

COMPENSATION OF IRREGULAR MOTION OF A MACHINE TOOL FEED DRIVE AXIS

J. Moravec*

Abstract: *This contribution deals with the interaction of feed drive axes of NC machine tools, primarily focusing on the compensation of vibrations in the linear axis caused by a carried unbalanced rotating axis. These vibrations negatively influence both machining precision and surface quality. To suppress the effect of unbalanced mass, four compensators were designed as additive blocks supplementing the ordinary cascade control loop of the NC machine tool's feed drive axis. The paper also includes results of an experimental verification of these methods, carried out on a test bed which is a simplified model of a real NC machine tool.*

Keywords: *Linear motor, Mass unbalance, Cascade loop.*

1. Úvod

U pohybové osy NC obráběcího stroje s přímým pohonem dochází k bezprostřednímu působení síly motoru na řízenou hmotu (např. suport s obrobkem, unášená kolébka nebo otočný stůl). Oproti pohonům nepřímým (s mechanickým převodem) zde odpadá urychlování hmot mechanických převodů, a to vytváří předpoklad pro dosažení vyšších zrychlení řízené hmoty. Přímý pohon je ale více choulostivý na působení vnějších sil (řezné síly, rázy, síly od nevyváhy). Regulace je napadána přímo, bez ochranného efektu vložených převodů (vliv síly na regulaci se snižuje s kvadrátem vloženého převodu), a to vede ke snížení přesnosti obrábění a zhoršení kvality obrobku. Tento problém je výrazný zejména u pohybových os s přímými pohony, které unášejí např. otočný stůl s obrobkem, nebo kolébku. V příspěvku představené metody kompenzace kmitů lineární osy vybuzevané unášenou rotační osou s nevyváhou jsou ověřeny na experimentálním stavu, který je zjednodušeným modelem pohybové osy NC obráběcího stroje.

Lineární osa je řízena kaskádně uspořádaným regulačním obvodem s proudovým (PI), rychlostním (PI) a polohovým (P) regulátorem. Dynamická poddajnost motoru (přenos mezi výchylkou řízené hmoty a vnější silou) podstatně závisí na nastavení konstant regulátorů rychlosti a polohy. Nastavení regulace je ale omezeno, např. poddajnou mechanikou stroje. Pro další potlačení vybuzevaných kmitů lineární osy je možné regulační obvod NC pohybové osy rozšířit o kompenzační bloky.

Byly navrženy čtyři metody kompenzace. Tři z metod jsou principiálně podobné (proudová, rychlostní a polohová kompenzace). Kompenzátory vypočítávají budící sílu, převádějí ji na signál s potřebnou dimenzí (proud, rychlost nebo poloha) a s potřebným fázovým předstihem jej přičítají do regulace tak, aby motor působil protisílu k poruchové síle od nevyváhy. Pro naladění těchto kompenzátorů je nutné znát některé v provozu obtížně zjistitelné parametry (polohu, velikost nevyváhy vůči lineární ose a vzdálenost jejího středu hmotnosti od osy rotace). Algoritmus čtvrté metody kompenzace přímo reaguje na vybuzevané výchylky lineární osy a adaptivně, bez přednastavení parametrů nevyváhy, vypočítává amplitudu i fázi kompenzačního signálu a přičítá jej do polohové zpětné vazby.

Pro ověření efektu kompenzace v ustálených i přechodových stavech byly kompenzační algoritmy experimentálně testovány při konstantní i proměnné úhlové rychlosti nevyváhy a to při klidovém i pohybovém stavu lineární osy.

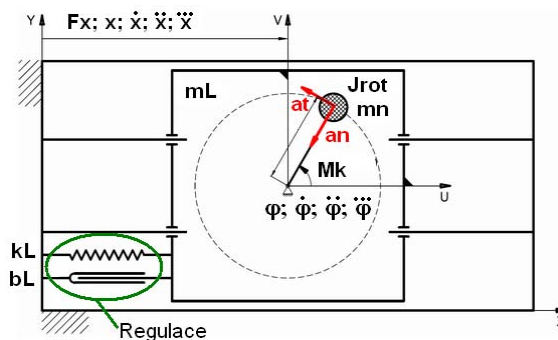
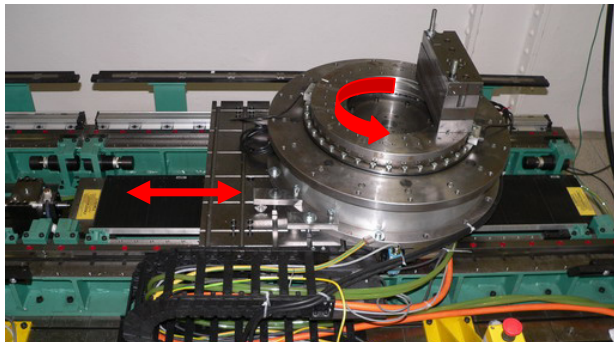
* Ing. Jan Moravec.: Výzkumné centrum pro strojírenskou výrobní techniku a technologii, České vysoké učení technické v Praze, Horská 3; 128 00, Praha 2; CZ, e-mail: j.moravec@rcmt.cvut.cz

2. Interakce rotační a lineární osy

Pohybová osa experimentálního stavu poháněná lineárním synchronním motorem s permanentními magnety (přímým pohonem) unáší prstencový motor s nevyváhou, obr. 1. Rotace nevyváhy vyvoluje kmity lineární osy. Průmět výsledné síly od nevyváhy do lineární osy lze popsat vztahem

$$F_x(t) = -m_n \cdot r_n \cdot (\ddot{\varphi}(t) \sin \varphi(t) + \dot{\varphi}^2(t) \cos \varphi(t)) \quad (1)$$

kde m_n je hmotnost nevyváhy, $\varphi(t)$ je natočení nevyváhy a r_n je vzdálenost středu hmotnosti nevyváženého rotoru od jeho rotace.



Obr. 1: Experimentální stav pro kompenzaci interakce rotační a lineární osy

Obr. 2: Schéma experimentálního stavu

3. Kompensátory s pevně nastavenými parametry

Proudová kompenzace

U synchronního motoru s permanentními magnety platí lineární vztah mezi proudem I_{sk} a silou motoru F_{mot}

$$F_{mot} = I_{sk} \cdot K_f \quad (2)$$

kde K_f [$N \cdot A^{-1}$] je silová konstanta motoru. Frekvenční přenos mezi žádaným a skutečným proudem motoru je pro frekvence odpovídající otáčkám nevyváhy prakticky jednotkový. Pro externí sílu působící na motor může být tedy snadno vypočítán proudový kompenzační signál a zaveden do proudové regulační smyčky motoru. Známe-li okamžitou polohu a velikost nevyváhy vůči lineární ose, tak proudový kompenzační signál vytvářející protisílu k rušivé síle od nevyváhy je

$$I_k(t) = -\frac{1}{K_f} \cdot m_n \cdot r_n \cdot (\ddot{\varphi}_{sk}(t) \sin \varphi_{sk}(t) + \dot{\varphi}_{sk}^2(t) \cos \varphi_{sk}(t)) \quad (3)$$

kde $\varphi_{sk}(t)$ je skutečné natočení nevyváhy vůči lineární ose. Při derivování skutečné polohy nevyváhy (změřené zpětnovazebním polohovým čidlem) ale vznikají problémy se zesílením šumu. Proto je skutečná poloha nevyváhy počítána z polohy žádané, šumem nezátíženě. Ve výpočtu pak musí být zohledněn frekvenční přenos polohové regulace prstencového motoru. Ten je zde nahrazen filtrem prvního řádu se shodným propustným pásmem f_p . Jeho Laplaceův obraz je

$$G_{ki}(s) = \frac{1}{\frac{1}{2\pi f_p} s + 1} \quad (4)$$

Laplaceův obraz skutečné polohy $\Phi_{sk}(s)$ počítané z polohy žádané je dán součinem obrazů náhradního filtru $G_{ki}(s)$ a žádané polohy $\Phi_{zad}(s)$

$$\Phi_{sk}(s) = G_{ki}(s) \cdot \Phi_{zad}(s) \quad (5)$$

U rychlostní a polohové kompenzace je kompenzační signál zaváděn na vstup rychlostní, resp. polohové zpětné vazby lineární osy. K vykompenzování vyvolené síly je zapotřebí stejný proud jako u kompenzace proudové daný vztahem (3). Rychlostní nebo polohový kompenzační signál musí být do

regulačního obvodu zavedeny s takovým předstihem a amplitudou, aby jejich proudový (silový) účinek v motoru kompenzoval právě vybuzenou sílu od nevyváhy. Laplaceův obraz vztahu (3) pro proudový kompenzační signál $K_I(s)$ musí být u rychlostního kompenzátoru násoben kauzální náhradou přenosu mezi žádanou rychlostí a proudem $G_{VI}(s)$ a u polohového regulátoru kauzální náhradou přenosu mezi žádanou polohou a proudem $G_{XI}(s)$. Kompenzační signál pro rychlostní kompenzátor bude tedy

$$K_R(s) \doteq K_I(s) \cdot G_{VI}(s) \quad (6)$$

a pro polohový kompenzátor

$$K_X(s) \doteq K_I(s) \cdot G_{XI}(s) \quad (7)$$

Do přenosových funkcí kompenzátorů je nutné přednastavit konstanty filtrů aproximujících náhradní přenosy a dále hmotnostní parametry nevyváhy a její polohy vůči lineární ose. Určení těchto parametrů je v praxi obtížné a jsou zatíženy chybami. Proto byla vyvinuta metoda, která vybuzené výchytky lineárního motoru kompenzuje adaptivně, bez přednastavování jakýchkoli parametrů.

4. Adaptivní kompenzace

Adaptivní kompenzátor reaguje na vybuzené výchytky a nastavuje podle nich proporce kompenzačního signálu x_{komp} tak, aby skutečné výchytky lineárního motoru x_{skut} byly minimální. LMS algoritmus adaptivního filtru na zadané referenční frekvenci současně nastavuje amplitudu i fázi kompenzačního signálu x_{komp} tak, aby byl co nejpřesnějším odhadem harmonické složky vybuzené nevyváhou a obsažené v polohové odchylce Δx . Referenční frekvence je odvozena od otáček nevyváhy. Frekvenční přenos $G(s)$ zahrnuje přenos motoru a jeho rychlostní regulace. Hodnota zpětné vazby x_{zv} je dána rozdílem

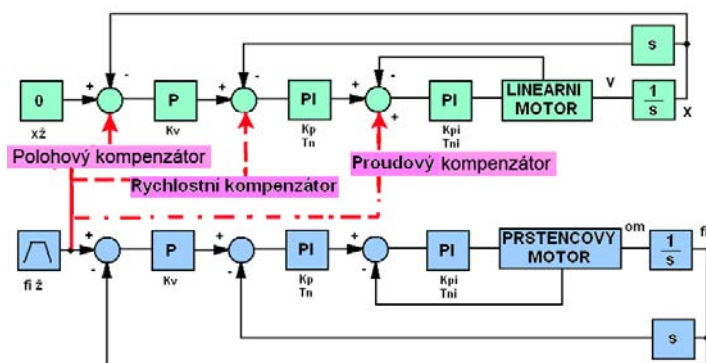
$$x_{zv} = x_{skut} - x_{komp} \quad (8)$$

Pokud je žádaná hodnota polohy $x_{zad}=0$ a pokud bude výstup filtru dokonalým odhadem frekvenční složky vybuzené nevyváhou na jeho vstupu ($x_{komp}=\Delta x$) pak

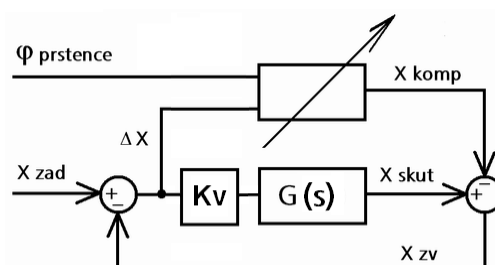
$$\Delta x = x_{komp} = x_{zad} - x_{zv} = 0 - x_{zv} = -x_{zv} \quad (9)$$

$$x_{skut} = x_{zv} + x_{komp} = x_{zv} - x_{zv} = 0 \quad (10)$$

Za výše uvedených předpokladů jsou výchytky lineárního motoru vybuzené otáčením nevyváhy zcela vykompenzovány. V kompenzátoru se nastavuje pouze jediná konstanta, ovlivňující konvergenci algoritmu.



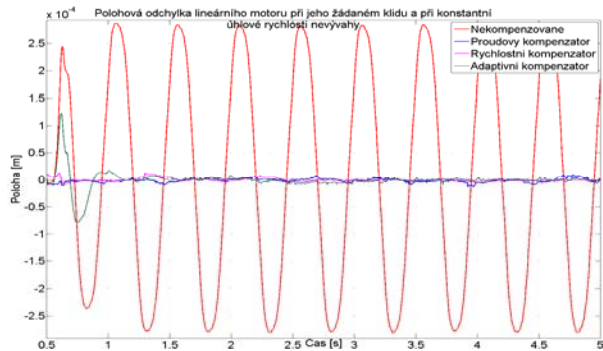
Obr. 3: Implementace kompenzátorů s pevně nastavenými parametry do regulačního obvodu lineárního motoru



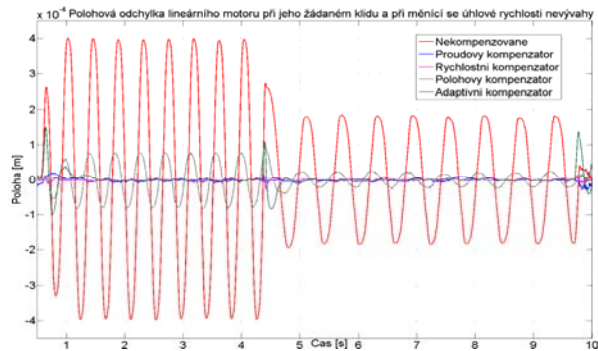
Obr. 4: Implementace adaptivního algoritmu do regulačního obvodu lineárního motoru

5. Experimentální ověření funkce kompenzátorů

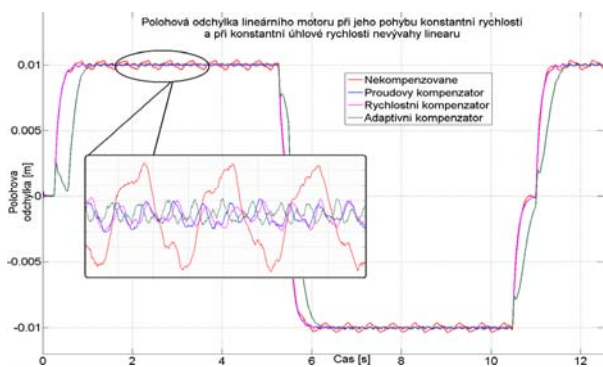
Při experimentálním ověřování kompenzátorů byl lineární i prstencový motor řízen v polohové zpětné vazbě. Nevývaha byla roztáčena na konstantní úhlové rychlosti (rozběh a brzdění pomocí s-funkce s definovaným ryvem). Byl sledován kompenzační efekt při klidové žádané poloze lineárního motoru a dále při jeho pohybu konstantní rychlostí (rozběh a brzdění pomocí s-funkce s definovaným ryvem) a harmonickým pohybem. Výsledky experimentů jsou zachyceny na obr. 5 až obr. 8.



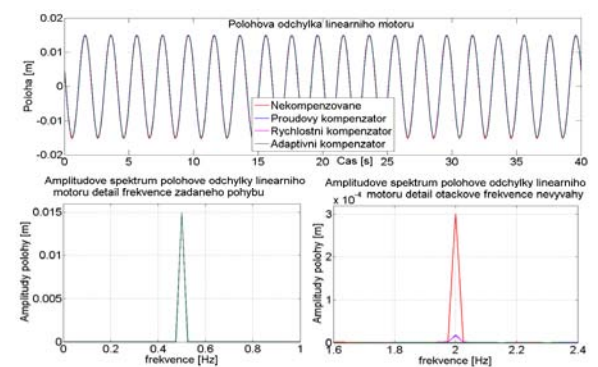
Obr. 5: Polohová odchylka lineárního motoru při jeho žádaném klidu a při konstantní úhlové rychlosti nevyváhy



Obr. 6: Polohová odchylka lineárního motoru při jeho žádaném klidu a při měnící se úhlové rychlosti nevyváhy



Obr. 7: Polohová odchylka lineárního motoru při jeho pohybu konstantní rychlosti a při konstantní úhlové rychlosti nevyváhy (zbytkové vibrace ve výřezu nesouvisí s otáčením nevyváhy)



Obr. 8: Polohová odchylka lineárního motoru při jeho harmonickém pohybu a při konstantní úhlové rychlosti nevyváhy

6. Závěr

Všechny kompenzátory snižují vybuzené výchylky lineárního motoru v přechodových i ustálených stavech otáčení nevyváhy. Velmi výrazný je kompenzační efekt proudového, rychlostního a adaptivního kompenzátoru v ustálených stavech, vibrace jsou sníženy přibližně 40-krát, a to na úroveň několika inkrementů odměřovacího pravítka, obr. 5, obr. 6. Polohový kompenzátor snižuje vybuzené výchylky přibližně 5-krát. Nižší kompenzační efekt je zapříčiněn chybou přibližného odhadu náhradního přenosu mezi žádanou polohou a proudem. V přechodových stavech mají nejvýraznější efekt proudový a rychlostní kompenzátor. Kompenzátory snižují vybuzené výchylky i při pohybu lineárního motoru, obr. 7. Při jeho harmonickém pohybu má nejvýraznější kompenzační efekt adaptivní kompenzátor, který kompenzovanou harmonickou složku prakticky zcela potlačí, obr. 8.

Litatura

Souček, P. (2004) *Servomechanismy ve výrobních strojích*, ČVUT v Praze.

Souček, P., Bubák, A., (2008) *Vybrané statě z kmitání v pohonech výrobních strojů*, ČVUT v Praze.

Haykin, S. (1996) *Adaptive Filter Theory*, third ed., Prentice-Hall, New Jersey, 1996.

Tyto výsledky byly získány za finančního přispění Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci podpory projektu výzkumu a vývoje IM0507.