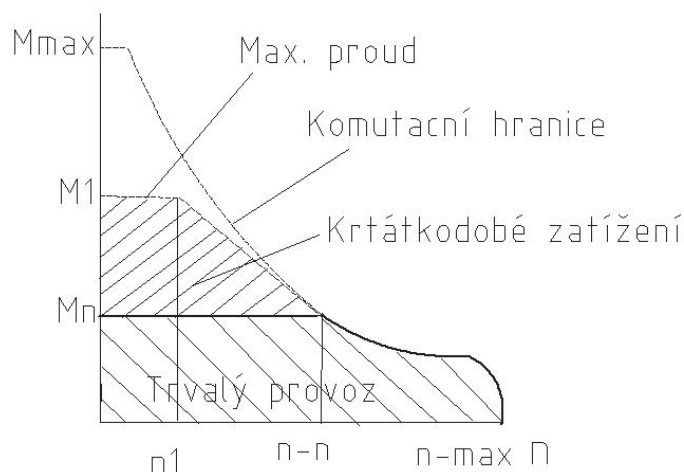
4.2.1 Vlastnosti stejnosměrných motorů

Jako stejnosměrné servomotory se používali ss motory s permanentními magnety na bázi samaria-kobaltu, kde odpadlo budící vinutí a tím se zjednodušilo zapojení a snížily se Joulovy ztráty [8]. Permanentní magnety působí jako stabilní zdroj budícího magnetického pole, tím je motor stabilnější při proměnlivém zatížení. Na druhou stranu není možnost řídit motor budícím proudem. Zbývá tedy pouze regulace napětím.



Obrázek 4-3 SS servomotor s permanentními magnety [3]

Výhodou ss servomotorů je konstantní průběh krouticího momentu v oblasti jmenovitých otáček. Při překročení jmenovitých otáček dochází sice k poklesu krouticího momentu, ale vhodným dimenzováním pohonu lze zabránit provozu nad jmenovitými otáčkami.



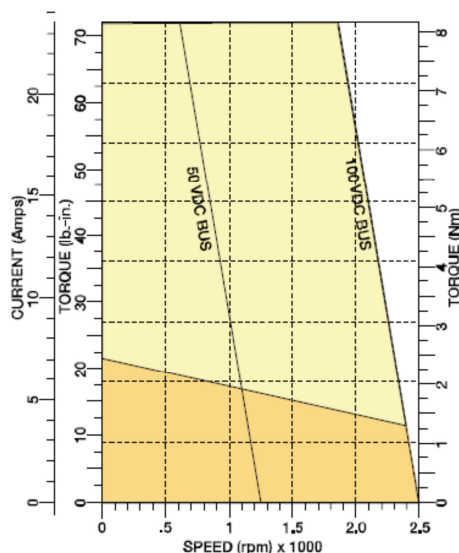
Obrázek 4-4 Momentová charakteristika ss motoru [5]

Maximální proud u stejnosměrného motoru je omezen konstrukcí komutátoru, jaký je schopen přenést bez poškození kontaktů.

Komutátor je rovněž omezujícím prvkem, co se týče maximálních otáček motoru. To je problém u vysokootáčkových větven. Naopak u posuvů se často za ss servomotor zařazovala redukční převodovka ke snížení otáček, ale to se jednalo o řešení používané před nástupem HSC frézování, kdy se používali menší posuvové rychlosti.

Asi nejdéle se udrželi ss servomotory v pohonech elektroerozivních strojů. Kde jsou vzhledem k charakteru tohoto obrábění potřebné menší rychlosti a tím i menší zrychlení. Rovněž potřebný krouticí moment je řádově menší než u frézovacích center.

V současné době se stejnosměrné servomotory v hlavních pohonech obráběcích strojů téměř vůbec nepoužívají. Můžeme se setkat s jejich použitím na různých pomocných pohonech, kde se využívá jednoduchosti řízení. Jedná se o posuvy drátů u elektroerozivních strojů, posuvy doteků na kontrolu nástrojů, rotačních skel atd.

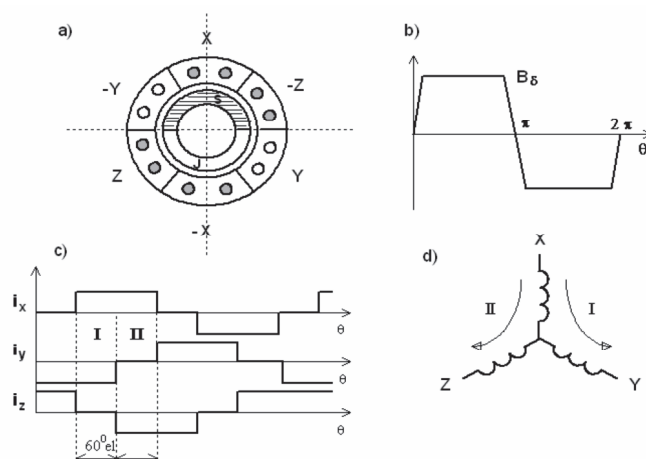


Obrázek 4-5 Zatěžovací charakteristika moderního ss servomotoru [9]

4.3 Motory s elektrickou komutací

Tento druh motoru je často označován jako stejnosměrný motor bez komutátoru, kdy komutace se provádí elektronicky, tranzistorovým měničem. Konstrukčně se od ss

servomotoru liší absencí komutátoru a dále tím že permanentní magnety jsou umístěné na rotoru.



Obrázek 4-6 Elektronicky komutovaný motor, a) řez motorem, b) tvar indukce, c) proud podle polohy rotoru, d) schéma vinutí statoru [10]

Nepřítomností mechanického komutátoru odpadá jedna z hlavních nevýhod ss motoru. Komutátor je opotřebitelný díl, což zvyšovalo náklady na údržbu a za druhé maximální rychlost komutace ohraničuje dynamické vlastnosti motoru. Nevýhodou proti ss motoru je nutnost použití komutačního snímače k řízení spínání tranzistorů.

Komutační snímač je snímač okamžité polohy rotoru, který musí rozlišovat tolik poloh kolik pólů má motor x počet fází, aby byl schopen spínat tranzistory měniče.

Používané motory jsou nejčastěji 6-ti pólové, ale může být i vyšší počet pólů.

Další výhodou elektronicky komutovaných motorů je to, že vinutí je ve statoru a tím i Joulovy ztráty vznikají ve statoru, který se podstatně lépe chladí.

EC motory se díky, správnému napojování proudů- elektronické komutaci, vyznačují rovnoměrným chodem [3], tzn. při konstantní rychlosti minimálním zvlněním momentu.

4.4 Synchronní motory s permanentními magnety

Synchronní motory s permanentními magnety s třífázovým vinutím statoru jsou nejmodernější a v současnosti nejpoužívanější pohony v obráběcích strojích. V literatuře se často používá označení AC motory. Používají se v dvou provedeních buď jako rotační nebo lineární.

Principiálně se AC motor podobá EC motoru, permanentní magnety jsou umístěné na rotoru, a vinutí se nachází ve statoru. Hlavní rozdíl spočívá v tom, že průběh indukovaného napětí ve vzduchové mezeře je u EC motoru obdélníkový, AC motor má průběh sinusový.

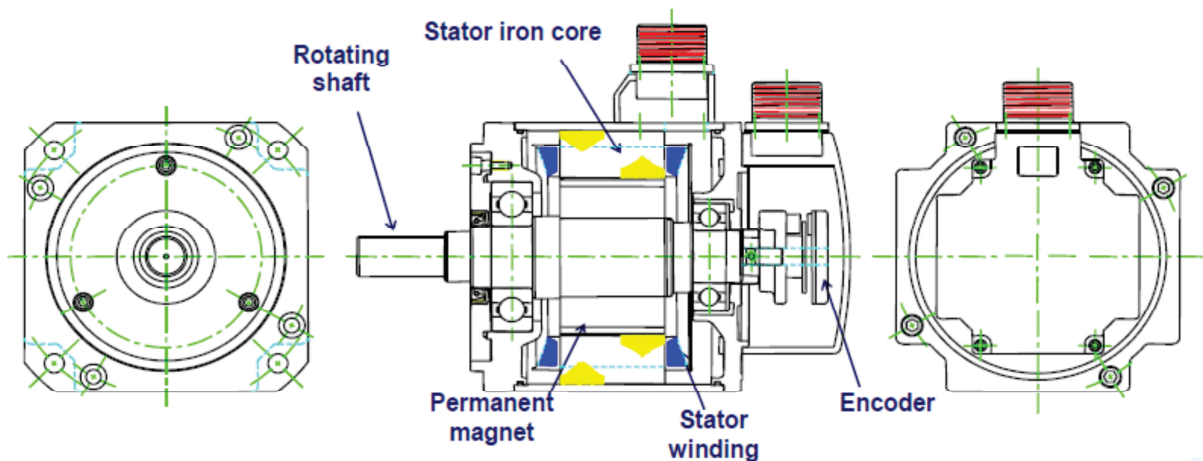
Použití těchto motorů bylo podmíněno rozvojem polovodičové výkonové elektroniky, bez které není možné tyto motory řídit. Složitost řízení těchto motorů spočívá v tom, že je třeba znát přesnou polohu rotoru, tato nutnost vyplývá právě ze sinusového průběhu indukovaného napětí. Proto je nutné aby spínací tranzistory byli stále v činnosti. Zatím co u EC motoru musí dojít ke komutaci při otočení o polpár, u AC motoru se napětí musí měnit průběžně s natočením rotoru, tak aby bylo stále zachováno 90° natočení pole statoru vůči rotoru. Proto musí být motory vybaveny přesným snímačem polohy, který ale stejně je třeba k řízení polohy stroje. Takže by musel být použit i u DC nebo EC motorů.

Při 90° natočení je maximální krouticí moment motoru. V praxi samozřejmě není tento úhel přesně dodržen [3] a mění se v závislosti na zátěžném momentu, rychlosti otáčení. Zejména se

vzrůstající rychlostí otáčení tato chyba roste, a musí se pomocí opatření v regulační smyčce kompenzovat.

Nevýhodou je, že tento snímač musí být použit i v případě, že regulace polohy je prováděna v uzavřené smyčce. V případě rotačního motoru musí být snímač na motoru pro určení polohy rotoru, a další snímač, většinou lineární pro snímání polohy stroje. U lineárních motorů je situace ještě odlišnější, jak bude popsáno v samostatné kapitole.

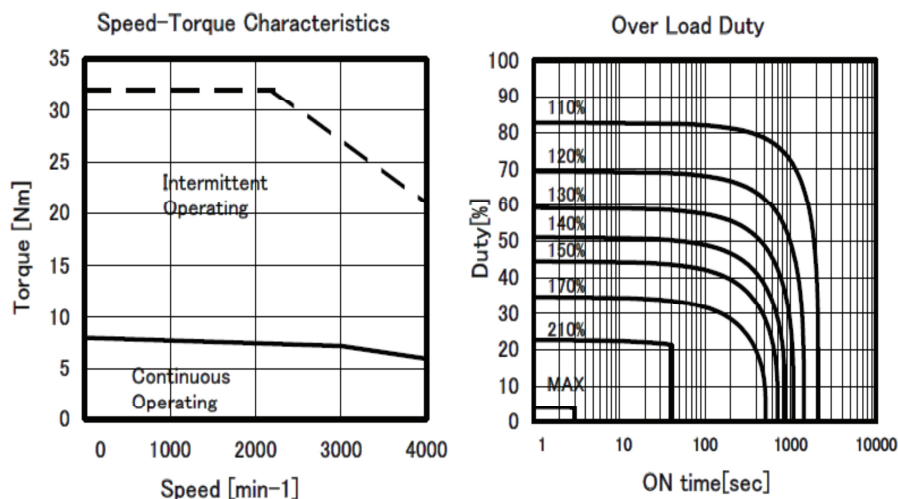
Samotná konstrukce motoru sestává z rotoru, na kterém jsou umístěny magnety, dnes se nejvíce používají Nd-Fe-B magnety. Stator tvoří tři cívky nejčastěji zapojené do hvězdy.



Obrázek 4-7 AC servomotor [11]

Synchronní servomotory s permanentními magnety mají velmi příznivý průběh momentu až do maximálních otáček. Mají velmi dobrou přetížitelnost a při přetížení jsou stabilní, ke kontrole přetížení mají ve vinutí umístění termistor, který snímá teplotu motoru.

Velmi často je součástí motoru brzda, která slouží k zajištění polohy v klidové poloze nebo vypnutém stavu, popř. u gravitačních os brání spadnutí osy při výpadku napájení.



Obrázek 4-8 Momentová a zatěžovací charakteristika AC servomotoru [2]

Na Obrázek 4-8 je možné vidět, že motor firmy Fanuc model ai S 8/4000, o jmenovitém výkonu 2,5 kW a standartním M_k 8Nm je možné po dobu až 15s více než dvojnásobně přetížít s tím max. M_k dosahuje až 32 Nm.

Další výhodou je menší velikost při stejném výkonu oproti asynchronním motorům.

4.4.1 Lineární AC motory

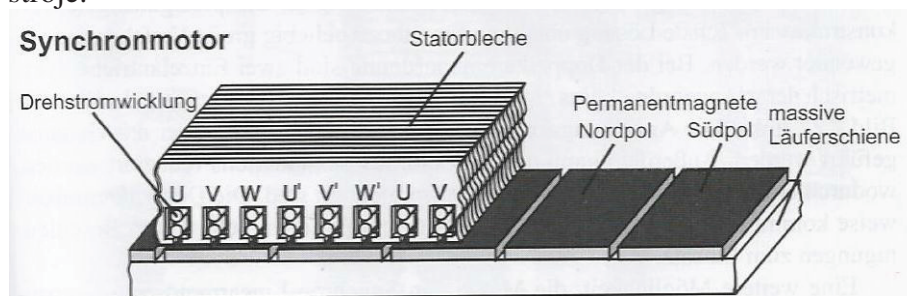
Lineární AC motory jsou nejmodernějším pohonem v obráběcích strojích. Hlavním důvodem použití lineárních motorů je odstranění nevýhod převodu mechanické energie z rotačního pohybu na přímočarý. Kuličkové šrouby používané k tomuto účelu jsou limitovány přesností jejich výroby, pohybem ve vysokých rychlostech se zahřívají a dochází k tepelné dilataci, šrouby se časem opotřebovávají, při velkých zrychleních šrouby díky pružnosti část energie akumulují a tím dochází ke zpoždění pohybu. Další vlivy na převodu má uložení šroubu, spojka mezi motorem a šroubem atd.

Všechny tyto vlivy jsou u lineárního motoru odstraněny. Na druhou stranu použití lineárních motorů má také svoje problémy, které je třeba zohlednit v konstrukci stroje.

Lineární motor může být jako samostatný motor, nebo jako integrovaný do lineárních vedení stroje, kdy plní funkci pohonu a zároveň konstrukční části stroje.

Tvary a provedení lineárních motorů jsou velmi rozmanitá podle potřeb zákazníků.

Základní provedení je, ale vždy takové, že v primární části je vinutí motoru a v sekundární permanentní magnety. Rovněž nelze jednoznačně označit stator a „rotor“, protože jak primární tak sekundární část lze použít jako pevná nebo pohyblivá, to záleží na konkrétním uspořádání stroje.



Obrázek 4-9 Lineární synchronní servomotor [5]

4.5 Asynchronní motory

Ačkoli asynchronní motory patří dnes k nejpoužívanějším druhům elektrických motorů, na CNC strojích se jako pohony polohovacích os používají velmi zřídka. Problém je v nejsložitější regulaci ze všech uvedených motorů, rovněž oteplení rotoru vlivem indukovaných proudů způsobuje problémy při korekcích polohy.

Z těchto důvodů se asynchronní motory používají k pohonům periferií strojů, jako jsou čerpadla, odsávací ventilátory, dopravníky třísek atd.

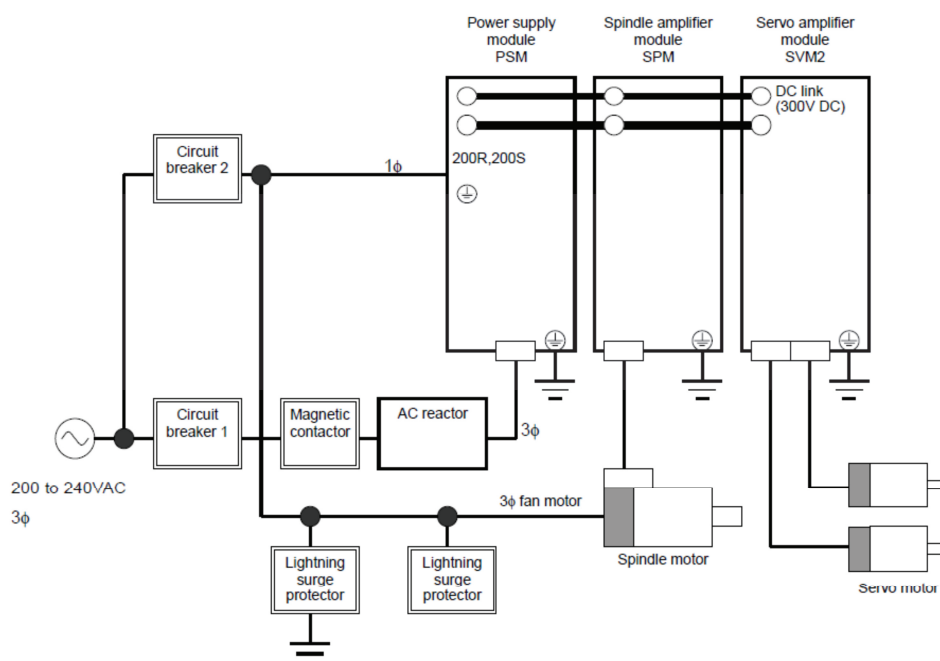
Nicméně vývoj v této oblasti pokračuje a v budoucnosti je možné větší použití asynchronních motorů pro pohony posuvů.

5. Řízení pohonů CNC obráběcích strojů

5.1 Regulace a řízení servopohonů se synchronními motory s permanentními magnety (AC servomotorů)

První měniče používané pro řízení AC motorů byly stejně jako u ss motorů tyristorové s komutačními obvody, které byly dosti složitou záležitostí. V dnešní době už se tento způsob nepoužívá. Moderní CNC obráběcí stroje používají nepřímé měniče frekvence s pulzně šířkovou modulací. Jedná se o moderní způsob řízení s využitím IGBT tranzistorů, který umožňuje mnohem lepší regulaci vzhledem k lepšímu ovládní spínacích prvků. U tranzistorů nutná doba k obnovení blokovací funkce odpadá, tranzistor je tedy podstatně rychlejší, a lze pracovat s vyššími kmitočty.

Základní schéma regulace pohonu v CNC stroji je Obrázek 5-1.



Obrázek 5-1 Uspořádání pohonů CNC stroje [2]

Jako příklad je uvedeno uspořádání s pohony firmy Fanuc, proto je vstupní síťové napětí 200-240V. 3-fázové síťové napětí je přes stykač a tlumivku přivedeno do PSM modulu což je neřízený usměrňovač který síťové napětí usměrní na 300V výstupních, toto napětí slouží jako napájení pro jednotlivé servozsilovače. I když v poslední době objevuje i použití řízeného usměrňovače a to z důvodu možnosti rekuperace brzděné energie zpět do sítě. Je otázkou na kolik se jedná o skutečnou úsporu energie, a nakolik o módnost zelených šetrných opatření.

Servozsilovače jsou zapojovány do série, někdy může být použit zdvojený servozsilovač, jeden zesilovač řídí dvě osy (motory). Velmi často bývá řízení vřeten provedeno samostatně, tzn., že má samostatný usměrňovač (PSM modul). Je to z toho důvodu, že výkony vřeten jsou ve srovnání se servomotory os mnohonásobně vyšší a proudy tekoucí přes společný usměrňovač by byli velmi velké.

6. Závěr

Cílem této práce bylo popsat řízení a regulaci servopohonů obráběcího stroje, dále provést simulaci pohonu a srovnání výsledků simulace se skutečným strojem. Jako srovnávací stroj bylo vybráno horizontální obráběcí centrum a61 výrobce Makino, které je v našem servisním středisku k dispozici k provádění školení servisních pracovníků. Z tohoto důvodu nebyl problém získat technické údaje o stroji, a provádět na něm experimenty s laděním regulační smyčky polohy osy X. Při tvorbě simulačního modelu byl využit program Scilab. Tento program byl vybrán z důvodu, že je volně šiřitelný.

Při tvorbě modelu se ukázal problém zjistit vnitřní strukturu regulace pohonu. Výrobce Fanuc neuvádí v dokumentaci celé regulační schéma, ale jen určité bloky, které je problematické poskládat v jeden celek. Navíc některé bloky nejsou detailně popsány. Zejména samotný proudový regulátor, k tomu zcela chybí údaje, a proto byl přenos zjišťován experimentálně porovnáváním údajů získaných z měření, což se vzhledem k rozcházejícím se výsledkům simulace a měřením na stroji ne zcela podařilo. Dalším problémem bylo, že nastavení pohonu stroje obsahuje několik set parametrů, které jsou aktivní jen při různých režimech, což by znamenalo složitý simulační model. Největší vliv na zjištění přenosu proudové regulace mají zřejmě filtry, které potlačují vibrace stroje. Tyto filtry jsou zařazeny na výstup rychlostního regulátoru a získat jimi upravený údaj, který vstupuje do proudového regulátoru, není možné. Dalším problémem je zřejmě regulace zrychlení, které se se skutečností značně rozchází. Pro další využití simulace pohonu bude třeba dořešit právě problém se zrychlením a bržděním, a upravit provedení feedforwardu pak by se měl průběh přiblížit skutečnému. Jako další bod bude nutné odzkoušet způsob převodu hodnot zesílení získaných ze simulace na hodnoty použitelné ve stroji. Nejlépe by bylo po sladění simulace s jedním typem stroje provést srovnávací měření na jiných typech a porovnat nakolik se simulace bude v těchto případech shodovat. Rovněž je důležité, aby simulace nebyla závislá na zadané rychlosti posuvu. V provedené simulaci se toto ne zcela zdařilo. Přitom právě sledování chování stroje při malých a velkých rychlostech je velmi užitečnou diagnostickou pomůckou. Pokud by se podařilo odstranit uvedené problémy, mohla by simulace být nápomocná při řešení problému s pohony.

7. Bibliografie

- [1] Makino, a71/a81 product catalog, Atsugi: Makino, 2011.
- [2] FANUC AC SERVO MOTOR @i series, Fanuc Ltd, 2009.
- [3] P. ., Doc. Ing. Souček, Servomechanismy ve výrobních strojích, Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004.
- [4] D. Schmid, Řízení a regulace pro strojírenství a mechatroniku, Praha: Sobotáles, 2005.
- [5] P. D.-I. D.-I. E. m. M. Weck a P. D.-I. C. Brecher, Werkzeugmaschinen 3 - Mechatronische Systeme, Vorschubantriebe, Prozessdiagnose, Berlin: Springer, 2005.
- [6] d. P. Souček, Regulační pohony v posuvech NC strojů, Praha: MM Spektrum, 2010.
- [7] *Automation and Drives Motion Control system*, Erlangen: Siemens AG, 2005.
- [8] J. Prof. Dr. Ing. Marek, Konstrukce CNC obráběcích strojů, MM spektrum, 2009.
- [9] *DC servo motors and drive*, Baldor electric company, 2009.
- [10] P. I. J. Skalický, Elektrické regulované pohony, Brno: VUT Brno, 2007.
- [11] Mecapion, „Nez Internaional Ltd.,“ 2013. [Online]. Available: www.nez.com.tw. [Přístup získán 20 11 2013].
- [12] D. D. Hanselman, Brushless permanent magnet motor design, 2nd editor, Cranston: Writers' Collective, 2003.
- [13] Fanuc, Fanuc linear motors LiS Series Description manual, Fanuc Ltd, 2009.
- [14] I. J. V. Csc., Výkonová elektronika 1, Brno: VUT Brno, 2003.

8. Příloha

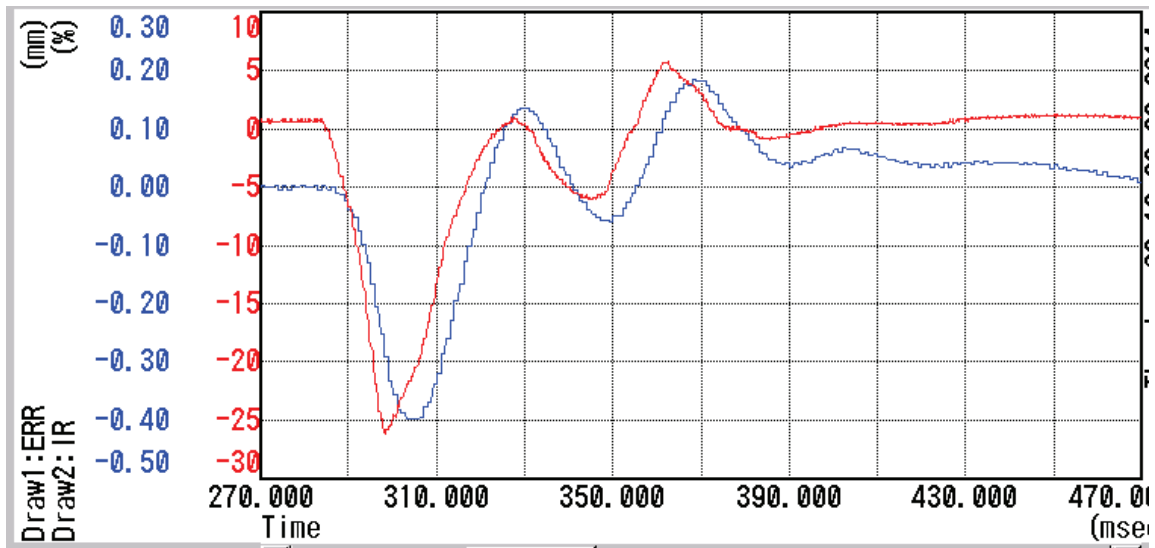
Simulační program

```
mode(0);
ieee(1);
clear;
dt = 0.000003;
t = 0;krok = 1;sumw = 0;w = 0;v = 0;fi = 0;pol = 0;wpoz = 0;
n = 0.016/(2*%pi);//posun [m/rad] 16mm/otacku
Mz = 0;
J = 0.0606;//redukovany J na hridel
kM = 1.8;//momentova konst Nm/A
polW = 0;polWR = polW;
fmi = (1000*2)*%pi;// [rad/s] mezni fekvence proudove smycky
//wmax=3e3/60*2*%pi;//3000ot/min =48m/min - rychloposuv
wmax = ((62.5/60)*2)*%pi;//62.5ot/min =1m/min - obrabeci
krw = 20;Trw = (1/fmi)*(10^1.25);
kp = 100000;
kw = 400;// koeficient feedforwardu
amaxR = 1.025;//m/s2 pro rampovani pozadovane polohy
vmaxR = (wmax*n)*0.8;//m/s pro rampovani pozadovane polohy
aR = 0;
vR = 0;
imax = 80;//spickovy
iz = 0;
tkonec = 0.22;
out = zeros(round(tkonec/dt)+1,9);
while t<tkonec
    if t>0.01 then polW = 0.001;end;
    // regulace polohy
    polWRold = polWR;
    if polW>polWR then
        if polWR<(polW-((1/2)*(vR^2))/amaxR) then //jeste nepotrebuju brzdit
            vR = vR+amaxR*dt;
            if vR>vmaxR then vR = vmaxR;end;
            polWR = polWR+vR*dt;
        else //cilove brzdeni
            vR = vR-amaxR*dt;
            polWR = polW-((1/2)*(vR^2))/amaxR;
            if abs(polWR-polW)<0.00000001 then
                vR = 0;
                polWR = polW;
            end;
        end;
    else
        polWR = polW; //numericky prekmit rampy pres polW oriznut
    end;
    wpozOld = wpoz;
    epol = polWR-pol; //ERR[m]
    wpoz = kp*epol;
    Ffw = ((polWR-polWRold)/dt)*kw; // idealni hodnota kw=1/n
```

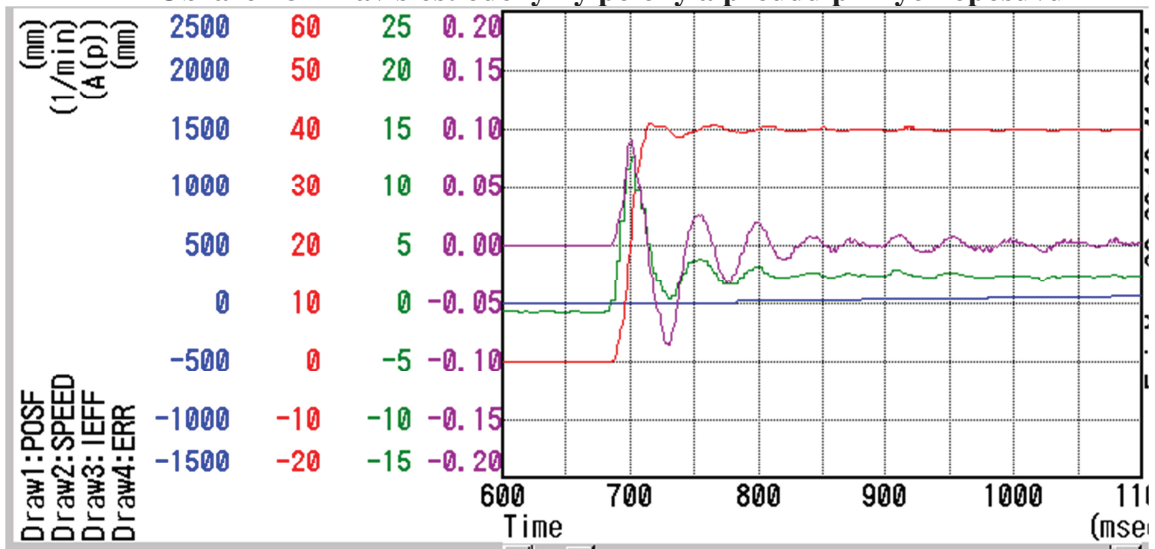
```

wpoz = wpoz+FFw;
if wpoz>wmax then wpoz = wmax;end; //omezeni na max.rychlost
if wpoz<(-wmax) then wpoz = -wmax;end;
//filtr proudu a rychlosti
if wpoz<(wpozOld-0.01) then wpoz = wpozOld-0.01;end;
if wpoz>(wpozOld+0.01) then wpoz = wpozOld+0.01;end;
//PI regulator otacek
ew = wpoz-w;
ipoz = krw*ew+sumw;
if abs(ipoz)<imax then
    sumw = sumw+((ew*krw)/Trw)*dt;
else
    if ipoz>0 then ipoz = imax;end;
    if ipoz<0 then ipoz = -imax;end;
end;
//idealizovana proudova (momentova) smycka
iz = iz+(fmi*(ipoz-iz))*dt; //proudova smycka jako DP
//pohybova rovnice
M = kM*iz;
if w==0 then
    Mz = 0;
else
    Mz = sign(v)*3+1*w;
end;
dw = (M-Mz)/J;
w = w+dw*dt; //[rad/s]
v = w*n;
//vypocet uhlu
fi = fi+w*dt; //[rad]
pol = fi*n; //[m]
//zapis vysledku pro kresleni grafu
out(krok,:) = [t,polW,polWR,pol,wpoz,w,ipoz,iz,epol];
t = t+dt;
krok = krok+1;
end;
out = out(1:krok-1,:);
//kresleni v zavislosti na case
subplot(4,1,1)
plot(out(:,1),out(:,2:4))
legend("POSF_W[m]","POSF_(WR).entries[m]","POSF[m]")
subplot(4,1,2)
plot(out(:,1),out(:,9))
legend("ERR[m]")
subplot(4,1,3)
plot(out(:,1),(out(:,5:6)/2)/%pi)*60)
legend("VCMD[1/min]","SPEED[1/min]")
subplot(4,1,4)
plot(out(:,1),out(:,7:8))
legend("IEFF_W","IEFF")
xlabel("time[s]");

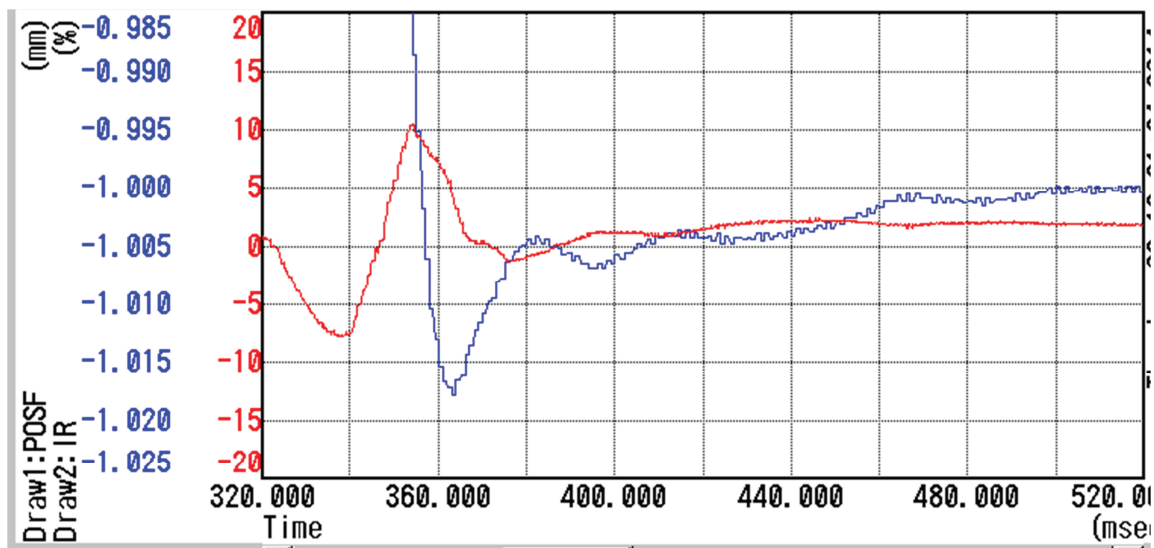
```



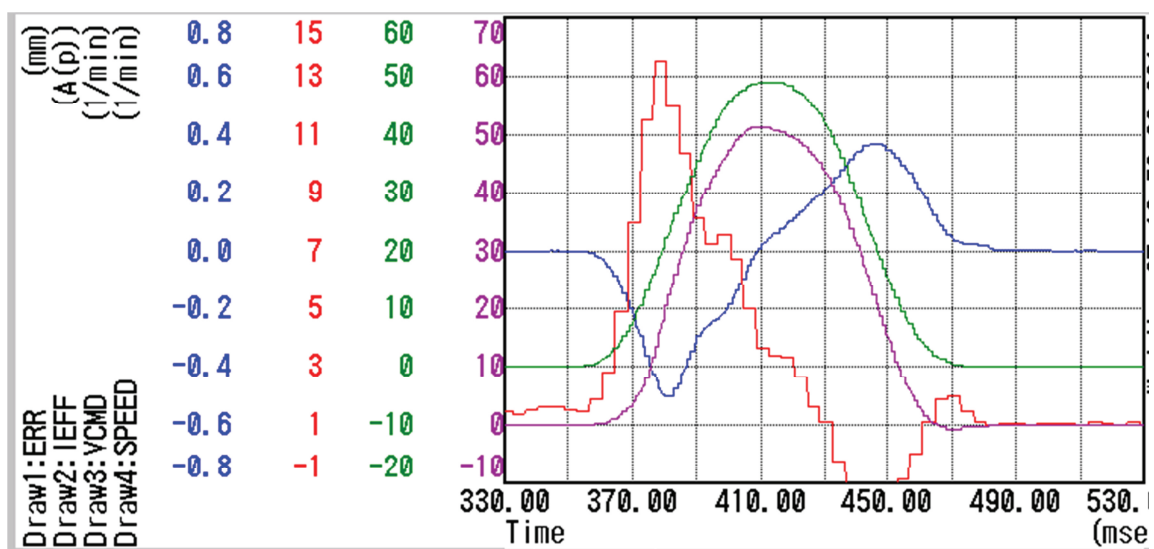
Obrázek 8-1 Závislost odchylky polohy a proudu při rychloposuvu



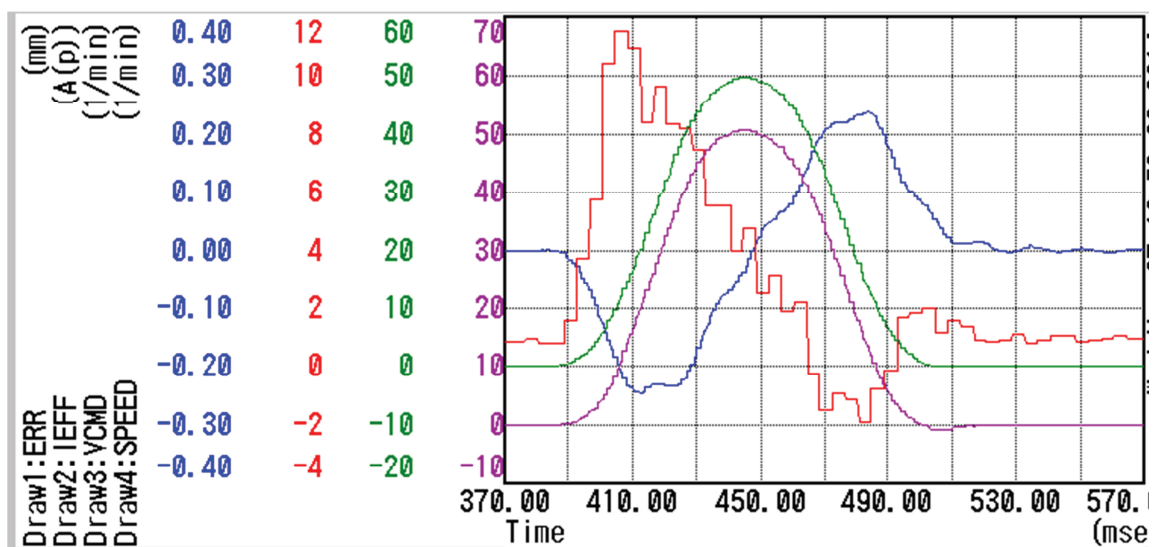
Obrázek 8-2 Náběh na plnou rychlost při dráze 100mm



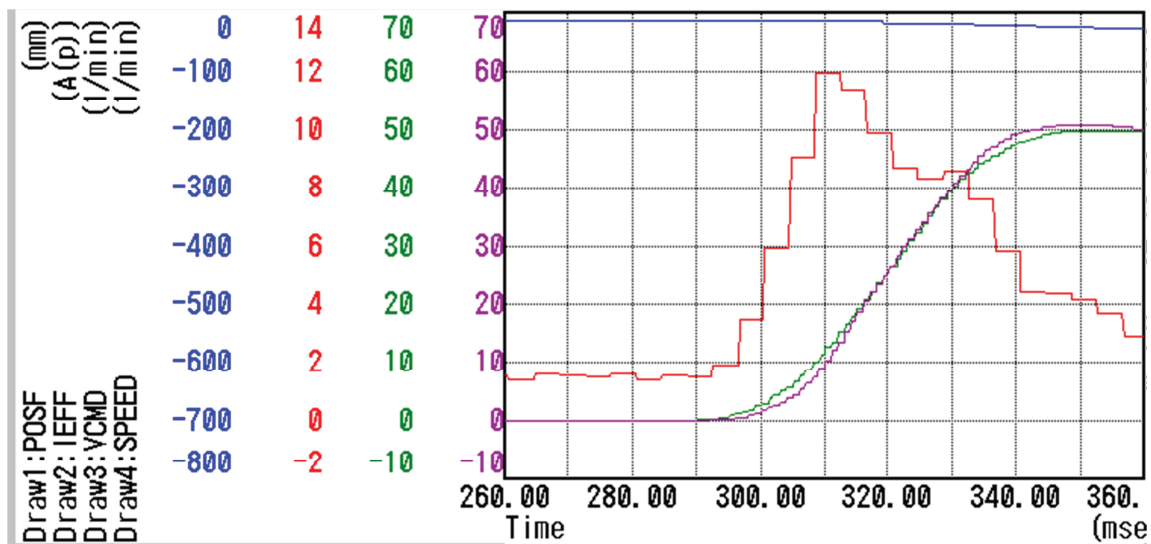
Obrázek 8-3 Překmit polohy při brždění z rychlosti 1m/min



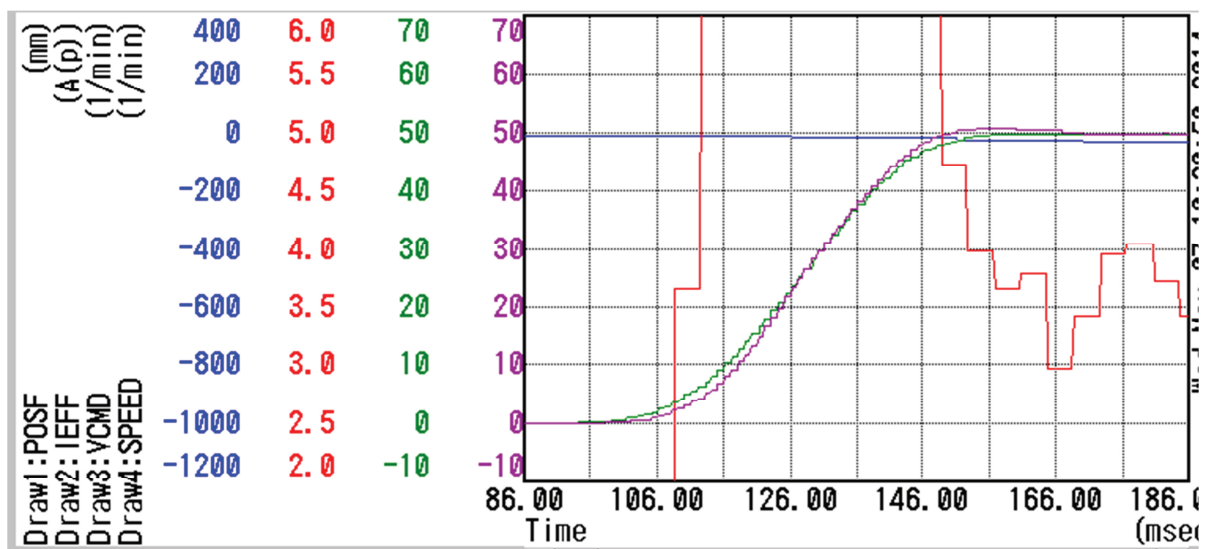
Obrázek 8-4 Průběh regulace při polovičním zesílení rychlostního regulátoru



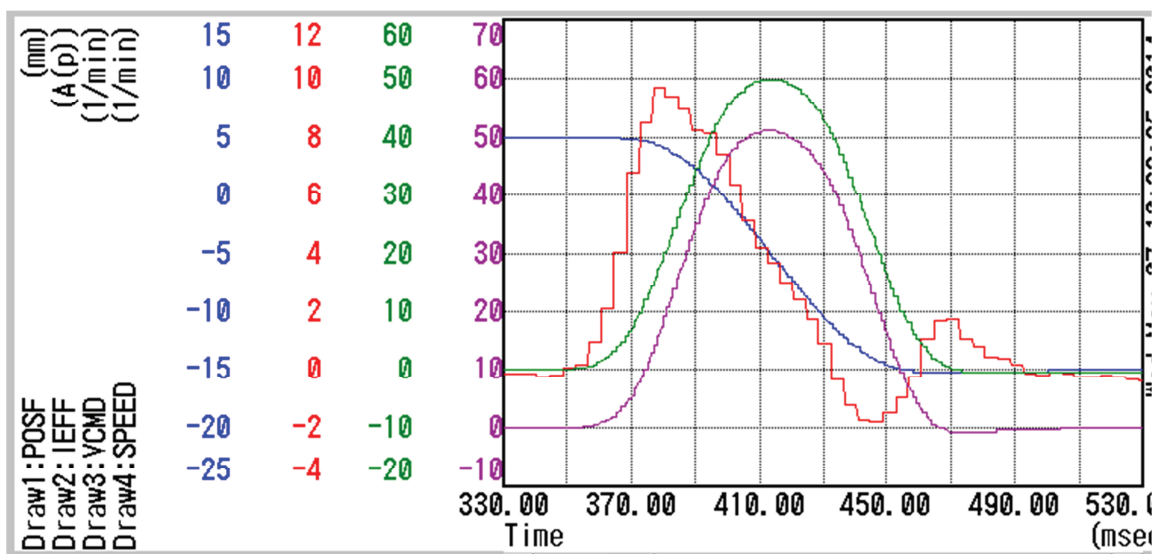
Obrázek 8-5 Průběh regulace při dvojnásobném zesílení rychlostního regulátoru



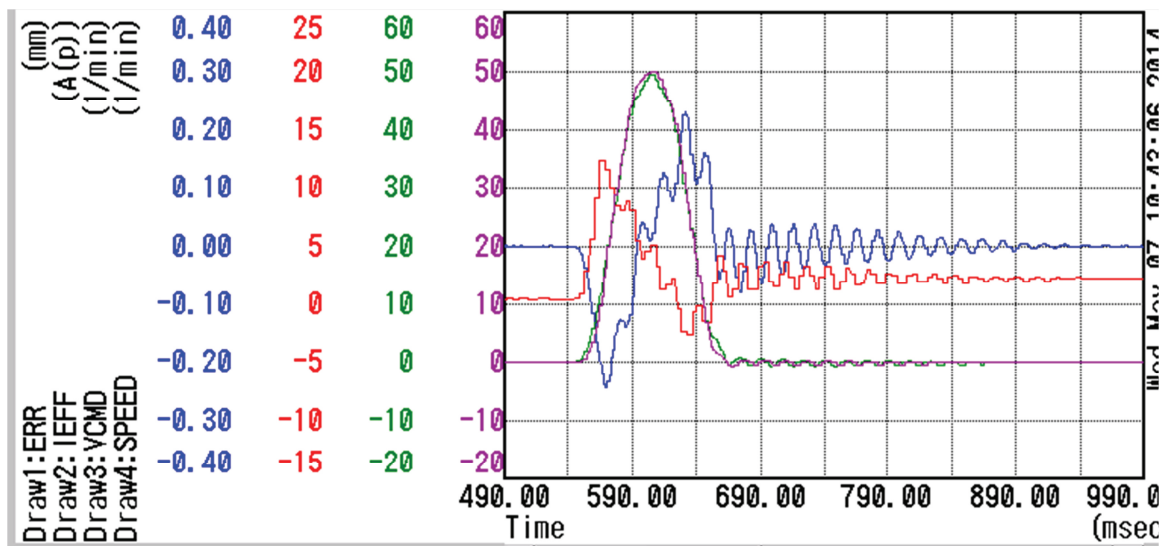
Obrázek 8-6 Detail průběhu rychlosti se zapnutým feedforwardem



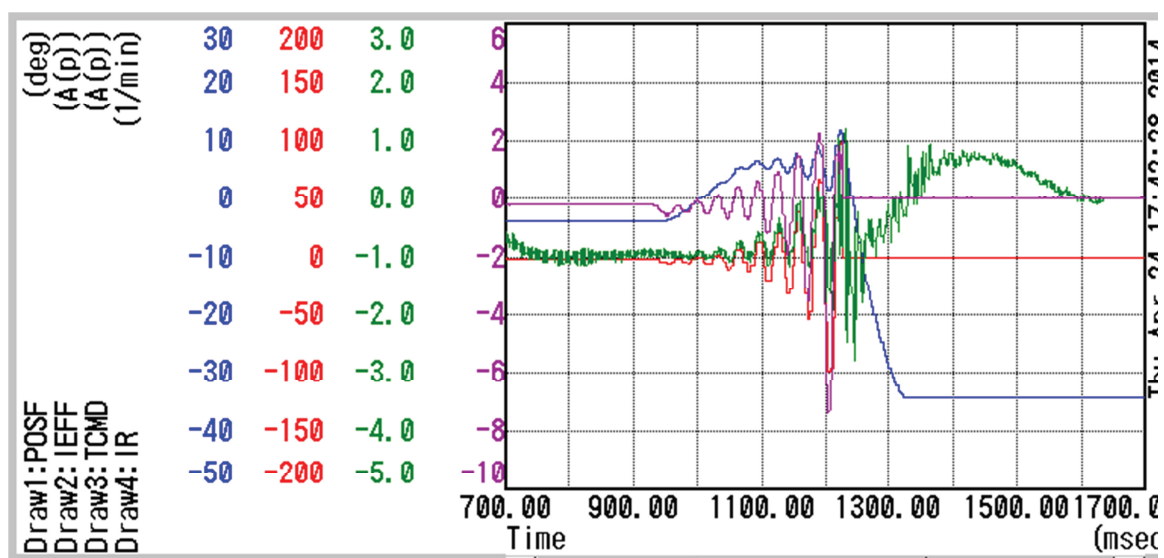
Obrázek 8-7 Detail průběhu rychlosti s dvojnásobným feedforwardem



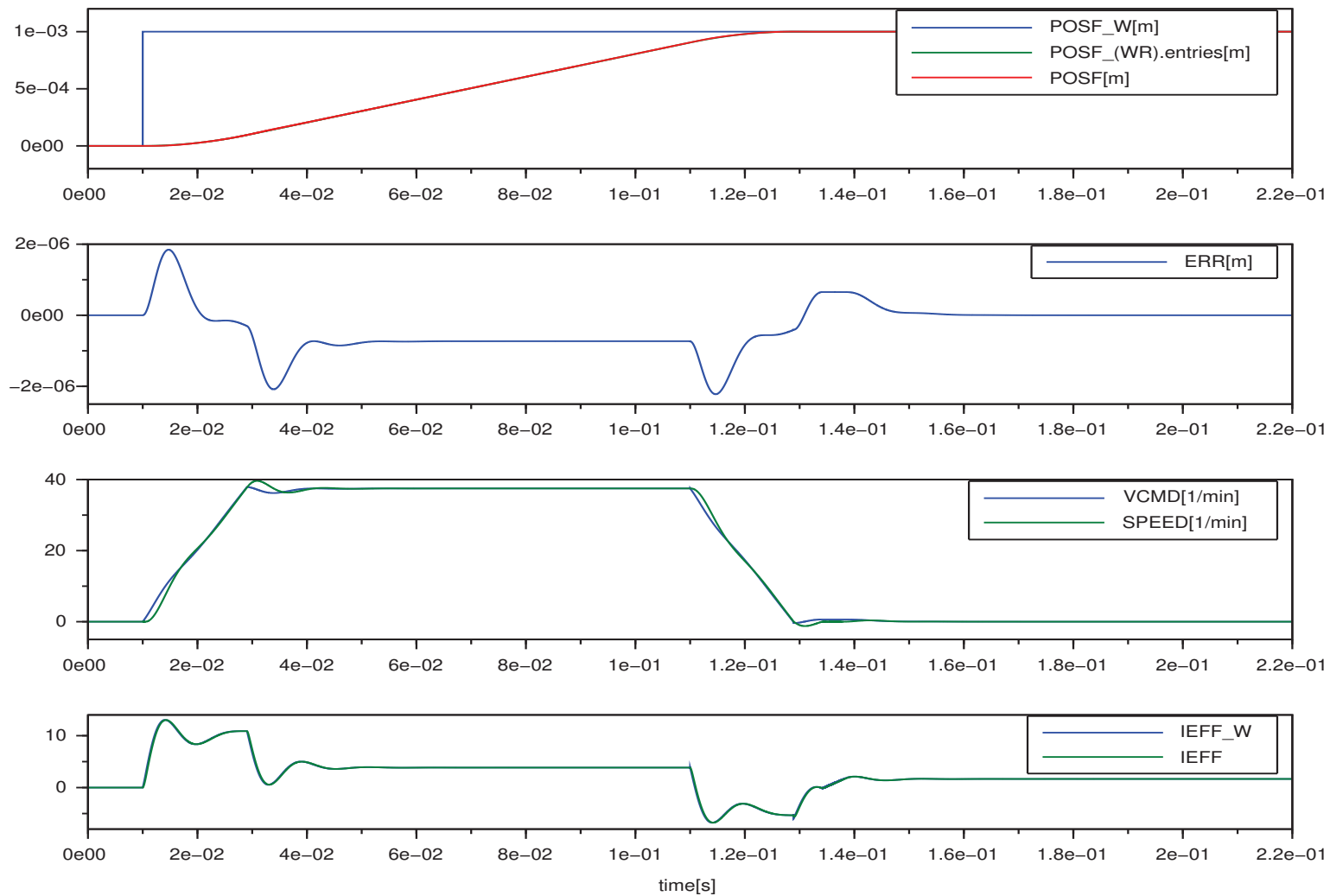
Obrázek 8-8 Průběh regulace při polovičním zesílení polohy



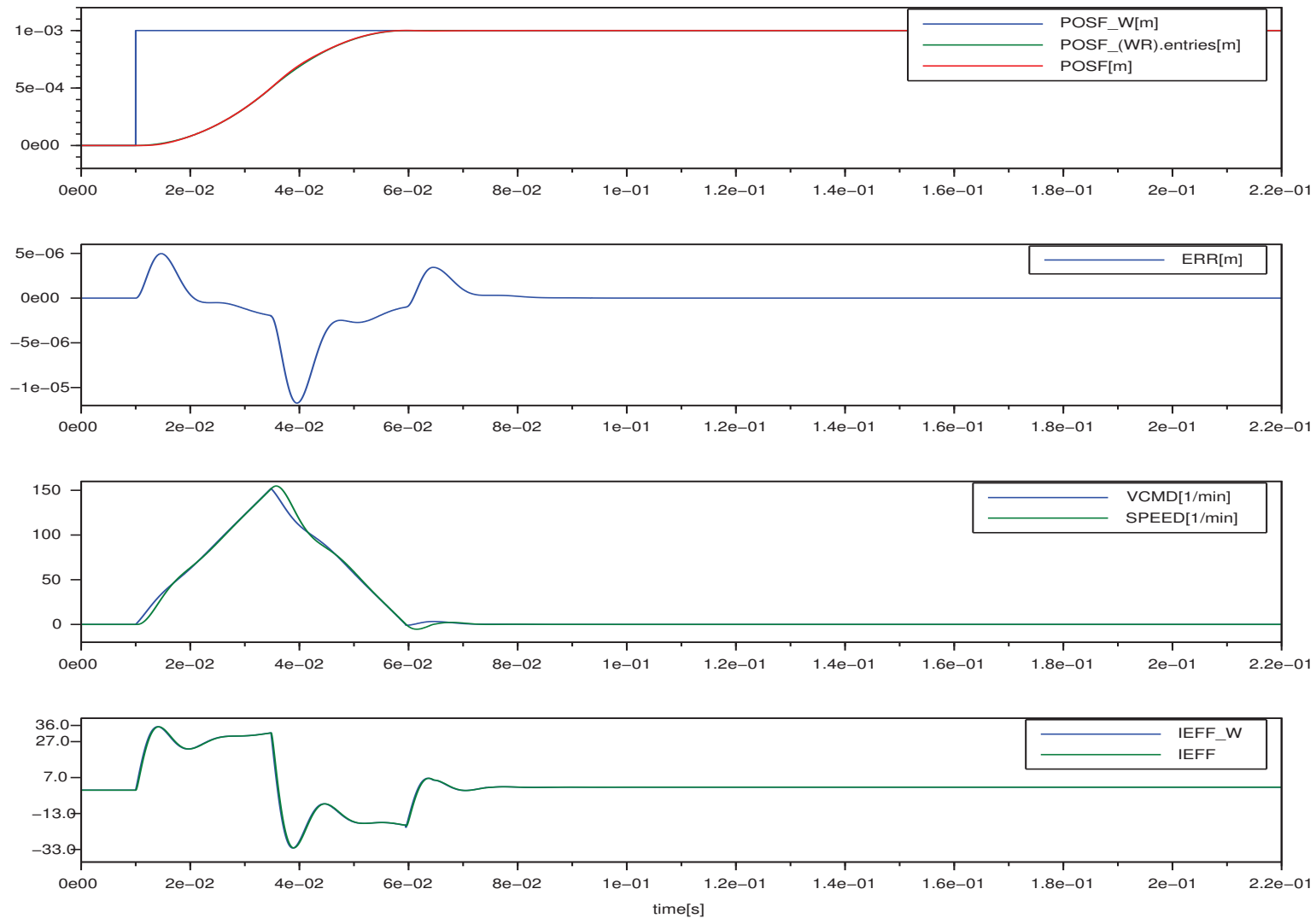
Obrázek 8-9 Průběh regulace při dvojnásobném zesílení polohy



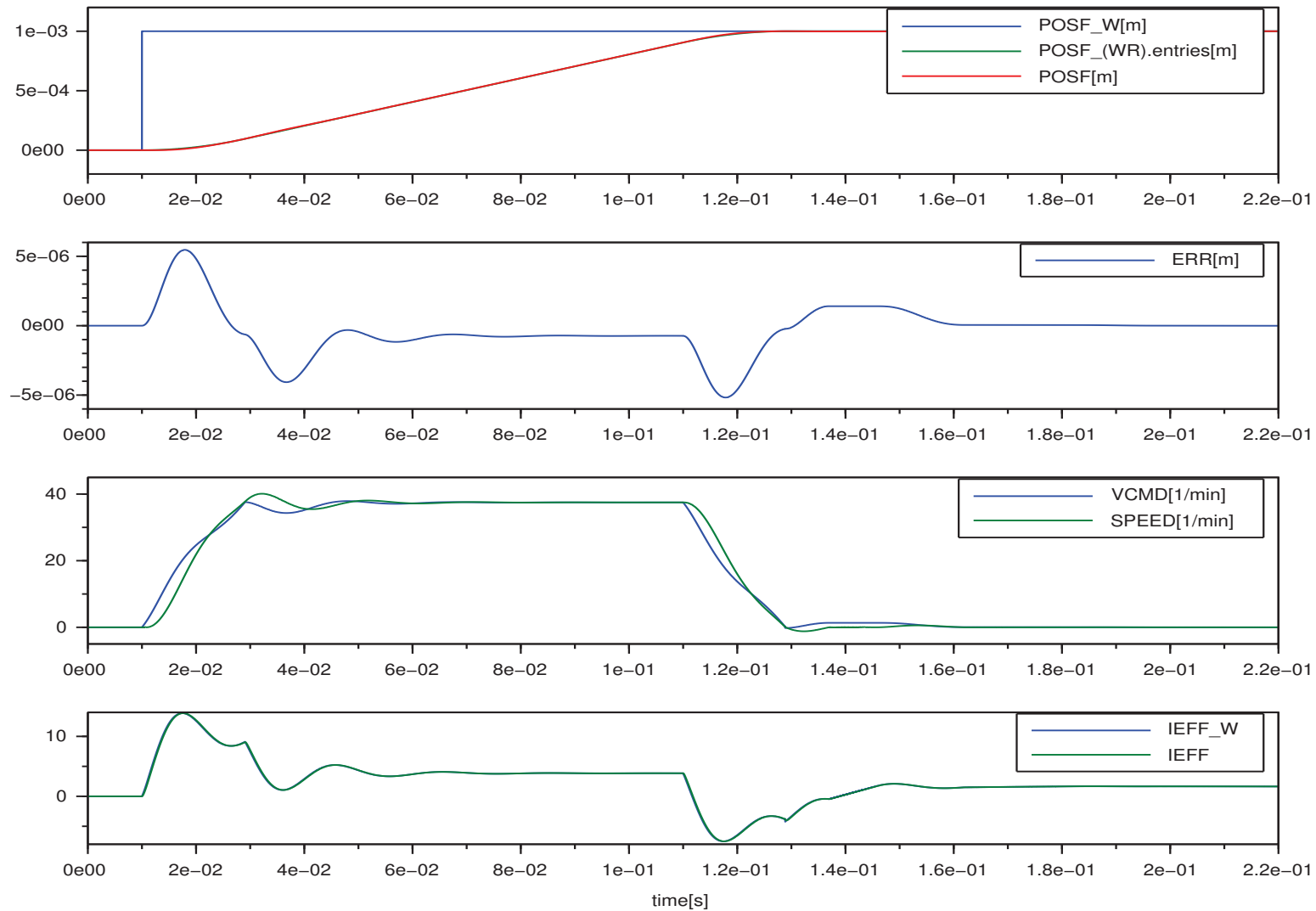
Obrázek 8-10 Průběh regulace při velmi malém zesílení polohy



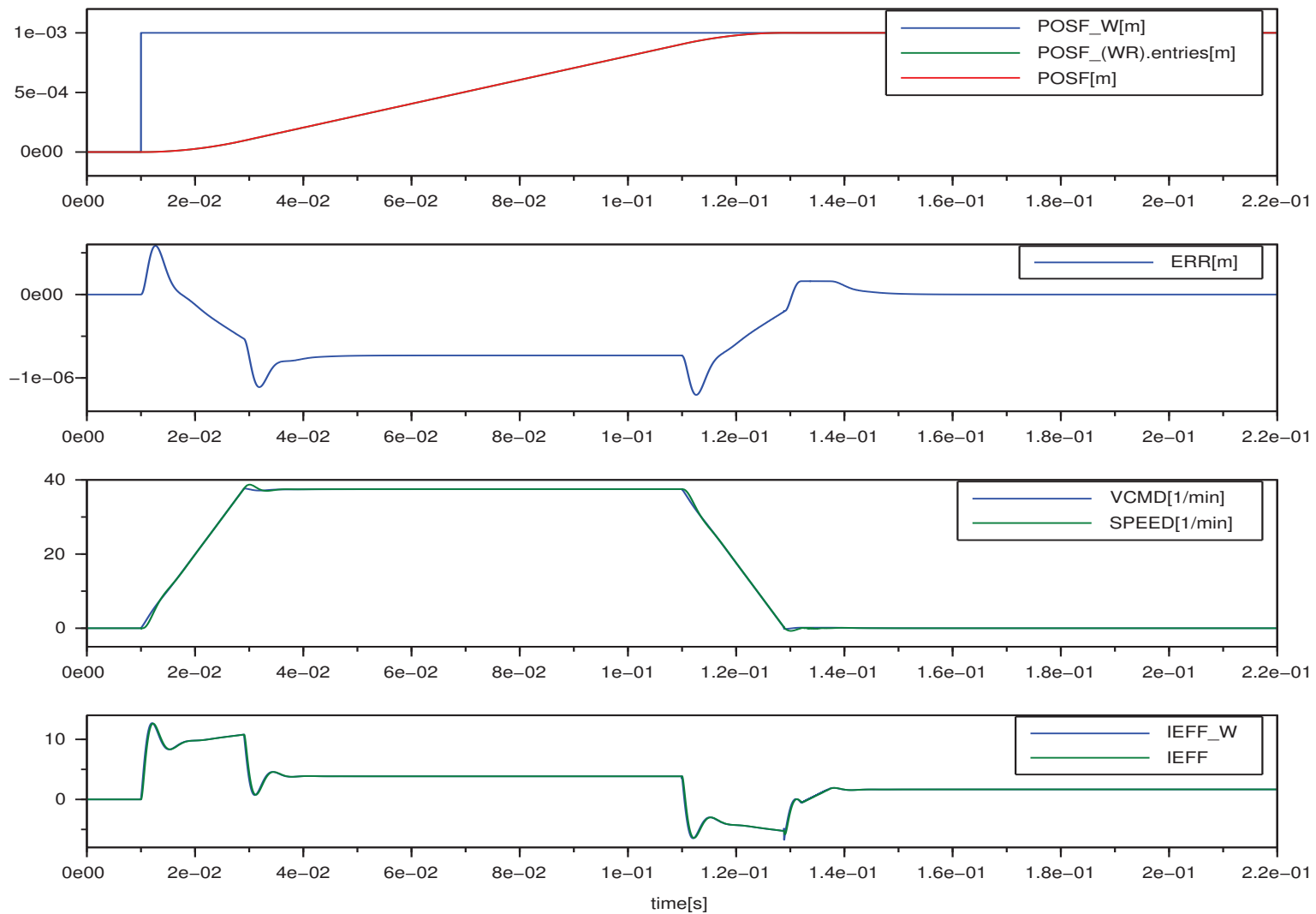
Obrázek 8-11 Průběh regulace dráha 1mm rychlost 1m/min (POSF průběh polohy, ERR průběh chyby polohy, VCMD/SPEED průběh rychlosti, IEEF průběh proudu)



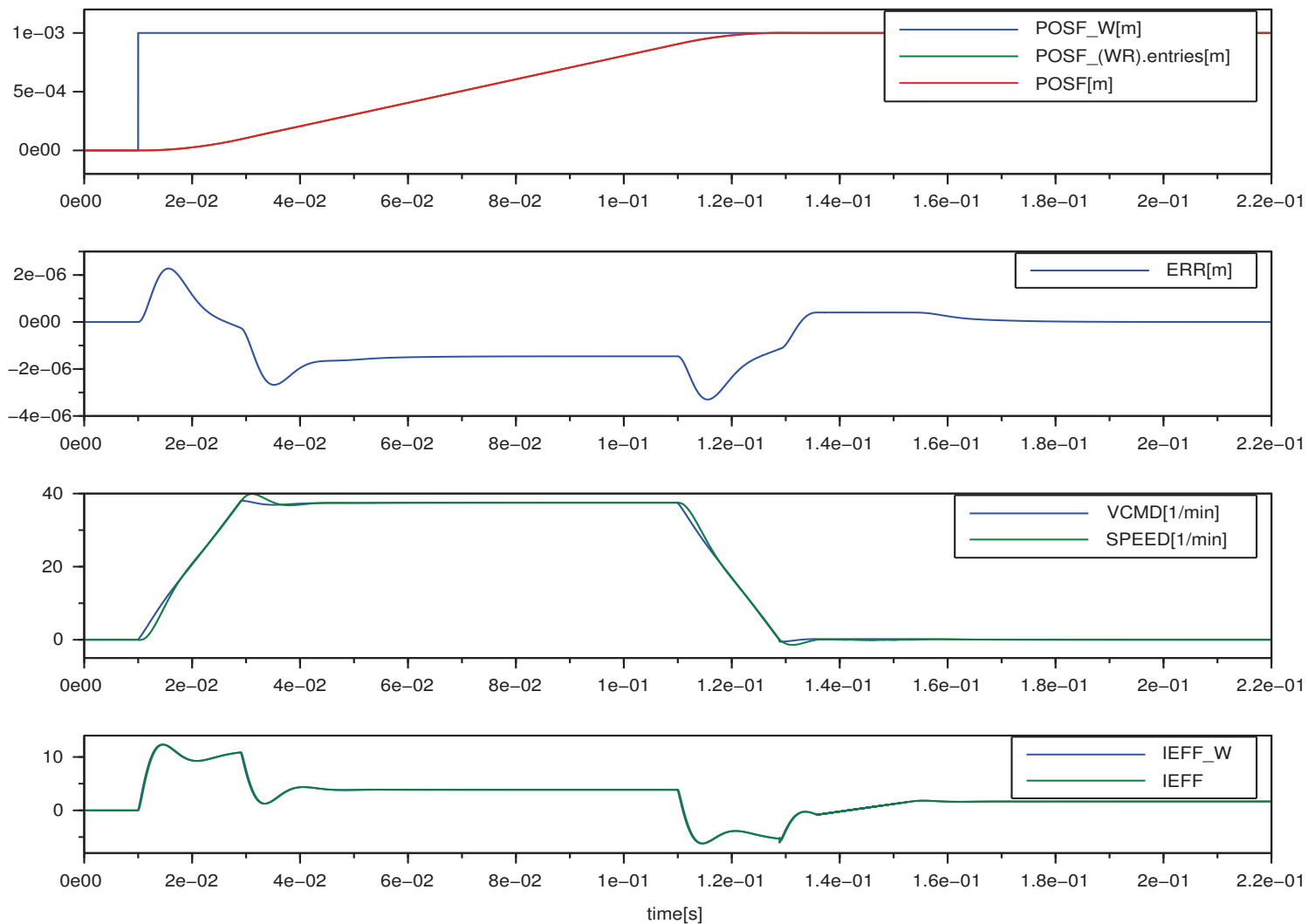
Obrázek 8-12 Průběh regulace dráha 1mm rychloposuv (modře požadavek na polohu-w, černá aktuální poloha – y, červená proud, zelená požadavek na rychlost, fialová rychlost)



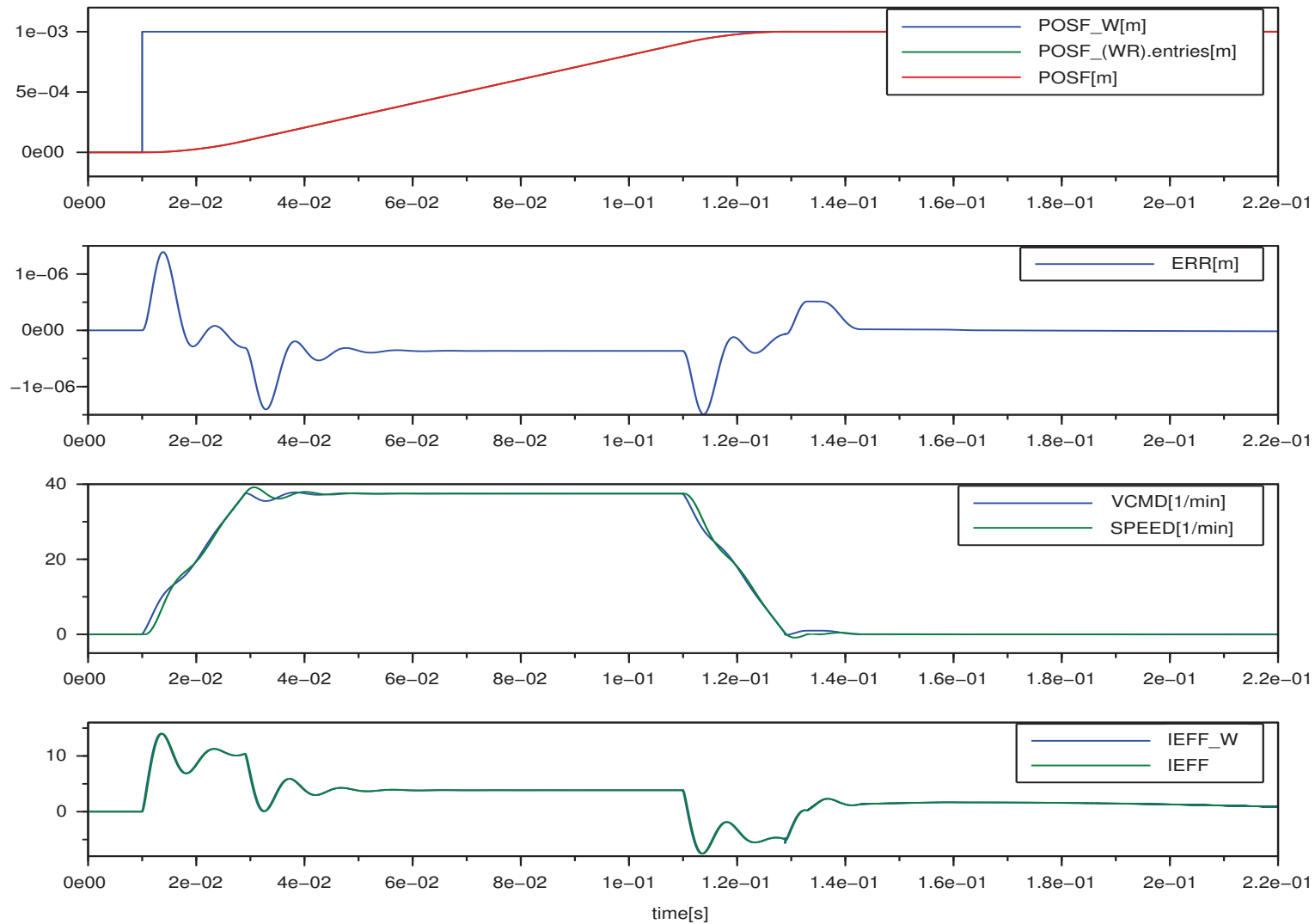
Obrázek 8-13 Průběh regulace poloviční zesílení rychlostního regulátoru (POSF průběh polohy, ERR průběh chyby polohy, VCMD/SPEED průběh rychlosti, IEFF průběh proudu)



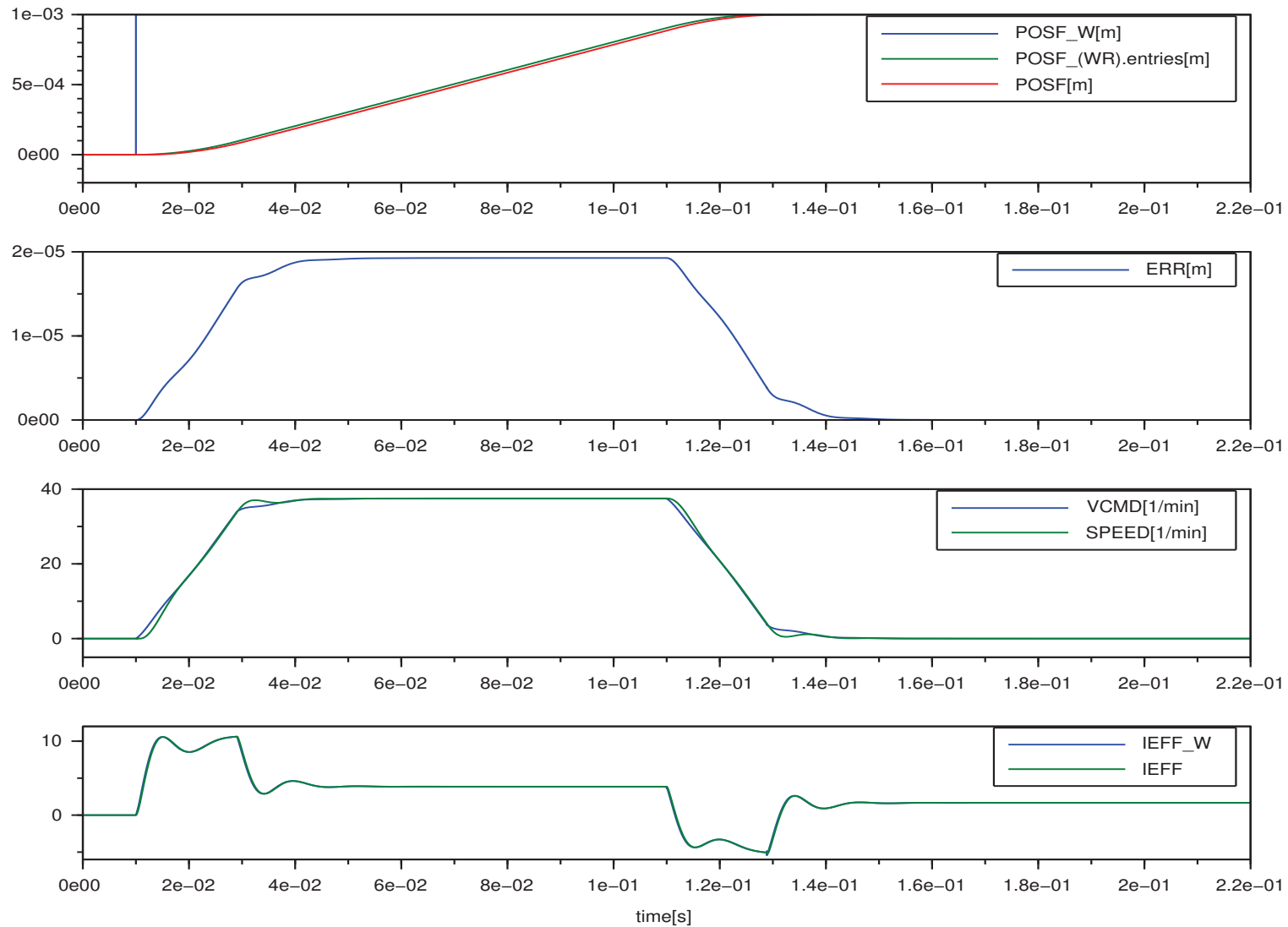
Obrázek 8-14 Průběh regulace dvojnásobné zesílení rychlostního regulátoru (POSF průběh polohy, ERR průběh chyby polohy, VCMD/SPEED průběh rychlosti, IEFF průběh proudu)



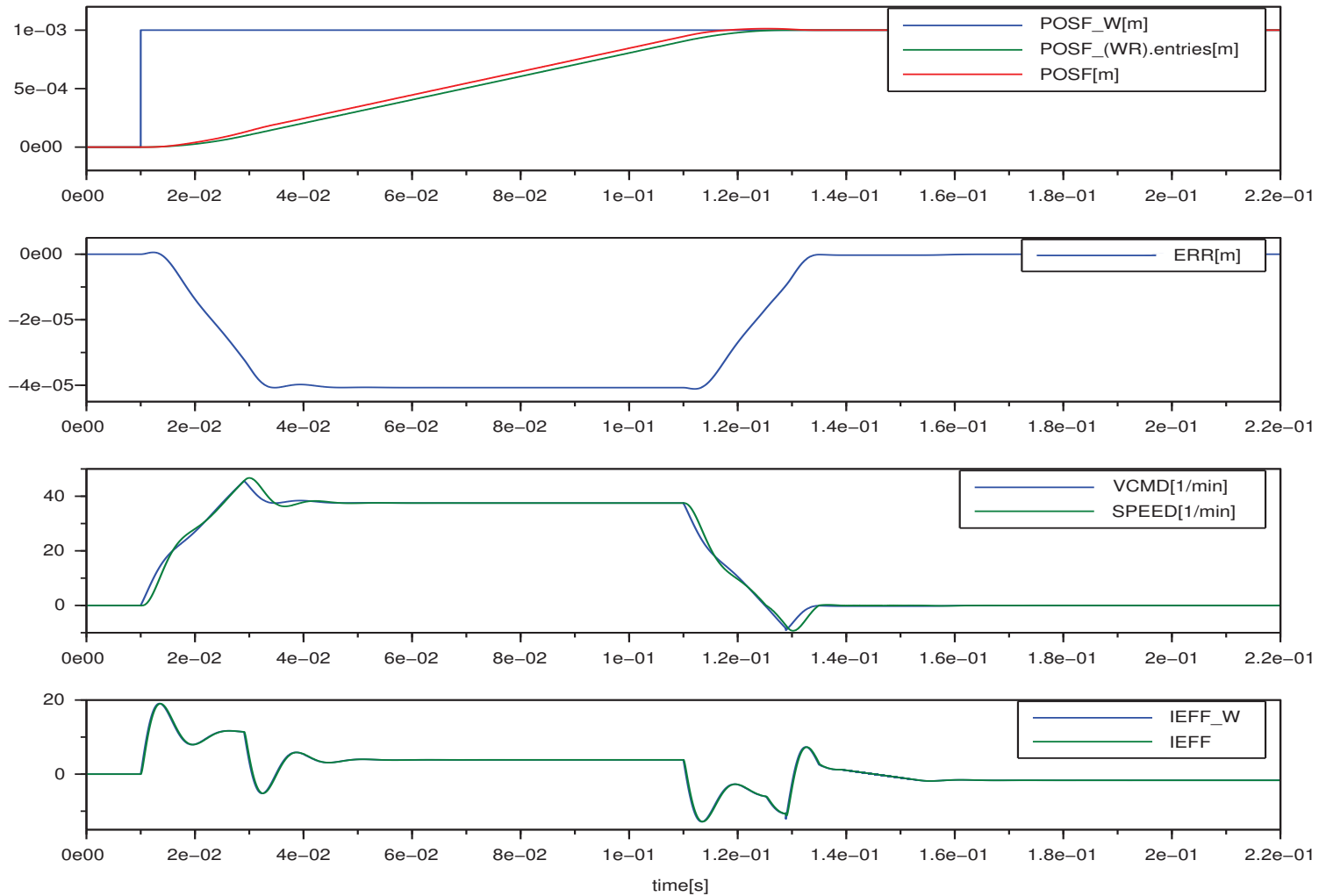
Obrázek 8-15 Průběh regulace poloviční zesílení polohového regulátoru (POSF průběh polohy, ERR průběh chyby polohy, VCMD/SPEED průběh rychlosti, IEFF průběh proudu)



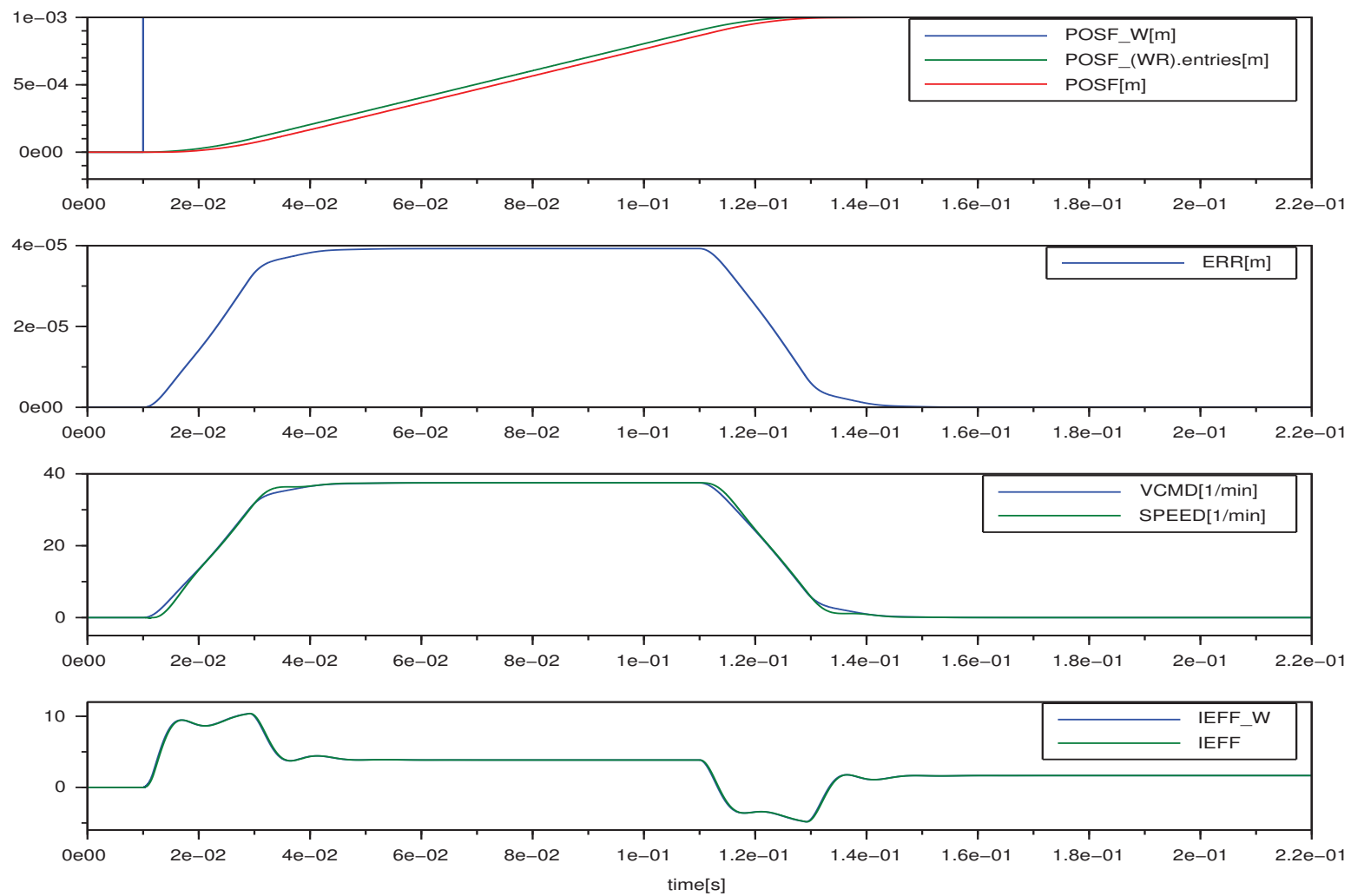
Obrázek 8-16 Průběh regulace $K_p = 200000$ (POSF průběh polohy, ERR průběh chyby polohy, VCMD/SPEED průběh rychlosti, IEFF průběh proudu)



Obrázek 8-17 Průběh regulace s poloviční předkorekcí $K_w = 200$ (POSF průběh polohy, ERR průběh chyby polohy, VCMD/SPEED průběh rychlosti, IEFF průběh proudu)



Obrázek 8-18 Průběh regulace s dvojnásobnou předkorekcí $K_w = 800$ (POSF průběh polohy, ERR průběh chyby polohy, VCMD/SPEED průběh rychlosti, IEEF průběh proudu)



Obrázek 8-19 Průběh regulace s bez předkorekce $K_w=0$ (POSF průběh polohy, ERR průběh chyby polohy,VCMD/SPEED průběh rychlosti, IEFF průběh proudu)