

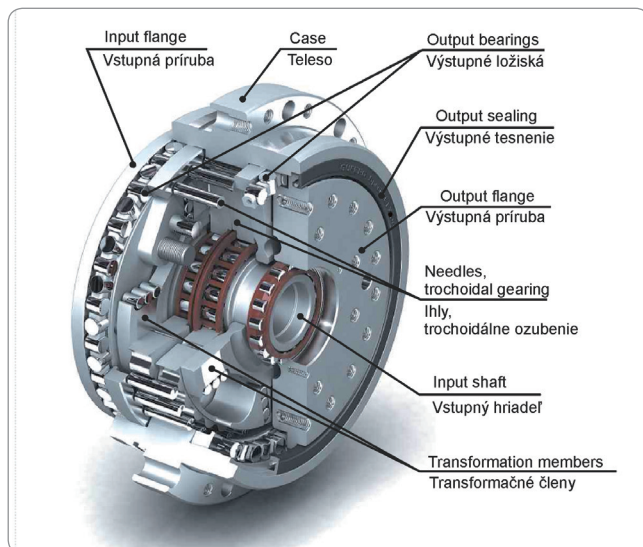
Vplyv nelinearit cykloidnej prevodovky na presnosť polohovania

Moderné stroje na výrobu presných zariadení, polohovanie robotov a manipulátorov a pod. vyžadujú použitie kvalitných pohonných systémov vyznačujúcich sa nielen vysokou dynamikou, ale aj presnosťou mechanických parametrov. Vlastnosti pohonu sú výrazne ovplyvňované vlastnosťami prevodovky. V článku analyzujeme vplyv jednotlivých parazitných nelinearit cykloidnej prevodovky na priebeh výstupnej polohy pohonu. Výsledkom analýzy je spresnený simulačný model cykloidnej prevodovky.

Pre neustále sa zvyšujúce nároky na presnosť riadenia polohy či pohybu materiálu vo výrobnom procese sa sprísňujú aj podmienky na modernizáciu technológií, ako sú rýchlejšie a výkonnejšie výpočtové riadiace procesory, presnejšie optické senzory polohy, kvalitnejšie pohony a presnejšie prevodovky, ktoré reagujú na všetky aspekty pohybu. Trendom vývoja v poslednom čase sú kompaktné servopohony (aktuátory), ktoré zlučujú motor, prevodovku, prípadne aj výkonový menič s riadením do jedného celku. V dôsledku vysokých nárokov na presné polohovanie zariadení, či už robotov, manipulátorov alebo obrábacích strojov, boli vyvinuté presné prevodovky (reduktory). Pochopenie princípu konštrukcie jednotlivých typov Xreduktorov a ich parazitných vlastností tvorí jednu zo základných častí analýzy servopohonu s nadväznosťou na potrebu kompenzovania týchto vlastností, ktorých cieľom je zvýšenie presnosti riadenia polohy. Keďže je konštrukcia pomalobežných servomotorov s dostatočne veľkým momentom a malými rozmermi technicky veľmi náročná, voľba presného reduktora s vysokým prevodom a nízkymi hodnotami parazitných nelinearit sa stáva štandardom pri výrobe priemyselných robotov. Vplyvom nelineárneho správania prevodovky v pohonných systémoch robotov prípadná uhlová chyba polohy ramena robota výrazne ovplyvňuje presnosť polohovania, a preto treba venovať zvýšenú pozornosť vlastnostiam prevodovky a jej kompenzácií.

Cykloidná prevodovka

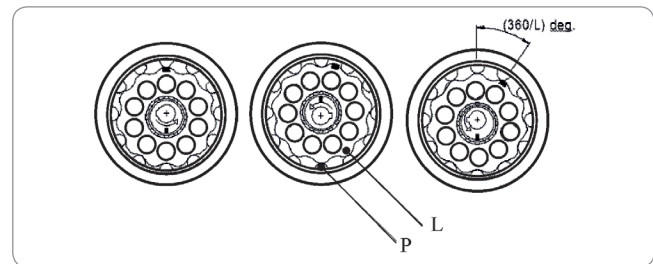
Cykloidná prevodovka je jednou z dvoch foriem precíznych prevodoviek, analyzovaná v tejto práci. V rôznych odborných literatúrach je iba málo informácií o tomto druhu precíznych prevodoviek. Opis vzájomného pôsobenia síl vnútri prevodového mechanizmu je v [1]. Základný princíp fungovania cykloidnej prevodovky je podobný ako pri planetovej prevodovke, avšak využitie centrálného kolesa, podobne ako pri planetovej prevodovke, je pri tomto type vylúčené. Na jeho mieste je unášací systém prenášajúci otáčky aj moment pohonu pomocou excentrického hriadeľa, na ktorom sú nasadené dve kolesá s trochoidným ozubením. Jedno z možných konštrukčných riešení cykloidnej prevodovky s prenosom momentu prostredníctvom transformačných členov v tvare kríža, ktoré majú za následok zlepšenie momentovej tuhosti prevodovky, je na obr. 1.



Obr. 1 Cykloidná prevodovka Twinspin v čiastočnom reze

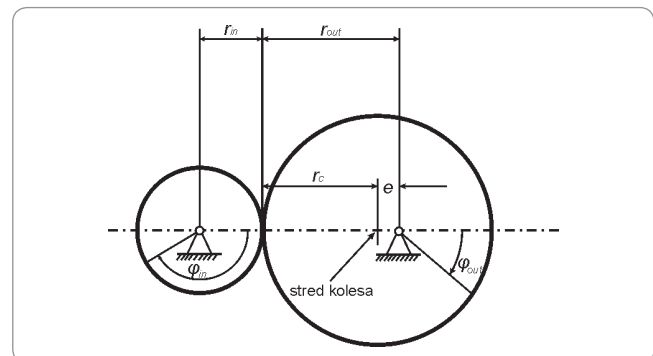
Na obr. 2 je principiálne znázornenie základného výpočtu teoretického prevodového pomeru cykloidnej prevodovky, kde P je počet ihliel a L počet zubov trochoidného ozubenia:

$$i = \frac{P - L}{L}$$



Obr. 2 Základný princíp výpočtu teoretického prevodu cykloidnej prevodovky

Nevýhoda klasického cykloidného prevodu spočíva vo zvlnení výstupného momentu pri konštantných otáčkach, ktoré možno fyzikálne vysvetliť pomocou obr. 3. Otáčanie dvoch kolies sa opisuje ako vzájomné odvalovanie sa, pričom os jedného z kolies je posunutá o hodnotu excentricity, čo má za následok výsledné zvlnenie momentu cykloidnej prevodovky. [2] Na obr. 3 reprezentujú veličiny r_{in} a r_{out} polomery jednotlivých kolies, e je hodnota excentricity a φ_{in} , φ_{out} sú uhly natočenia kolies. V skutočnosti sú však vzájomné vzťahy v prevodovke oveľa komplikovanejšie. Trochoidné kolesá v prevodovke firmy Spinea sú vplyvom excentrického hriadeľa navzájom posunuté o 180°. V dôsledku precízneho trochoidného profilu ozubenia je takmer 50 % zubov jedného kolesa súčasne v zábere, čo výrazne linearizuje toto nežiaduce zvlnenie. Prevodovka navyše obsahuje axiálno-radiálne ložiská, ktoré s veľmi presným trochoidným ozubením samotnej prevodovky predurčujú prevodovku Twinspin fy Spinea na použitie v aplikáciách náročných na presnosť, vysokú momentovú kapacitu, malý mŕtvý chod a vysokú tuhosť kompaktnej konštrukcie. [3] Typickými oblasťami použitia je konštrukcia priemyselných robotov, obrábacích strojov a iných priemyselných zariadení.



Obr. 3 Fyzikálny princíp zvlnenia momentu prevodovky

V literatúrach [4] a [5] sa autori venujú dynamickým vlastnostiam prevodovky Twinspin, ktorá predstavuje lineárny trojhmotnostný systém so vzájomným pružným spojením. Z hľadiska riadenia polohy treba poznať, respektíve identifikovať, nelinearity, ktoré vplyvajú na výslednú presnosť polohovania. V dôsledku nedokonalosti výroby trochoidných kolies aj nosného telesa prevodovky dochádza k tzv.

chybe uhlového prenosu prevodovky, ktorá je znázornená na obr. 4. V dôsledku tejto chyby dochádza k chybe polohovania, ktorú možno prezentovať ako nestálosť už spomínanej teoretickej hodnoty prevodového pomeru i_{th} . V závislosti od polohy výstupného hriadeľa a hodnoty chyby uhlového prenosu platia pre polohu a moment nasledujúce rovnice:

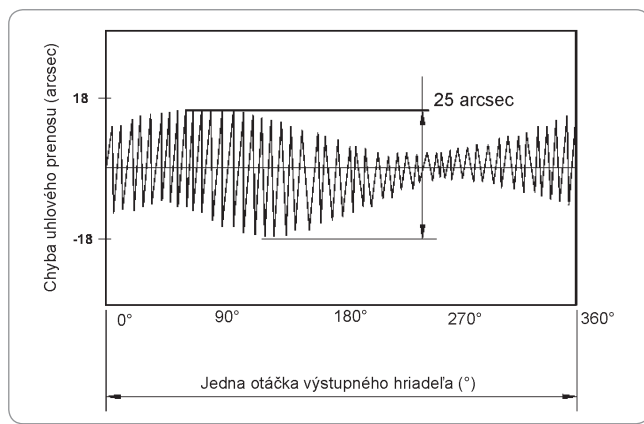
$$\dot{\varphi}_{in} = i(\varphi_{out})\dot{\varphi}_{out}$$

$$M_a = -\frac{M_{out}}{i(\varphi_{out})}$$

Presný prevodový pomer $i(\varphi_{out})$ v definovanej polohe natočenia výstupnej príruby nemožno presne opísať jednoduchou rovnicou. V dôsledku periodicity chyby uhlového prenosu po prekročení minimálne jednej otáčky výstupnej príruby možno túto chybu opísať pomocou Fourierovho radu nasledujúco:

$$u(\varphi_{out}) = i_{th} + \sum_{j=1}^{n_u} A_j \cos(f_j \varphi_{out} + b_j)$$

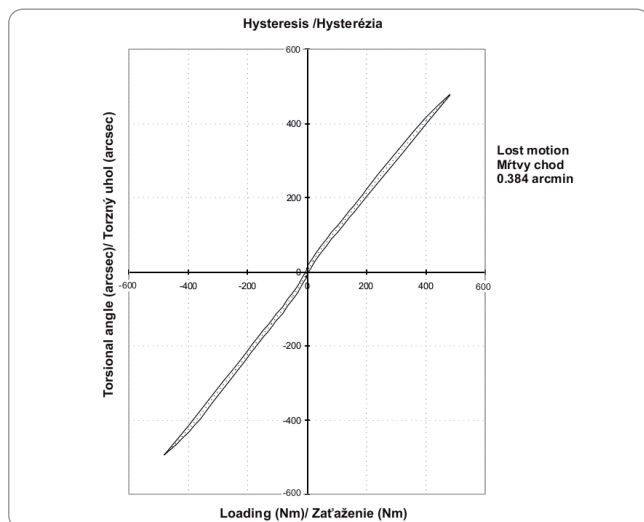
kde f je frekvencia otáčania, i_{th} je teoretická hodnota prevodového pomeru, A reprezentuje amplitúdu a b je fázová odchýlka.



Obr. 4 Chyba uhlového prenosu prevodovky TS 140

Hysteréza

Spolu s chybou uhlového prenosu predstavuje hysteréza ďalšiu charakteristickú črtu prevodovky. Z hysteréznej charakteristiky možno získať informácie o statickej aj dynamickej vlastnosti vyšetrovanej prevodovky. Torzná tuhosť, vôľa v zuboch, ako aj informácia o presnosti polohovania patria k najvýznamnejším premenným, ktoré možno získať z merania hysterézy danej prevodovky. Vo všeobecnosti platí, že hysteréza je nežiaducim faktorom vplyvujúcim na presnosť polohovania a opotrebenie samotnej prevodovky. Hysterézná krivka je definovaná v [3] takto: ak sú vstupný hriadeľ a teleso zaistené proti otáčaniu a krútiaci moment pôsobí na výstupnú prírubu, potom má graf zaťaženia (obr. 5) tvar hysteréznej krivky.



Obr. 5 Hysterézná krivka

V [6] je opísaný vzájomný vzťah medzi hysterézou prevodovky a účinnosťou torznej tuhosti η_t takto:

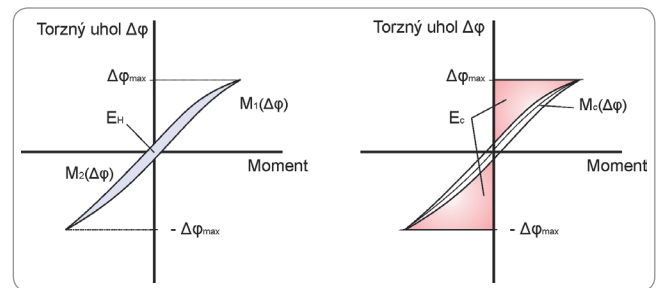
$$\eta_t = 1 - \frac{E_h}{2.E_c}$$

kde E_h je stratová energia a E_c reprezentuje energiu netlmenej pružiny, pričom pre tieto energie platí:

$$E_h = \int_{-\Delta\varphi_{max}}^{\Delta\varphi_{max}} M_1(\Delta\varphi)d\varphi - \int_{-\Delta\varphi_{max}}^{\Delta\varphi_{max}} M_2(\Delta\varphi)d\varphi$$

$$E_c = \int_{-\Delta\varphi_{max}}^{\Delta\varphi_{max}} M_c(\Delta\varphi)d\varphi$$

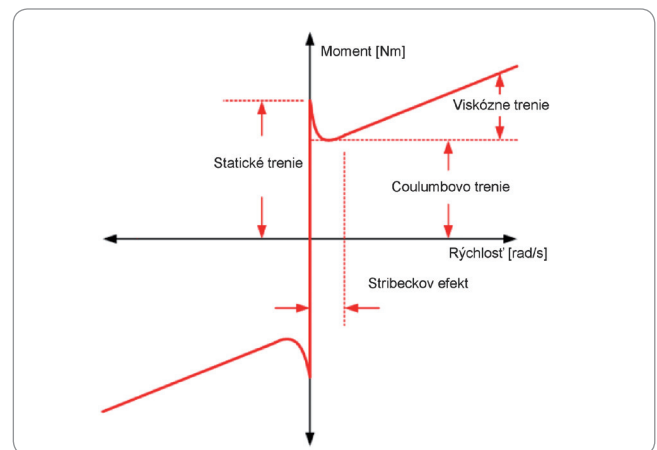
kde M_1 , M_2 sú hodnoty momentov hornej, respektíve spodnej vetvy hysteréznej krivky a M_c je momentom zodpovedajúcim bezstratovému elastickému momentu pružiny.



Obr. 6 Charakteristické veličiny hysteréznej krivky

Trenie

Trenie je nelineárny jav všeobecne prítomný pri pohybe telies, ktoré sú vo vzájomnom kontakte. Pri riadení servopohonov vplyva trenie na všetky prevádzkové režimy. Pri vysokých nárokoch na presnosť je nevyhnutné poznať hodnotu trecej sily prevodovky, aby sa zaistili dobré regulačné vlastnosti a vysoká presnosť riadenia polohy. Trečí model (obr. 7) pozostáva podľa [7] zo štyroch zložiek: zo statického, z Coulombovho a viskózneho trenia a je doplnený javom nazývaným Stribeckov efekt.



Obr. 7 Trečí model

Význam jednotlivých zložiek je nasledujúci:

- 1) Statické trenie sa vyskytuje vtedy, ak sa objekt nachádza v pokoji (bez pohybu). Ak je externá sila väčšia ako pôsobenie statického trenia, objekt sa dostáva do pohybu.
- 2) Coulombovo trenie (suché trenie) je silou pôsobiacou proti pohybu objektu, pričom naň pôsobí konštantnou silou. Funkciu Coulombovho trenia M_{tc} možno opísať vzťahom:

$$M_{tc} = \mu.M_n$$

kde μ je koeficient Coulombovho trenia a M_n je normálová sila.

3) Viskózne trenie je lineárnou funkciou sily proporcionálne úmernou rýchlosti. Ako funkcia rýchlosti sa opisuje takto:

$$M_v = k_v \omega$$

kde k_v reprezentuje koeficient viskózneho trenia a ω uhlovú rýchlosť.

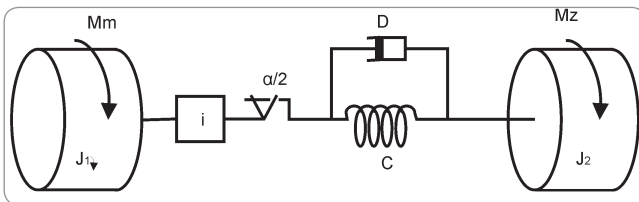
4) Stribeckov jav (Stribeck Effect). Podľa [7] je nelineárnou funkciou trenia, ktorú možno identifikovať na základe experimentov. Stribeckov jav vyplýva z použitia tekutého alebo tuhého maziva na styčných plochách navzájom sa pohybujúcich mechanických častí v pohone. To spôsobuje pokles trenia s rastúcou rýchlosťou, ako vidieť na obr. 7, až po tzv. Stribeckovu rýchlosť, ktorá závisí od použitého maziva.

Trecí model v [7] je aproximovaný na Armstrongov trecí model opísaný vzťahom:

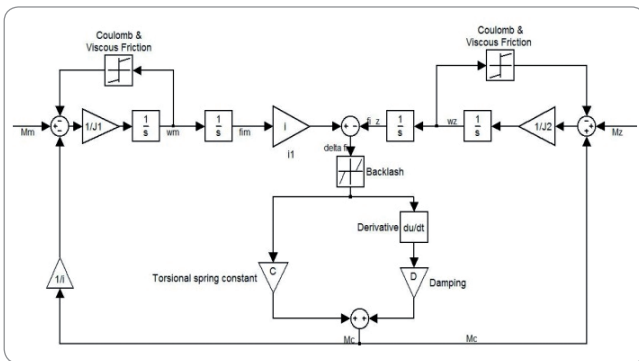
$$M_t = k_v \omega + M_{tc} \operatorname{sgn}(\omega) + [M_{st} - M_{tc}] \operatorname{sgn}(\omega) e^{-v_s |\omega|}$$

kde k_v je trecí koeficient viskózneho trenia, M_{tc} Coulombovho trenia, M_{st} maximálna hodnota statického trenia, v_s Stribeckova rýchlosť a ω uhlová rýchlosť. Armstrongov model obsahuje všetky dôležité parametre trenia, ako je statické, Coulombovo a viskózne trenie a Stribeckov jav, a najlepšie vystihuje širokú škálu trecích nelinearit, ktoré sú prítomné pri riadení servopohonov.

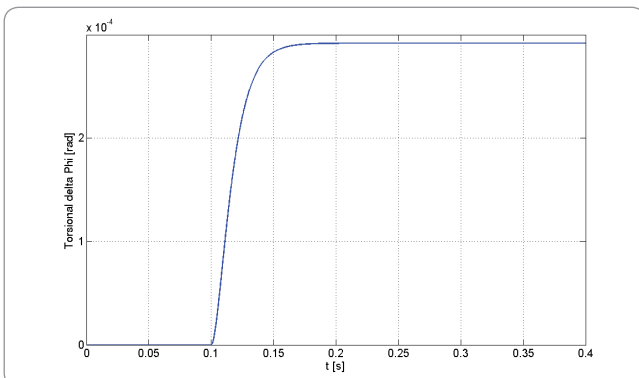
Všeobecný model prevodovky, ktorý platí pre všetky prevodovky, nehladiac na konštrukciu a v prvotnom uvažovaní bez chyby uhlového prenosu s vplyvom trenia pružného spojenia a vôle v zuboch, je znázornený na obr. 8. Môžeme ho opísať ako dvojhmotnostný systém s pružným spojením, ktoré má vysokú torznú tuhosť špecifickú pre cykloidnú prevodovku TwinSpin. Na obr. 9 je matematický model dvojhmotnostného systému prevodovky.



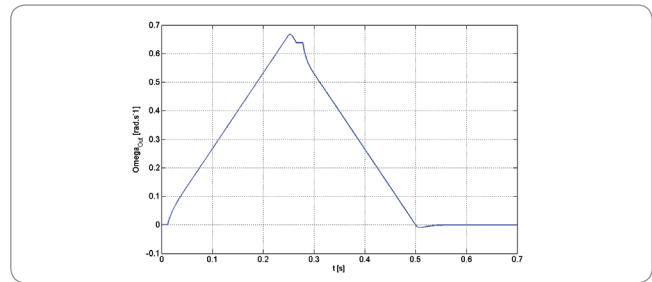
Obr. 8 Dvojhmotnostný systém prevodovky s vôľou



Obr. 9 Matematický model dvojhmotnostného systému prevodovky



Obr. 10 Natočenie výstupnej príruby pri zabrzdenej vstupnej časti s pôsobením $M = 35 \text{ Nm}$



Obr. 11 Priebeh otáčok výstupnej príruby prevodovky

Záver

V tomto článku bola prezentovaná analýza parazitných nelinearit negatívne pôsobiacich na priebeh výstupnej polohy. Detailné pochopenie týchto parazitných vlastností je základným kameňom ich kompenzácie a vytvorenia riadiacej štruktúry pre presnejšie polohovanie servosystémov využívaných v robotike, ako aj polohovacích zariadení rôzneho druhu a účelu. Ďalším krokom v práci bude doplnenie modelu o chybu uhlového prenosu.

Podakovanie

Tento článok vznikol vďaka podpore v rámci operačného programu Výskum a vývoj pre projekt: Výskum modulov pre inteligentné robotické systémy, ITMS:



26220220141, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Literatúra

- [1] Lehmann, M., "Berechnung und Messung der Kräfte in einem Zykloiden-Kurvenscheiben-Getriebe, Technische Universität München, 1976
- [2] Thümmel M.,: „Modellbasierte Regelung mit nichlinearen inversen Systemen und Beobachtern von Robotern mit elastischen Gelenken“, diss., Technische Universität München, 2006
- [3] Katalóg SPINEA, Ltd, TwinSpin, vol. I/2009, 58 p., 2009.
- [4] Balara M., Ložiskový reduktor a jeho matematický model. In: SEKEL 2007 a PRINCIPIA CYBERNETICA 2007. Praha, ČVUT, 2007, 6 p., ISBN 9788001038048
- [5] Dynamické charakteristiky ložiskového reduktora, In: Automatizácia a riadenie v teórii a praxi, ARTEP 2008, Workshop odborníkov z univerzít, vysokých škôl a praxe 20. 2 – 22. 2 2008, Stará Lesná, SR
- [6] KALENDER T., Statistische Modellierung von Präzisionsgetrieben in elektromechanischen Antriebssystemen. Fortschritt-Berichte, VDI, vol. 1, no. 236, 1994, VDI-Verlag, ISBN 3-18-323601-X, 236 S.
- [7] Olsson, H., Astrom, K.J., de Wit, C.C., Gafvert, M., Lischinsky, P.: "Friction Model and Friction Compensation", Eur. J. Control, vol. 4, no. 3, 1998, pp. 176-195

Ing. Matúš Hric

matus.hric@tuke.sk

doc. Ing. František Ďurovský, PhD.

frantisek.durovsky@tuke.sk

doc. Ing. Viliam Fedák, PhD.

viliam.fedak@tuke.sk

Technická univerzita v Košiciach
 Fakulta elektrotechniky a informatiky
 Katedra elektrotechniky a mechatroniky