

František Ďurovský, Želmíra Ferková, Viktor Šlapák, Jozef Ivan

Pracovisko na meranie presných aktuátorov

Abstrakt: Článok opisuje automatizovaný meracie pracovisko vyvinuté na meranie presných prevodiek a aktuátorov. V článku je uvedená koncepcia pracoviska, riadenie meraní prostredníctvom grafickej aplikácie v LabView a opis meracích metód. Výsledky meraní sú dokumentované nameranými priebehmi.

Kľúčové slová: príspevok; servopohon, presná prevodovka, presnosť polohovania

Abstract The paper describes automated measurement test-bench, developed for measurement of precise transmissions and actuators. A concept of the test-bench, a measurement control using graphical user interface in LabView and measurement methods are presented. The results are documented by measured waveforms. **(Test-bench for precise actuators measuring)**

Keywords: servodrives, precise gear, position accuracy

I. ÚVOD

V priemyselných aplikáciách náročných na presnosť, ako sú priemyselné výrobné linky, robotické aplikácie alebo medicínska technika, sa ako servopohony využívajú synchronne motory s permanentnými magnetmi (PMSM) spojené s presnou harmonickou alebo cykloidnou prevodovkou. Ak je požadovaný väčší prevod alebo moment ako ten, ktorý poskytuje uvedená prevodovka, používa sa predstupeň s planétovou prevodovkou [1].

Harmonické a cykloidné prevodovky patria medzi tzv. bezvôľové prevodovky. Ich presnosť je lepšia ako 60 arcsec. Majú vysoký prevodový pomer a pri zachovaní malých rozmerov dokážu prenášať vysoké záťažové momenty.

Harmonické prevodovky sú konštrukčne jednoduché, majú malý počet komponentov a jednoduchú realizáciu vysokých prevodových pomerov. Dajú sa konštruovať s dutými hriadeľmi (tzv. hollow-shaft) s veľkými vnútornými priermi. Cykloidné prevodovky sa zase vyznačujú veľkou torznou tuhosťou a znesú zaťaženie veľkými klopnými momentmi.

Aj keď sa jedná o presné prevodovky, pružnosť materiálu a nepresnosti vo výrobe spôsobujú skrútenie výstupnej príruby prevodovky voči jej vstupu vplyvom záťažového momentu. Ďalšou nepresnosťou je tzv. chyba uhlového prenosu. Na určenie výslednej presnosti systému s uvedenou prevodovkou je nutné vykonať nasledujúce merania: meranie torznej tuhosti, meranie chyby uhlového prenosu a meranie opakovateľnej presnosti [2].

Spomenuté merania sa vykonávajú na meracích stoliaciach (standoch) s použitím veľmi presných snímačov polohy a momentu. Zaťažovanie môže byť zabezpečené mechanickou záťažou v podobe ramena so závažím alebo druhým, zaťažovacím pohonom.

Na meranie aktuátorov s presnými prevodovkami, bol navrhnutý automatizovaný merací stand. V článku je opísaná konštrukcia standu a jeho riadenie. Na príkladoch je uvedený popis jednotlivých meraní s ukázkami nameraných výsledkov. V závere sú uvedené možnosti ďalšieho rozšírenia a využitia standu.

II. KONŠTRUKCIA A RIADENIE MERACIEHO STANDU

Merací stand umožňuje meranie rôznych typov a veľkostí presných prevodiek alebo aktuátorov s presnými prevodovkami s výstupným momentom do 2000 Nm. Hoci primárna konfigurácia standu je určená

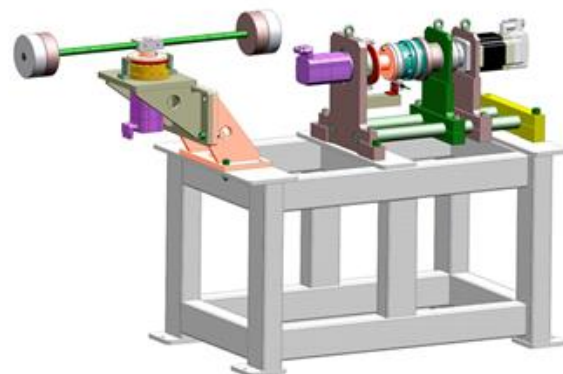
na meranie a zaťažovanie zaťažovacím pohonom, jeho modulárna konštrukcia umožňuje aj merania so závažím na ramene v zvislej alebo vodorovnej polohe. Usporiadanie standu je na Obr. 1. Na Obr. 2 vidno hlavné časti meracieho standu vrátane snímačov.

Stand je osadený snímačom momentu s pružnou spojkou, presným optickým snímačom výstupnej polohy a snímačmi teploty Pt1000.

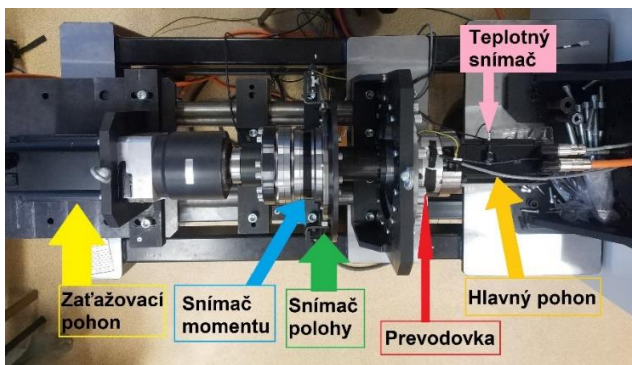
Napájanie a riadenie pohonov zabezpečujú servomeniče ACOPOS firmy B&R, pričom rozvádzač je osadený až piatimi servomeničmi rôznych výkonov. Servomeniče možno napájať voliteľne rôznymi napätiami (3 x 400 V alebo 1 x 230 V). Vďaka tomu je možné riadiť a merať aktuátory s rôznymi výkonmi a pracovnými napätiami, príp. súčasne riadiť merania na dvoch meracích standoch. Parametre meracieho standu, riadiaceho rozvádzača a parametre snímačov sú uvedené v Tab. 1

Riadenie servomeničov zabezpečuje PLC, kde je naprogramovaná hlavná riadiaca štruktúra pre všetky merania. PLC dokáže riadiť všetkých 5 osí (pohonov) tak, že pri každom meraní je možnosť voľby, ktorá os bude v danom meraní zaťažovacia a ktorá testovaná, resp. ktorá os bude pracovať ako brzda.

Nastavenie meraní a ich spustenie je možné cez dotykovú obrazovku PLC ako aj z nadradeného systému, ktorým je meracia ústredňa National Instruments NI PXI. Komunikácia s PLC prebieha cez Ethernet s použitím protokolu TCP/IP. Meracia ústredňa zároveň spracúva a zaznamenáva údaje zo všetkých snímačov, k čomu využíva multifunkčnú vstupno-výstupnú kartu s digitálnymi aj analógovými vstupmi a výstupmi.



Obr. 1. Merací stand - bočný pohľad



Obr. 2. Detail meracieho standu - pohľad zhora

Na jednoduchú obsluhu meraní bola pre PXI vytvorená obslužná aplikácia s grafickým rozhraním, ktorá zabezpečuje komunikáciu, monitorovanie, zber dát, vyhodnotenie meraní a generovanie výstupných protokolov vo formáte pdf. Merané dáta možno ukladať aj vo formáte TDMS pre ich prípadnú neskoršiu analýzu.

TABUĽKA I
Parametre meracieho standu

Zaťažovací motor	
Menovitý výkon	3,6 kW
Menovitý moment	11,6 Nm
Menovité otáčky	3000 rpm
Zaťažovacia prevodovka	
Prevodový pomer	50
Menovitý výstupný moment	445 Nm
Snímač momentu	
Menovitý moment	2000 Nm
Trieda presnosti	0,1 %
Snímač polohy	
Počet impulzov na otáčku	40000
Interpolácia	200
Rozlíšenie	8000000 ppr
Presnosť	1 arcsec

III. MERANIE PODĽA ZAŤAŽOVACÍCH CYKLOV

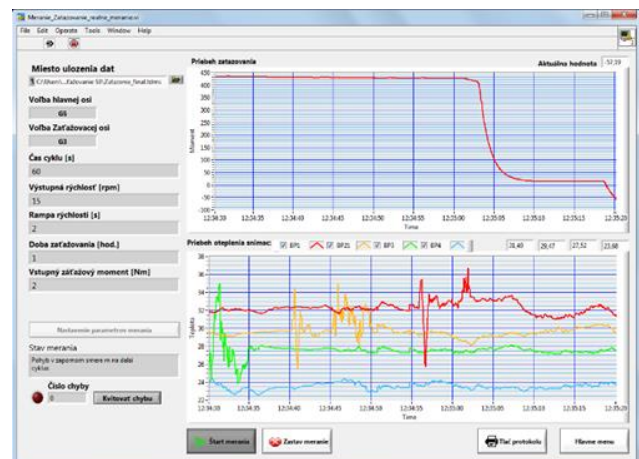
Zaťažovanie testovaného pohonu podľa štandardných zaťažovacích cyklov S1 a S3 slúži na overenie oteplenia pohonu a testy životnosti. Pri teste sa vykonáva dlhodobý záznam teplôt, momentov a rýchlosti. Ak sa pri teste prekročia užívateľom nastavené teplotné limity, je meranie automaticky zastavené.

Teploty možno merať naraz až v šiestich bodoch meracieho standu. Typicky sú merané teploty zaťažovacieho motora, testovanej prevodovky, a to v rôznych bodoch na povrchu testovaného motora, ďalej teplota príruby a teplota okolia. Získané údaje slúžia na dodatočné modelovanie oteplenia či overenie parametrov pohonu.

Riadenie merania podľa režimu S1 a S3 sa robí prostredníctvom obrazovky na Obr.3. Riadenie umožňuje vybrať osi pre zaťažovanie, zadať pracovný cyklus, t.j. výstupnú rýchlosť, dobu zaťažovania, čas chodu a čas pokoja, zrýchlenie a záťažový moment. Zaťažovanie je možné realizovať aj s jednou osou, ktorá zabezpečuje zaťažovanie meraného pohonu, pričom meraný pohon môže byť napájaný nezávislým servomeničom.

IV. MERANIE CHYBY UHLOVÉHO PRENOSU

Chyba uhlového prenosu (ATE – z angl. Angular Transmission Error) je rozdiel medzi polohou výstupnej a vstupnej príruby, prepočítanej na výstup cez prevodový pomer.



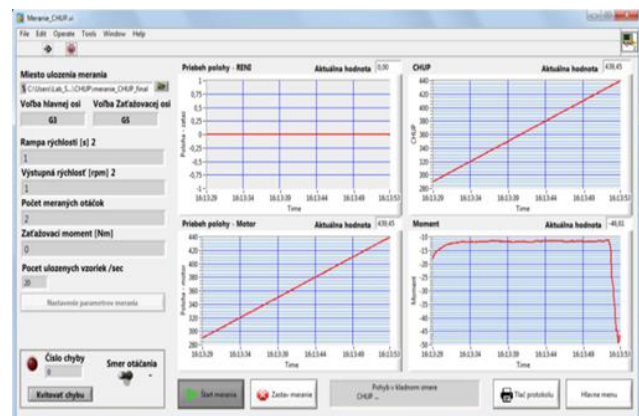
Obr. 3. Ovládacia obrazovka režimu zaťažovania

Chybu uhlového prenosu spôsobujú nepresnosti pri výrobe jednotlivých komponentov v prevodovke. ATE sa meria pri pomalejšej rýchlosti a záťaži rovnkej 3 % menovitého momentu. Meranie by malo prebiehať aspoň tak dlho, aby sa všetky rotačné komponenty otočili aspoň o jednu otáčku.

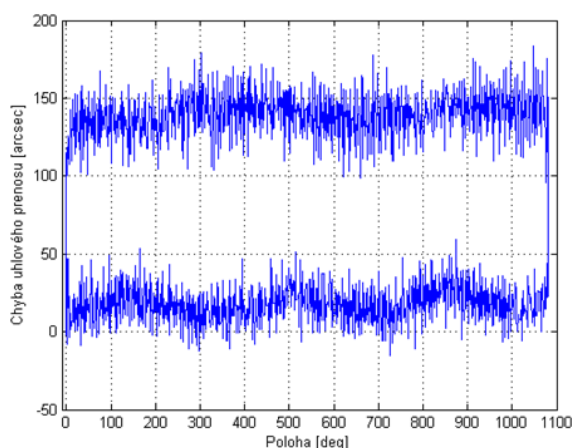
Meranie ATE vyžaduje okrem snímania výstupnej polohy a momentu aj snímame vstupnej polohy. Vzhľadom na to, že merací stand (resp. merané aktuátory) neumožňuje použiť osobitný snímač na vstupe prevodovky, t.j. na strane motora, bolo nutné pomocou elektronického rozhrania rozdeliť signál zo snímača polohy na strane motora tak pre riadenie pohonu pomocou servomeniča, ako aj pre snímame polohy v meracej ústredni.

Meranie ATE je možné uskutočniť aj so záťažou na výstupe, čím je možné odmerať aj správanie sa systému v danom pracovnom bode. Medzi parametre merania, zadávané užívateľom, tak patrí okrem výberu osí, výstupnej rýchlosti, zrýchlenia a počtu výstupných otáčok aj zaťažovací moment. Ovládacia obrazovka k meraniu ATE (Obr. 4) po spustení merania zobrazuje polohu zo vstupného a výstupného snímača, aktuálnu chybu uhlového prenosu a aktuálny zaťažovací moment. Výsledkom merania je závislosť chyby uhlového prenosu od polohy výstupu (Obr. 5).

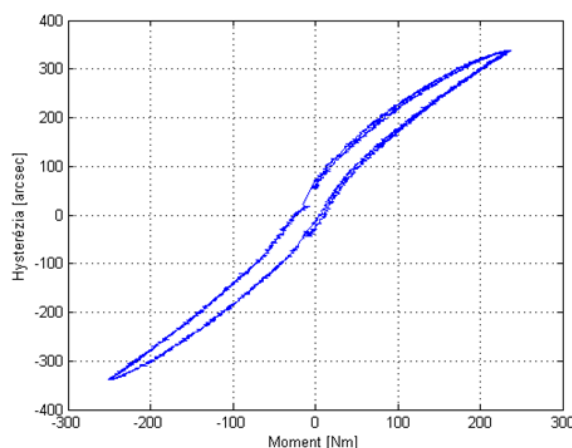
Z nameraného priebehu vyplýva, že ATE má periodický priebeh. Pri riadení pohonu sa ATE prejavuje ako chyba polohovania pri polohovej regulácii a spôsobuje zvlnenie rýchlosti pri rýchlostnej regulácii.



Obr. 4. Ovládacia obrazovka pre meranie chyby uhlového prenosu



Obr. 5. Meranie chyby uhlového prenosu



Obr. 7. Meranie torzného skrútenia - hysterézie

V. MERANIE TORZNEJ TUHOSTI

Meranie torznej tuhosti prebieha pri zabrzdennom vstupe prevodovky, t.j. pri zabrzdennom motore. Výstup je postupne zaťažovaný až na hodnotu menovitého momentu. Nasleduje znižovanie momentu na nulu a plynulý prechod na zaťažovanie momentom v opačnom smere. Po dosiahnutí plného záporného momentu sa záťaž opäť plynule mení cez nulovú hodnotu až na menovitú hodnotu v kladnom smere. Meranie sa uskutočňuje pre viacero polôh podľa zadaných parametrov.

Ovládacia obrazovka podľa Obr. 6 umožňuje zadať zaťažovací moment, rýchlosť, akou bude moment rásť a počet meraných polôh. Počas merania je zobrazovaná a zaznamenávaná poloha výstupu a výstupný moment. Zároveň sa sníma teplota pre prípad preťažovania pohonov alebo zvýšeného oteplenia pri viacnásobnom meraní.

Výsledkom merania torznej tuhosti je závislosť výstupnej polohy od zaťažovacieho momentu, tzv. hysterézná krivka (Obr. 7). Z jej priebehu je možné vyčítať nepresnosť polohovania pri danom zaťažovacom momente a mŕtvý chod prevodovky (LM – z angl. lost motion), ktorý je definovaný ako rozdiel polôh pri 3% menovitého zaťažovacieho momentu v oboch smeroch. Pri určení LM sa uvažuje priemerná hodnota skrútenia výstupu prevodovky.

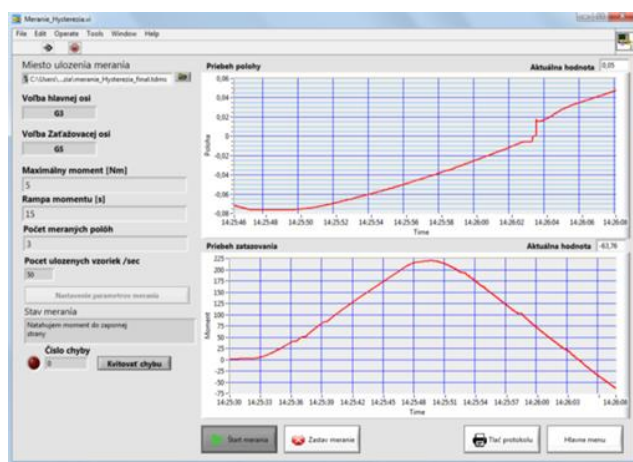
VI. MERANIE OPAKOVATELNEJ PRESNOSTI

Meranie opakovateľnej presnosti je vykonávané podľa normy [3], kde je predpísaný postup meranie pre rotačné osi a ich štatistické vyhodnotenie. Norma vyžaduje meranie pri polohovaní v 5 rôznych polohách v rámci jednej otáčky, pričom každá poloha musí byť dosiahnutá aspoň 5 krát z oboch strán.

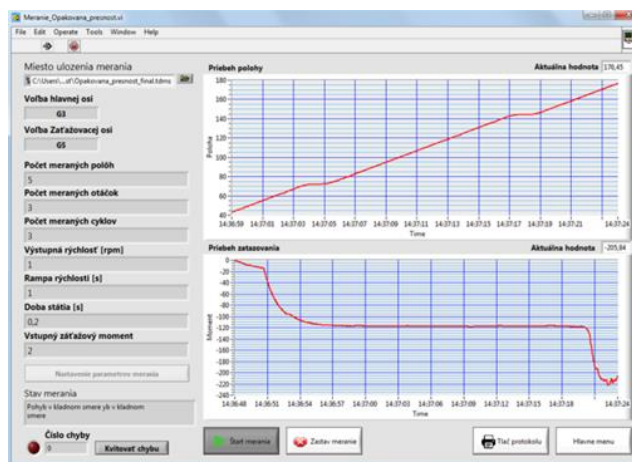
Počas merania sa opäť sníma výstupná poloha, zaťažovací moment a monitoruje sa teplota. Pri vyhodnotení sa sleduje rozdiel medzi žiadanou polohou výstupu a skutočnou polohou. Štatistickým vyhodnotením sa následne získajú hodnoty jednosmerných a dvojsmerných systematických odchýlok, priemerná dvojsmerná polohová odchýlka a necitlivosť v osi.

Užívateľská aplikácia umožňuje používateľovi zadať počet polôh, počet meraných otáčok a cyklov. Pri použití väčšieho počtu meraných polôh tak umožňuje zvýšiť presnosť merania.

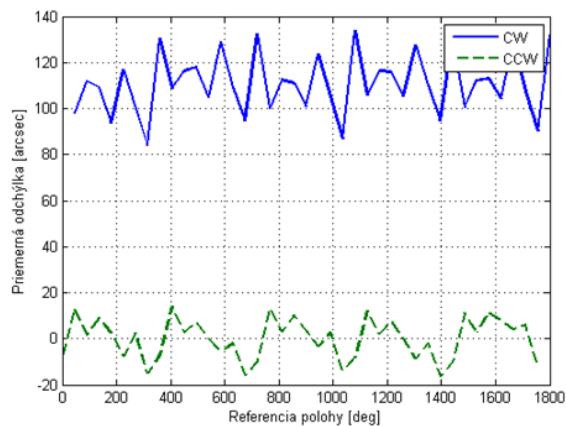
Výsledná presnosť polohovania a teda aj merania však nezávisí len od vlastností meraného pohonu, ale je ovplyvnená riadiacou štruktúrou, nastavením regulácie či použitým vstupným snímačom. Zvýšenie presnosti polohovania je možné dosiahnuť použitím výstupného snímača alebo kompenzáciou chyby uhlového prenosu a torzného skrútenia v riadení pohonu [4].



Obr. 6. Ovládacia obrazovka merania torzného skrútenia



Obr. 8. Ovládacia obrazovka pre meranie opakovateľnej presnosti



Obr. 9. Meranie opakovateľnej presnosti - priemerné polohové odchýlky pre oba smery

VII. ZÁVER

Navrhnutý merací stand umožňuje vykonávať rôzne typy meraní na presných prevodovkách a aktuátoroch s presnými prevodovkami. Okrem zaťažovania podľa štandardných zaťažovacích cyklov sa dajú automatizovane vykonávať merania na stanovenie presnosti prevodoviek: meranie torznej tuhosti, meranie chyby uhlového prenosu a meranie opakovateľnej presnosti. Grafické užívateľské rozhranie vytvorené v prostredí LabView uľahčuje zadávanie meracej sekvencie, záznam nameraných hodnôt, ich spracovanie a štatistické vyhodnotenie a zostavenie meracích protokolov. Merací stand zároveň umožňuje dlhodobé zaťažovanie pohonov v definovaných zaťažovacích sekvenciách. To umožňuje jednak zrealizovať záber

prevodoviek, ale aj overiť dlhodobú stabilitu parametrov pohonu a prevodovky. Do budúca je naplánovaná realizácia dynamickej emulácie záťaží, ktorá by dokázala priblížiť reálne zaťaženie meraného servopohonu v konkrétnych aplikáciách.

POĎAKOVANIE

„Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci operačného programu Výskum a inovácie pre projekt: Inovatívne postupy testovania pre priemysel 21. storočia ITMS: 313011T565, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja“.

LITERATÚRA

- [1] Pham, AD., Ahn, HJ., "High precision reducers for industrial robots driving 4th Industrial Revolution: State of arts, analysis, design, performance evaluation and perspective," *Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.Green Tech.* (2018) 5: 519. <https://doi.org/10.1007/s40684-018-0058-x>
- [2] M. Hric, F. Durovsky, V. Fedak, "Vplyv nelinearit cykloidnej prevodovky na presnosť polohovania" in *ATP Journal*, vol.9/2012, pp. 42-44, 2012.
- [3] Norma ČSN ISO 230-2.
- [4] Iwasaki, M.; Yamamoto, M.; Hirai, H.; Okitsu, Y.; Sasaki, K.; Yajima, T., "Modeling and compensation for angular transmission error of harmonic drive gears in high precision positioning," *Advanced Intelligent Mechatronics*, 2009. AIM 2009. IEEE/ASME International Conference on , vol., no., pp.662,667, 14- 17 July 2009.

ADRESY AUTOROV

František Ďurovský*, Želmíra Ferková, Viktor Šlapák, Jozef Ivan, Technická univerzita Košice, Katedra elektrotechniky a mechatroniky, Letná 9, Košice, SK 04200, Slovenská Republika.

*Korešpondujúci autor, email: frantisek.durovsky@tuke.sk