

CONTROL ASPECTS OF LINEAR MOTORS WITH AN AXIALLY COMPLIANT SUSPENSION OF THEIR SECONDARY PART

P. Souček*, A. Bubák*

Summary: *In this paper, the properties of the current control loop of linear synchronous motors are described. There are shown root loci, time delay of a PWM and influence of the current control on achievable jerk value. In the second part, an axially compliant suspension for the secondary part of a linear motor is described and its properties and control aspects are discussed.*

1. Úvod

Rostoucí nároky na dráhovou přesnost při řízení vzájemného pohybu nástroje a obrobku u strojů pro vysokorychlostní obrábění si vynucují nové přístupy v uspořádání pohonů posuvů. Vlastnosti osvědčené kaskádní struktury regulace s hierarchií tří zpětných vazeb (odvnitřku proudová – rychlostní – polohová) jsou kromě nutných kvalit mechanické stavby stroje dány především rychlou regulací proudu motoru, jejíž propustné pásmo je určujícím parametrem pro nadřazenou regulační smyčku rychlosti a polohy. Problém zvýšení propustného pásma proudové regulace bude demonstrován na případě lineárního synchronního elektromotoru s třífázovým primárním vinutím a permanentními magnety na sekundárním dílu.

2. Proudová regulace

Napájení motoru zajišťuje tranzistorový měnič pracující v režimu pulzní šířkové modulace na kmitočtu $f_M = 1/T_M = 4 \div 10 \text{kHz}$. Samotný motor lze zjednodušeně znázornit blokovým schématem stejně jako motor stejnosměrný - viz **obr.1**. Zatím nebudeme uvažovat čárkovanou větev, jejíž význam bude vysvětlen později. U motoru jsou definovány tyto pojmy:

v, y ... rychlost a poloha primárního dílu vůči rámu [m/s, m]

F_Z ... vnější síla [N]

m ... hmotnost suportu s primárním dílem [kg]

K_E napěťová konstanta [Vs/m]

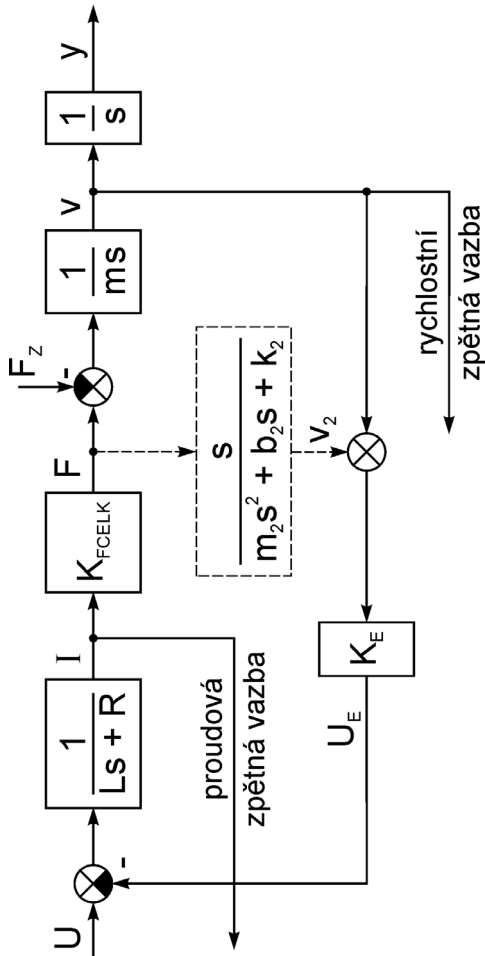
K_F silová konstanta [N/A]

$L/R = \tau_E$ elektrická časová konstanta vinutí (obvykle v řádu jednotek milisekund)

$\tau_M = \frac{mR}{K_F K_E}$ mechanická časová konstanta motoru (desítky milisekund i více)

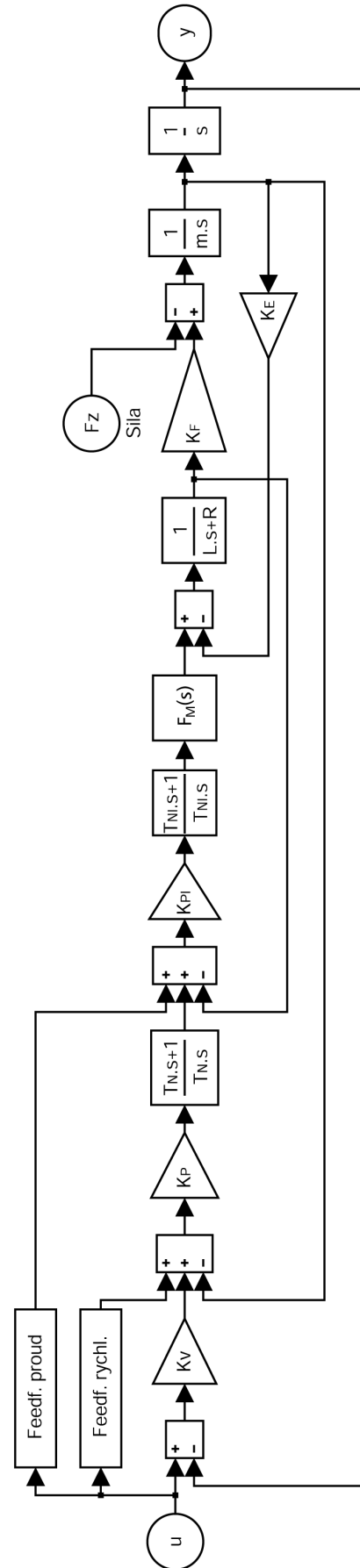
U, U_E napájecí a vnitřní indukované napětí [V]

* Doc. Ing. Pavel Souček, DrSc., Ing. Antonín Bubák: Výzkumné centrum pro strojírenskou výrobní techniku a technologii, fakulta strojní, ČVUT v Praze; Horská 3; 128 03 Praha 2; tel.: +420.221 990 900, fax: +420.221 990 999; e-mail: p.soucek@rcmt.cvut.cz, a.bubak@rcmt.cvut.cz



Obr.1 Blokové schéma motoru

Obr.2 Blokové schéma kaskádní regulace polohy elektromotoru



Přenosová funkce mezi napětím a proudem nezátíženého motoru (při $F_z = 0$) je

$$\frac{I(s)}{U(s)} = \frac{ms}{mLs^2 + mRs + K_F K_E} = \frac{ms/K_F K_E}{\tau_M \tau_E s^2 + \tau_M s + 1} = \frac{ms/K_F K_E}{\frac{s^2}{\Omega_M^2} + \frac{2\zeta_M}{\Omega_M} s + 1} \quad (1)$$

s nulovým bodem (kořenem čitatele) v počátku.

Její póly jsou
$$s_{1,2} = \frac{-\tau_M \mp \sqrt{\tau_M^2 - 4\tau_M \tau_E}}{2\tau_M \tau_E} \quad (2)$$

Pro případ $\tau_M < 4\tau_E$ jsou póly komplexní sdružené a výhodnější je tvar

$$s_{1,2} = -\zeta_M \Omega_M \pm j\Omega_M \sqrt{1 - \zeta_M^2} \quad (3)$$

s vlastní kmitočtem $\Omega_M = 1/\sqrt{\tau_M \tau_E}$ a poměrným tlumením $\zeta_M = \sqrt{\tau_M/4\tau_E}$

Poznámka: Je-li $\tau_M \gg 4\tau_E$, jmenovatel (1) lze upravit na přibližný tvar

$$\tau_M \tau_E s^2 + (\tau_M + \tau_E)s + 1 = (\tau_M s + 1)(\tau_E s + 1)$$

se dvěma póly $-1/\tau_M$, $-1/\tau_E$. Tomuto případu se blíží lineární motory, které pohybují těžkými suporty přímo, bez redukujícího účinku vložených převodů dopomala. Vždy platí, že pokud jsou póly reálné, leží uvnitř intervalu $(-1/\tau_E, -1/\tau_M)$.

Celé blokové schéma kaskádní regulace polohy je na **obr.2**. Standardně se používá P regulátor polohy a PI regulátor rychlosti. Zpomalující vliv indukčnosti a vliv vnitřního indukovaného napětí (toto působí proti napětí zdroje, tedy omezuje proud a tím i sílu při vysokých rychlostech) je potlačen proudovou zpětnou vazbou rovněž s PI regulátorem, který je předřazen tranzistorovému měniči. Cílem je oddálit póly přenosové funkce (1) pokud možno co nejdale vlevo od imaginární osy. Přenos regulátoru proudu je

$$K_{PI} \frac{1 + T_{NI}s}{T_{NI}s} \quad (4)$$

K_{PI} [V/A] ...proporcionální zesílení (včetně přenosu tranzistorového měniče)

T_{NI} [s] ... integrační časová konstanta.

Oddálení pólů přenosové funkce proudu od počátku

Geometrické místo kořenů (GMK) proudové regulace je na **obr.3**. Nulový bod v počátku přenosu (1) se vyrušil s pólem regulátoru, takže zůstává pouze nulový bod $-1/T_{NI}$ a póly motoru s_1, s_2 . Pro zpřesnění výpočtu je dále zavedeno dopravní zpoždění pulzní šířkové modulační tranzistorového měniče, které může kolísat v intervalu $(0, T_M)$, takže doporučená střední hodnota pro matematický model je $T_0 = T_M/2$. Transcendentní přenosovou funkcí dopravního zpoždění $F_M(s) = e^{-T_0 s}$ lze aproximovat Paddého rozvojem 2.řádu

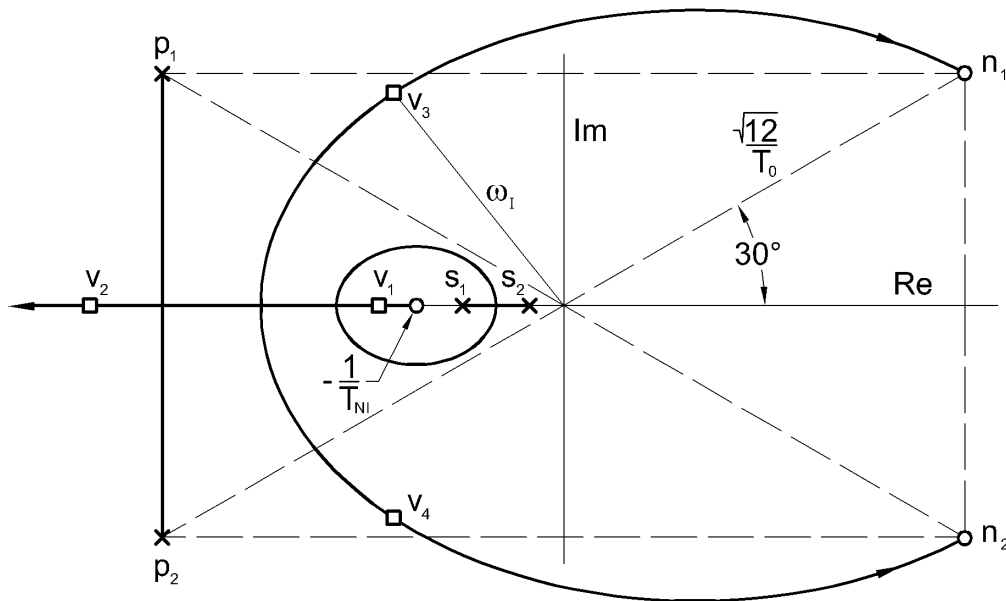
$$F_M(s) \approx \frac{T_0^2 s^2 / 12 - T_0 / 2 + 1}{T_0^2 s^2 / 12 + T_0 / 2 + 1} \quad (5)$$

kteřá přinese do otevřené proudové smyčky další dva póly p_1, p_2 a dva nulové body n_1, n_2 velmi vzdálené od počátku (pro obvyklou hodnotu $f_M = 4kHz$ je vzdálenost $\sqrt{12}/T_0 = 27700$). Uzavřením proudové zpětné vazby a nastavením zesílení K_{PI} vzniknou namísto pólů s_1, s_2 a p_1, p_2 čtyři nové póly v_1, v_2, v_3, v_4 , z nichž v_1 téměř splyne s nulovým

bodem PI regulátoru, čímž jeho vliv zanikne. Pól v_2 je velmi vzdálen vlevo, takže rozhodující vliv na regulaci proudu převezmou komplexní póly v_3, v_4 . Výsledný přenos proudové regulační smyčky mezi požadovaným a skutečným proudem lze nakonec zjednodušeně uvažovat jako proporcionalní 2.řádu s vlastní kmitočtem $\omega_I = 2\pi f_I$, což je právě vzdálenost pólů v_3, v_4 od počátku:

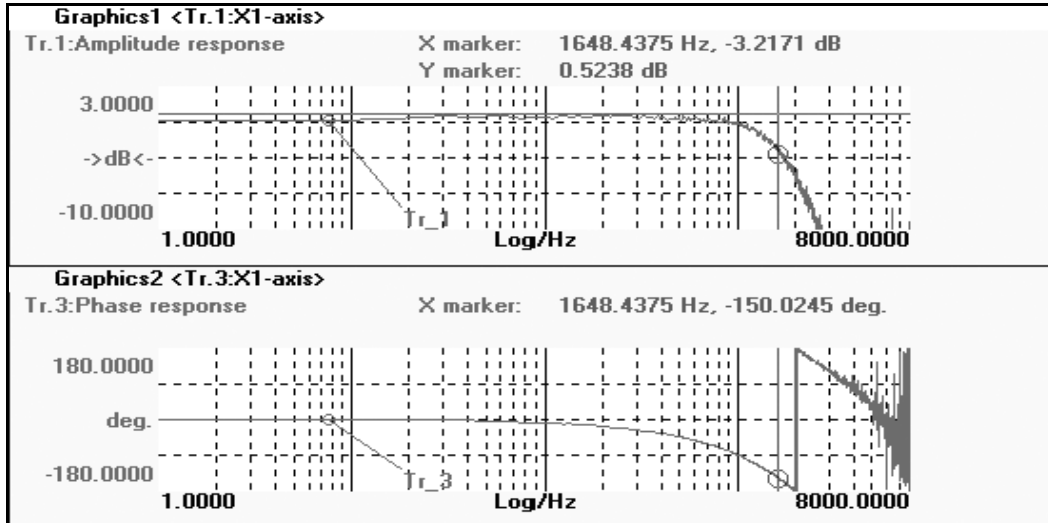
$$F_I(s) = \frac{I(s)}{I_{\text{žAD}}(s)} = \frac{1}{s^2/\omega_I^2 + s \cdot 2\zeta_I/\omega_I + 1} \quad (6)$$

Poměrné tlumení ζ_I je výhodné nastavit v intervalu $0,5 \div 0,7$. Původní póly s_1, s_2 jsou tímto postupem nahrazeny mnohonásobně (až o dva řády) vzdálenějšími póly v_3, v_4 .

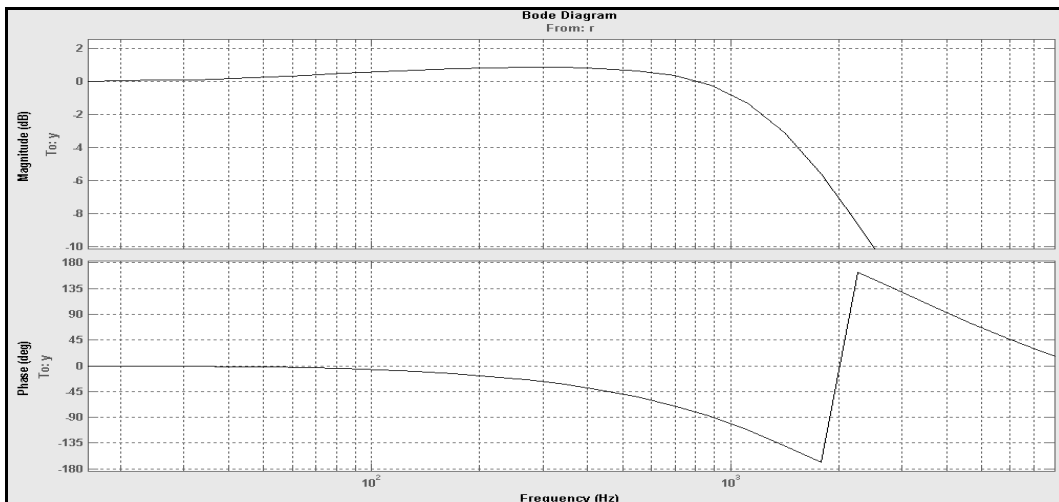


Obr.3 Geometrické místo kořenů proudové regulace

Příklad: Pro lineární pohon SIEMENS 1FN1-126 v posuvu osy X stroje MCFV5050LN (frézovací centrum střední velikosti) byla nastavena hodnota $T_{NI} = 2\text{ms}$, mechanická časová konstanta při hmotnosti pohyblivých částí $m=250\text{kg}$ je $\tau_M = 76\text{ms}$ a $\tau_E = 10\text{ms}$ ($R=1,8\Omega$, $L=18\text{mH}$, $K_E = 62,8\text{Vs/m}$, $K_F = 94,2\text{N/A}$). Modulační kmitočet výkonové elektroniky je $f_M = 4\text{kHz}$, póly otevřené smyčky jsou reálné $s_1 = -84,4$, $s_2 = -15,6$ a nulový bod $-1/T_{NI} = 500$. Zesílení regulátoru se podařilo zvýšit až na hodnotu $K_{PI} = 70$, kdy téměř nastalo vzájemné splynutí pólu v_1 a nulového bodu $-1/T_{NI}$, pól $v_2 = 39000$. Pro činnost regulace jsou tedy určující póly v_3, v_4 s vlastním kmitočtem $\omega_I = 8300/\text{s}$ (1320Hz) a poměrným tlumením $\zeta_I \approx 0,7$, jejichž vzdálenost od počátku je 100-krát větší než u pólu s_1 . Na **obr.5** je amplitudově-fázová charakteristika proudové smyčky vypočtená podle **obr.2**. Je vidět dobrá shoda s měřením na stroji v **obr.4**.



Obr.4 Amplitudově - fázová charakteristika proudové regulace MCFV5050LN osa X, 1650Hz (-3dB), 1000Hz (-90^0), $K_{PI} = 70V / A$, $T_{NI} = 2ms$ (měření)



Obr.5 Amplitudově - fázová charakteristika proudové regulace MCFV5050LN osa X, 1400Hz (-3dB), 900Hz (-90^0), (simulace)

Vliv regulace proudu na velikost ryvu

Výše popsané urychlení reakce motoru na povel požadovaného proudu (síly) je sice žádoucí z hlediska regulace, má však za následek zvýšení ryvu, který je určujícím parametrem pro rozechvívání rámu stroje. Reakční síla motoru způsobuje kmity rámu, které jsou zachyceny citlivým snímačem polohy a poslány zpět do regulační smyčky s rizikem, že dojde k samobuzeným kmitům celého regulačního systému. Velikost ryvu je svázána s rychlostí nárůstu proudu vztahem

$$e = \frac{da}{dt} = \frac{K_F}{m} \cdot \frac{dI}{dt} \quad (8)$$

přičemž proud je určen výstupním signálem (požadavkem) rychlostního regulátoru.

1) Při mezním požadavku skokové změny o IA lze odvodit z přechodové funkce přenosu (1), že nejrychlejší nárůst proudu samotného motoru nastává v čase $t = 0$ a je právě $1/\tau_E$. U

výše zmíněného motoru SIEMENS 1FN1-126 s elektrickou časovou konstantou 10ms je tedy maximální rychlost nárůstu $100A/s$

2) Pro motor pracující v proudové zpětné vazbě je třeba vyšetřovat přechodovou funkci přenosu (6), jejíž rovnice pro skok vstupu $1A$ je

$$I(t) = 1 - \frac{\exp(-\zeta_1 \omega_1 t)}{\sqrt{1-\zeta_1^2}} \sin\left(\omega_1 \sqrt{1-\zeta_1^2} t + \arctg \frac{\sqrt{1-\zeta_1^2}}{\zeta_1}\right) \quad (9)$$

Lze odvodit, že např. pro obvyklé tlumení $\zeta_1 = 1/\sqrt{2}$ je maximální směrnice funkce (9) rovna

$$\left(\frac{dI}{dt}\right)_{MAX} = \omega_1 \exp(-\pi/4) \approx 0,456\omega_1 \quad (10)$$

v nastává v čase $t_{RYV MAX} = \frac{\pi}{\omega_1 \sqrt{8}}$.

Pro dosaženou hodnotu proudové regulace $\omega_1 = 8300$ vychází $3785A/s$, tedy téměř čtyřicetkrát více než bez proudové zpětné vazby!! Připustíme-li např. skok proudu $80A$ (dovolený špičkový proud motoru i jeho zdroje), vychází maximální hodnota ryvu podle (8)

$$e_{MAX} = 114000m/s^3 !!!$$

Tato hodnota mnohonásobně (až o dva řády) převyšuje v praxi ověřené možnosti konstrukcí rámu obráběcích strojů.

3. Zvýšení ryvu potlačením impulsu síly do rámu (lineární motor s odpruženým sekundárním dílem)

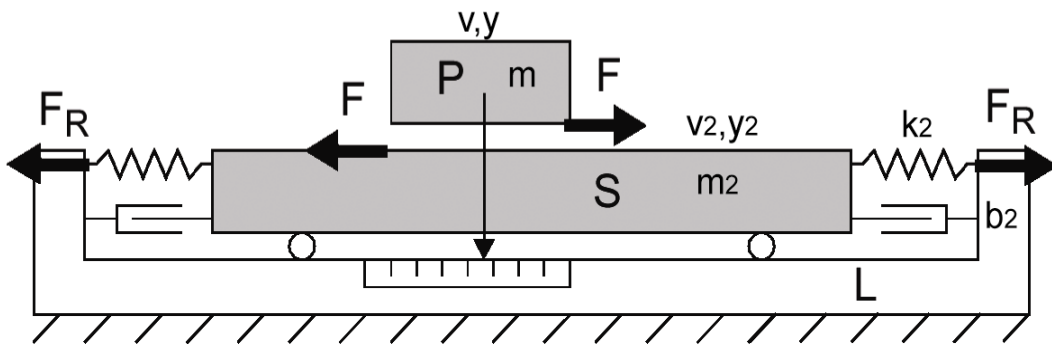
Výše uvedené závěry potvrzují, že dynamické možnosti regulace lineárních motorů v posuvech obráběcích strojů jsou podstatně vyšší než možnosti mechanické konstrukce. Řízení pohybu s maximálním ryvem je přitom žádoucí nejen u některých speciálních technologií obrábění (např. soustružení neokrouhlých tvarů), ale všeobecně kvůli zkracování rozjezdů a tím i výrobních časů.

Proudová regulace lineárního motoru s odpruženým sekundárním dílem

Dále popsany postup zvýšení ryvu a současného snížení rázů reakčních sil motorů do rámu využívá nezávislosti Lorentzových (Maxwellových) sil na rychlosti vodiče v magnetickém poli. Impuls síly do rámu stroje lze potlačit uložením samotného sekundárního dílu motoru do rámu na další posuvné (valivé) vedení a jeho zavěšením na pružiny – viz **obr.6**. Tím se změní poměry při vzniku vnitřního indukovaného napětí, které je nyní dáno vzájemnou rychlostí primáru (řízeného vůči rámu v rychlostní a polohové vazbě) a sekundáru, jehož vlastní kmito-

čet je $\Omega_2 = \sqrt{k_2/m_2}$ a poměrné tlumení $\zeta_2 = \frac{b_2}{2\sqrt{k_2 m_2}}$. Sekundár představuje klasický dyna-

mický systém hmota – pružina – tlumič, buzený reakční silou motoru F . Tato je dána jen proudem a při jeho správné komutaci nezávisí na vzájemné rychlosti obou dílů. U pevného sekundárního dílu mohl pro komutaci sloužit snímač polohy v polohové zpětné vazbě, nyní musí být motor vybaven navíc zvláštním komutačním snímačem, zařazeným mezi primár a sekundár (v **obr.6** není naznačen).



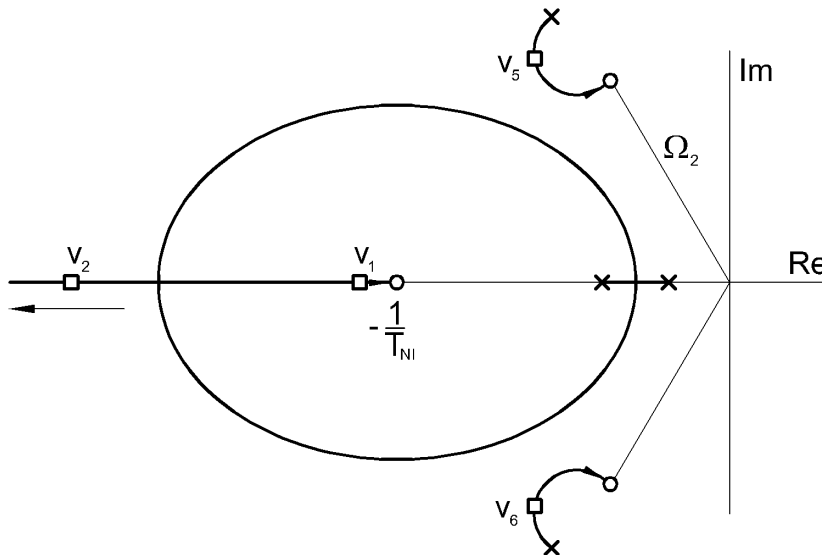
Obr.6 Potlačení impulsu síly do rámu stroje pružným zavěšením sekundáru motoru

Nový přenos mezi napětím a proudem samotného motoru lze odvodit z blokového schématu na **obr.1**, ve kterém je nyní uvažována čárkovaná větev:

$$\overline{F_I(s)} = \frac{I(s)}{U(s)} = \frac{1}{Ls + R + K_E K_F \frac{(m + m_2)s^2 + b_2s + k_2}{ms(m_2s^2 + b_2s + k_2)}} \quad (11)$$

(v případě pevného sekundárního dílu ($k_2 \rightarrow \infty$) vychází nutně původní tvar přenosu (1)).

Na GMK došlo ve srovnání s klasickým tvarem v **obr.3** ke změně, neboť otevřená smyčka má nyní o dva póly a dva nulové body více. V širokém rozmezí parametrů Ω_2, ζ_2 se však ukázalo, že jde o dvojice (ať již komplexně sdružené nebo reálné), přičemž póly s nulovými body leží vždy těsně u sebe. Případ pro komplexní hodnoty nových pólů a nul je na **obr.7** (je znázorněna pouze oblast bez vzdálených pólů a nul od Paddého rozvoje pro dopravní zpoždění měniče).



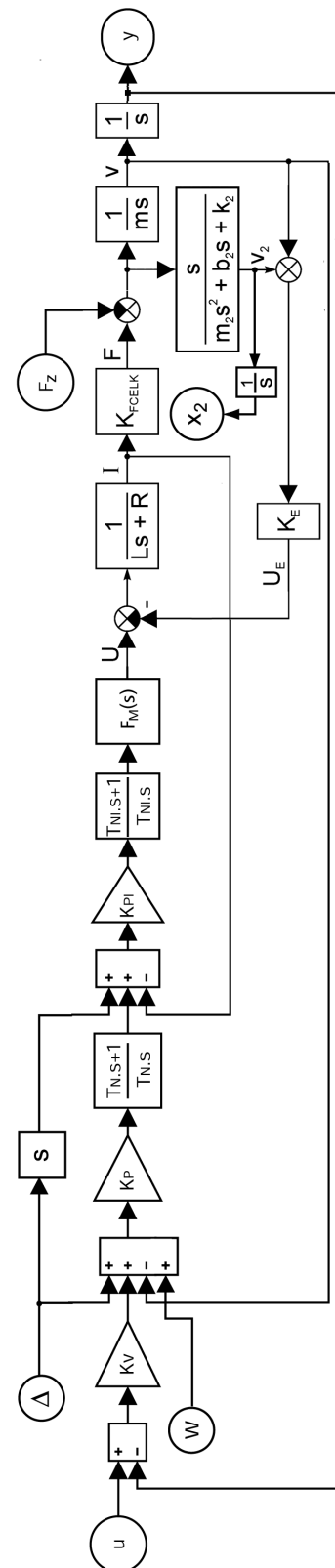
Obr.7 GMK proudové smyčky s odpruženým sekundárem

Nově vzniklé větve GMK jsou velmi krátké (v **obr.7** jsou přehnaně zvětšeny) a další póly uzavřené smyčky v_5, v_6 budou ležet těsně u nulových bodů, takže jejich účinek se vyruší. Partie GMK obsahující kružnici se středem v bodě $-1/T_{NI}$ zůstává téměř stejná jako v **obr.3**. Proudová regulace (a následně i regulace rychlosti a polohy) je tedy stejně kvalitní jako u motoru s pevným sekundárem. Přenosovou funkci celé regulace proudu je nadále možno uvažovat ve tvaru (6). Její frekvenční charakteristika je prakticky shodná s **obr.5**, pouze u extrémně malého tlumení $\zeta_2 < 0,01$ vykazuje malou nepodstatnou anomálii na kmitočtu Ω_2 . V zájmu potlačení nadměrné amplitudy kmitů sekundáru je žádoucí jeho přiměřené tlumení, např. $\zeta_2 = 0,2 \div 0,7$ (jedná se ale pouze o konstrukční, nikoliv funkční omezení, jak bude ukázáno při rozboru regulace rychlosti).

Rychlostní a polohová regulace motoru s odpruženým sekundárním dílem

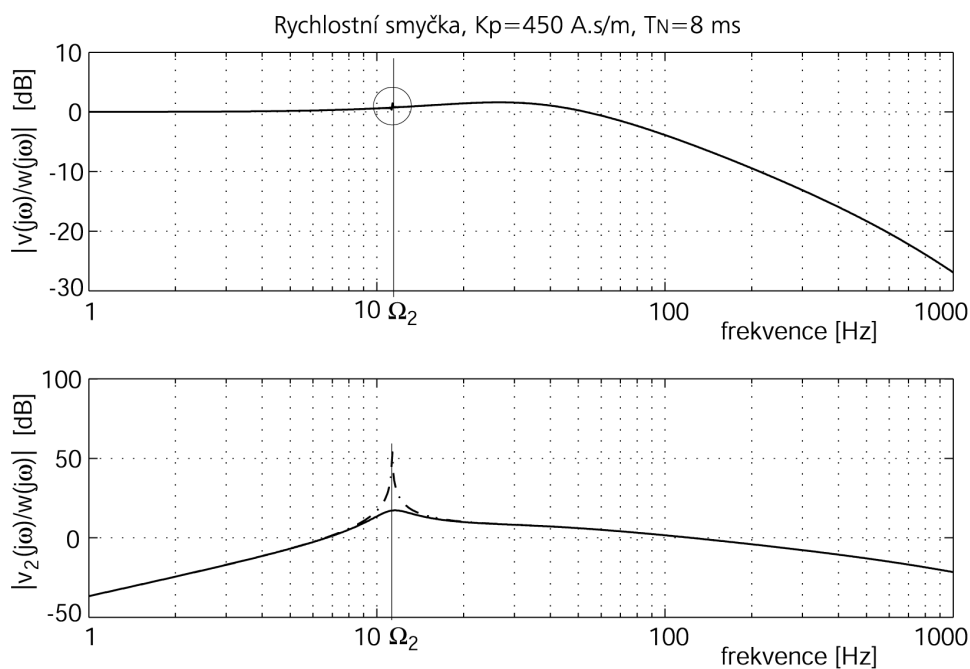
Protože se prakticky nezměnily vlastnosti proudové regulace, lze totéž očekávat i u regulace rychlosti a polohy. Příklady amplitudové frekvenční charakteristiky rychlostní a polohové smyčky získané jako poměr mezi žádanou rychlostí w resp. polohou u a skutečnou hodnotou v resp. y (viz **obr. 8**) pro motor s pružným sekundárem naladěným na $\Omega_2 = 11,4$ Hz jsou vyneseny na **obr. 9** a **10** nahoře vždy dvojmo pro hodnotu $\zeta_2 = 0,2$ a $\zeta_2 = 0$. Křivky jsou zcela shodné, pouze v mezním případě rychlostní smyčky s $\zeta_2 = 0$ je patrný malý antirezonanční propad na hodnotě Ω_2 v těsném sousedství rezonančního vrcholu; při hodnotě $\zeta_2 = 0,2$ však oba zcela vymizí. Podstatný vliv má ovšem hodnota ζ_2 na amplitudu polohy x_2 sekundáru – grafy na **obr. 9** a **10** dole. Z těchto průběhů vyplývá požadavek na hodnotu $\zeta_2 \geq 0,2$, neboť v případě nízkého tlumení by mohlo dojít k intenzivnímu rezonančnímu kmitání sekundáru.

Pohyb sekundáru x_2 je také výrazně ovlivněn vstupními poruchovými veličinami, odvozenými od polohy motoru. Především se jedná o periodickou chybu odměřovacího systému (v **obr. 8** označ. $\Delta = fce(y)$), jejíž první harmonická frekvence je obvykle dána základní roztečí rysek optické, resp. magnetické nebo jiné mřížky. Pro pohyb sekundáru i kvalitní regulaci motoru je vhodné, když jsou tyto frekvence, které se mění s rychlostí pohybu, bezpečně daleko za hranicí propustného pásma rychlostní smyčky i při nej-

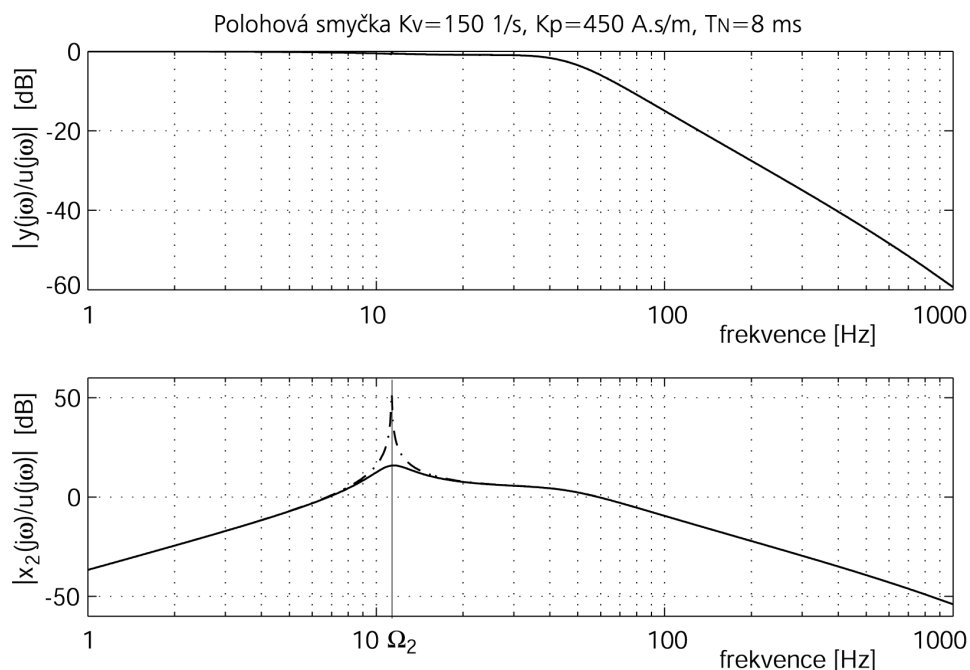


Obr. 8 Blokové schéma kaskádní regulace s vyznačenými vstupy a výstupy

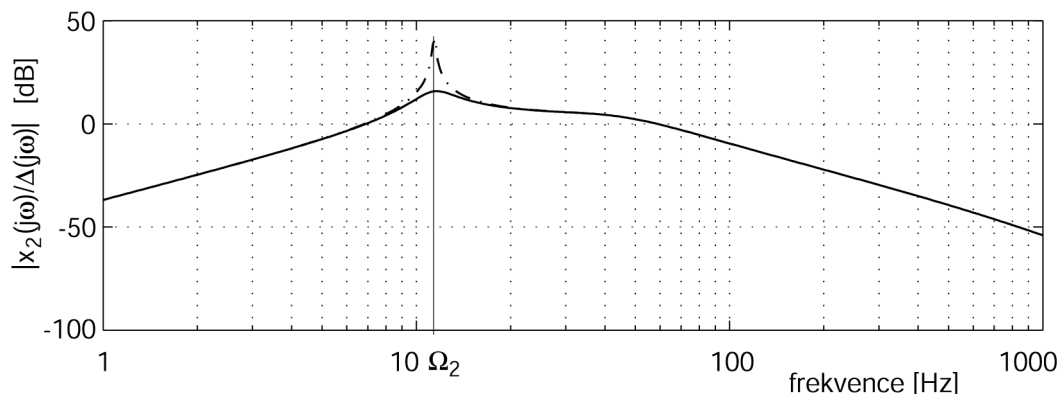
nižších pracovních rychlostech motoru. Z tohoto důvodu jsou nejlepší optická měřidla s roztečí mřížky nejčastěji $10 \div 20 \mu\text{m}$ (špičkově $4 \mu\text{m}$). U odměřovacích systémů integrovaných do kolejnič valivého vedení je dnes technologicky možná rozteč $300 \div 500 \mu\text{m}$ u magnetické mřížky a $1000 \mu\text{m}$ u indukčního principu s vyniklými ocelovými zuby. Amplitudová frekvenční charakteristika přenosu mezi chybou odměřování Δ a polohou sekundáru x_2 je v grafu na **obr. 11**.



Obr. 9 Amplitudová frekvenční charakteristika rychlostní smyčky, nahoře primár, dole sekundár, (plná čára $\zeta_2=0,2$, čerchovaná $\zeta_2=0$)



Obr. 10 Amplitudová frekvenční charakteristika polohové smyčky, nahoře primár, dole sekundár, (plná čára $\zeta_2=0,2$, čerchovaná $\zeta_2=0$)



Obr. 11 Amplitudová frekvenční charakteristika přenosu mezi polohou sekundáru a periodickou chybou odměřování (plná čára $\zeta_2=0,2$, čerchovaná $\zeta_2=0$)

Dalším typem poruchy, jež může vybudit rezonanční kmitání sekundáru, je reluktanční síla, která vzniká při pohybu motoru v důsledku střídání magnetických pólů po délce sekundáru (v **obr. 8** označ. F_z). Její základní frekvence je dána rychlostí pohybu a pólovou roztečí. Řezné síly, které spadají do téže kategorie poruch, by měly ležet frekvenčně podstatně výše, než je užitečné volit vlastní frekvenci pružného uložení sekundáru, aby měl sekundár v jejich přenosu do rámu převážně filtrační účinky.

4. Závěr

Odpružení sekundárního dílu představuje konstrukční komplikaci s jeho valivým uložením a jedním snímačem polohy navíc (pro komutaci), ale je možno jím výrazně omezit přenášení reakčních sil motoru do rámu stroje i při velkých hodnotách ryvu. Na základě uvedeného teoretického rozboru vlastností proudové, rychlostní a polohové regulační smyčky motoru lze konstatovat, že stabilní a kvalitní regulace lineárního motoru s odpruženým sekundárním dílem je možná. To se potvrdilo i v praxi při prvních pokusech na zkušebním standu. Podmínkou je ovšem nenulová hodnota viskózního tlumení tohoto uložení. Z hlediska regulace se jeví jako vhodná hodnota součinitele poměrného tlumení $\zeta_2 = 0,2 \div 0,7$.

Literatura

- [1] Souček, P., Bubák, A.: *Vysoce dynamické pohony posuvů obráběcích strojů*. Sborník SpOS, Praha, 2002. ISBN 80-238-8426-3
- [2] Česák R., Souček P., Bubák A.: *Application of Linear Motors in NC Machines*. Sborník ICPR Praha 2001. ISBN 80-02-01438-3
- [3] Souček, P.: *Pohony výrobních zařízení*. Skriptum ČVUT. Praha 1997.

Tyto výsledky byly získány za finančního přispění Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci podpory projektu výzkumu a vývoje LN00B128.