

OTVORENÝ RÝCHLOSTNÝ SERVOPOHON S AM

Michal Abelovský, Milan Žalman

KAR FEI STU, Bratislava, Slovensko

Abstrakt: príspevok sa zaoberá návrhom a realizáciou otvoreného rýchlostného servopohonu s asynchrónnym motorom (AM) s priamym vektorovým riadením na vývojovom prostriedku dSPACE DS1102, ktorý spolupracuje s programom MATLAB-SIMULINK. Porovnávané sú vlastnosti dvoch MRAS pozorovateľov uhlovej rýchlosti motora: MRAS pozorovateľa s modelom magnetického toku a prúdového MRAS pozorovateľa.

Kľúčové slová: asynchrónny motor, vektorové riadenie, otvorený servopohon, pozorovateľ stavu a parametrov.

1. ÚVOD

V oblasti priemyselnej automatizácie v posledných desiatich rokoch zaznamenávajú striedavé servopohony najvyššiu dynamiku nárastu. Priemyselné aplikácie riadenia pohybu sú reprezentované univerzálnymi priemyselnými pohonmi čerpadiel, kompresorov, ventilátorov, servosystémami robotov, číslicovo riadených obrábacích strojov apod. Veľká pozornosť vývojových pracovísk a výrobcov je venovaná striedavým pohonom s asynchrónnymi a synchronnými motormi. Pohony s AM sú schopné vďaka aplikácii nových metód riadenia v plnej miere konkurovať jednosmerným servopohonom aj v oblasti polohových systémov pre dynamicky náročné aplikácie ako napr. pre navíjačky, valcovacie stolice, letné nožnice, polygrafické stroje - tlačiarenské linky, baliace linky, dopravníkové a drevoobrábacie stroje.

Pri vývoji nových servopohonov zohráva čoraz väčšiu rolu systémový prístup k návrhu a realizácii jednotlivých komponentov pohybových systémov. Vývojový prostriedok DS1102 umožňuje rýchle overenie navrhnutých štruktúr na reálnom zariadení bez nutnosti časovo náročného programovania v strojovo orientovanom programovacom jazyku.

2. ŠTRUKTÚRY RIADENIA OTVORENÝCH RÝCHLOSTNÝCH SERVOPOHONOV S AM

Otvorené striedavé rýchlostné servopohony s AM majú nasledujúce výhody: zníženie ceny a zložitosti celého zariadenia, vyššiu spoľahlivosť, menšie náklady na údržbu a sú odolnejšie voči šumom v nepriaznivom prostredí. Nasadzovanie týchto servopohonov, ktoré nevyžaduje vysokú presnosť regulácie rýchlosti (do 1%), ale požaduje vysokú dynamiku generátora momentu, umožňujú aplikácie žeriavových, ťahových a výťahových systémov.

V súčasnosti sa najčastejšie používajú nasledovné spôsoby dynamického riadenia AM:

- priame vektorové riadenie,
- nepriame vektorové riadenie,
- priame riadenie momentu a toku (DTFC).

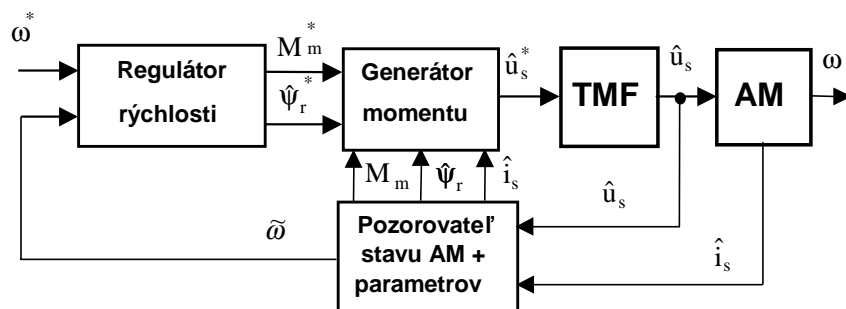
Dynamické riadenie sa môže realizovať :

- meraním mechanických a elektrických veličín (poloha, rýchlosť rotora, statorové prúdy): uzavreté štruktúry riadenia,
- meraním len elektrických veličín (statorové prúdy, napätia): **otvorené štruktúry riadenia** (sensorless vector control).

Priame vektorové riadenie využíva spätnoväzbové riadenie momentu, modulu vektora magnetického toku rotora a zložiek vektora statorového prúdu. Metóda riadenia je robustná na zmeny parametrov a je charakterizovaná kvalitnou dynamikou. Najčastejšie sú používané

konceptie na báze vyhodnotenia magnetického toku rotora a momentu motora z modelu AM pomocou pozorovateľov. Spôsoby návrhu regulátorov generátora momentu metódou inverznej dynamiky sú uvedené napr. v práci [4].

Všeobecná štruktúra otvoreného rýchlostného servopohonu je uvedená na obr. 1. Pozorovateľ stavu a parametrov z merateľných elektrických veličín (statorové napätie a prúd) odhaduje požadované regulované stavové veličiny: vektor magnetického toku, moment motora a uhlovú rýchlosť. Generátor momentu má dve vstupné riadiace veličiny a je podľa predpokladu základným regulačným obvodom servopohonu.



Obr. 1. Otvorený rýchlostný servopohon s priamym vektorovým riadením

Pozorovateľ stavu a parametrov AM v podstatnej miere určuje kvalitu riadenia rýchlostného servopohonu ktorá, je vyjadrená regulačným rozsahom, schopnosťou generovať moment aj pri nulových rýchlostiach, dynamickými charakteristikami t.j.: rýchlou odozvou generátora elektromagnetického momentu na skokovú zmenu na úroveň nominálnej hodnoty momentu.

Pri štandardnej identifikácii parametrov AM sa vychádza z deterministických metód, ktoré využívajú statické merania naprázdno nakrátko alebo dynamické merania prechodových alebo frekvenčných charakteristík. Tieto metódy je možné realizovať v identifikačnom režime meniča frekvencie. Off-line deterministické metódy nepostihuje zmeny parametrov elektromagnetického subsystému AM (odpory a indukčnosti statorového a rotorového obvodu) vplyvom teploty a nasýtenia magnetizačnej charakteristiky.

Súčasný návrh pozorovateľov stavu a parametrov vychádzajú z nasledovných on-line metód:

- MRAS - adaptívny pozorovateľ s referenčným modelom [5]
- Nelineárny stavový pozorovateľ (Luenbergov pozorovateľ, sklzové režimy)
- Rozšírený Kalmanov filter - EKF
- Pozorovatele na báze neuro-fuzzy štruktúr

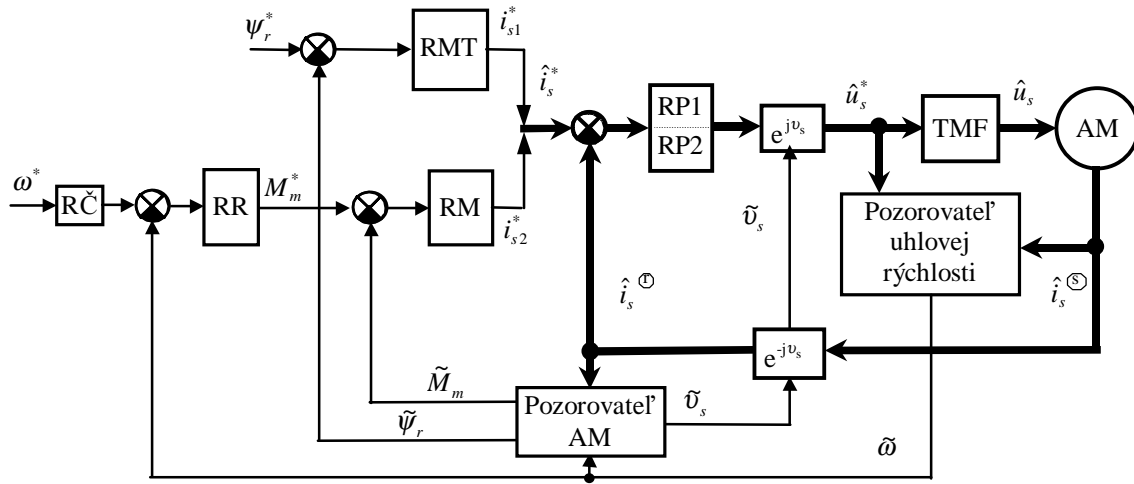
Výber pozorovateľov stavu a parametrov je možné vyjadriť nasledovnými kritériami:

- chyba pozorovania v prechodných a ustálených stavoch
- numerická zložitosť algoritmov
- robustnosť algoritmov na chyby číslicovej realizácie a zmeny parametrov

3. NÁVRH A REALIZÁCIA OTVORENÉHO RÝCHLOSTNÉHO SERVOPOHONU S AM

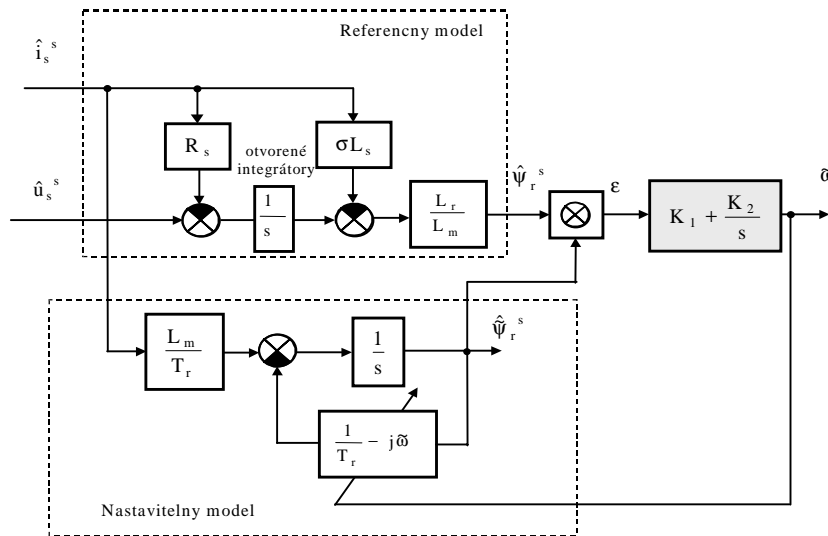
Riadiaca štruktúra otvoreného rýchlostného servopohonu s AM je založená na priamom vektorovom riadení (obr. 2). Namiesto mechanického snímania uhlovej rýchlosti je použitý pozorovateľ uhlovej rýchlosti. Samotný návrh otvoreného rýchlostného servopohonu s AM zahŕňa návrh

- pozorovateľa stavu a parametrov motora,
- generátora momentu (GM),
- regulátora rýchlosti (RR).



Obr. 2. Bloková schéma otvoreného servopohonu s priamym vektorovým riadením

Generátor momentu obsahuje PI regulátory prúdu i_{s1} a prúdu i_{s2} , magnetického toku rotora a momentu motora, ktoré sú navrhnuté metódou inverznej dynamiky [4]. Parametre PI regulátora rýchlosti sú navrhnuté experimentálne. Realizovaný otvorený rýchlostný servopohon s AM využíva ako pozorovateľ uhlovej rýchlosti: MRAS pozorovateľ s modelom magnetického toku alebo prúdový MRAS pozorovateľ.



Obr. 3. MRAS pozorovateľ uhlovej rýchlosti s modelom magnetického toku

MRAS pozorovatele vychádzajú z teórie adaptívneho riadenia s referenčným modelom (MRAC). MRAS pozorovateľ uhlovej rýchlosti s modelom magnetického toku (obr. 3) využíva dva nezávislé pozorovatele zložiek vektora magnetického toku rotora, referenčný napäťovo-prúdový model (1) a nastaviteľný prúdovo-rýchlostný model (2). Popovove kritérium hyperstability použité pri syntéze adaptačného algoritmu MRAS štruktúry zabezpečuje asymptotickú stabilitu odchýlky adaptácie a teda aj pozorovateľa, neurčuje však priamo dynamiku adaptácie [5].

$$s\hat{\psi}_r = \frac{L_r}{L_m}[\hat{u}_s - (R_s\hat{i}_s + \sigma L_s s)\hat{i}_s] \quad (1)$$

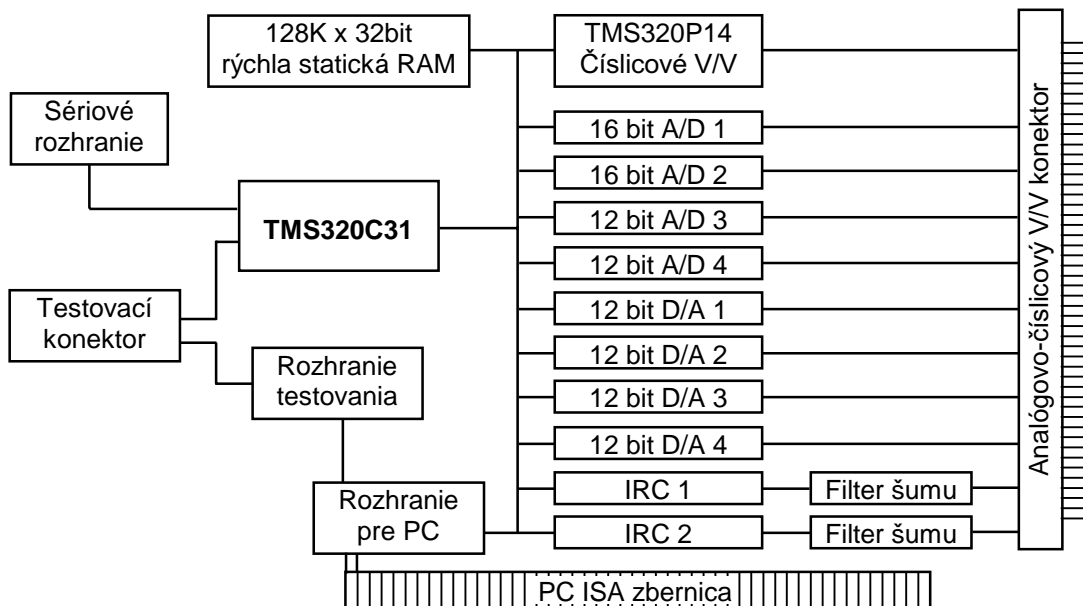
$$s\hat{\psi}_r = \left(-\frac{1}{T_r} + j\omega\right)\hat{\psi}_r + \frac{L_m}{T_r}\hat{i}_s, \quad T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (2)$$

$$\varepsilon = \hat{\psi}_r \otimes \hat{\psi}_r = \Im(\hat{\psi}_r^* \hat{\psi}_r) \quad (3)$$

Z blokovej schémy na obr. 3 vyplýva, že referenčný model MRAS pozorovateľa obsahuje tzv. otvorené integrátory. V prípade reálnych vstupných signálov obsahujúcich ofset, otvorené integrátory spôsobujú, že vektor magnetického toku rotora sa nepohybuje po kružnici, ale po špirále a pozorovateľ sa stáva nestabilný. Pri realizácii sa tento problém rieši nahradením integrátorov prenosovou funkciou 1. rádu s časovou konštantou T_i napr. 1s. Vektor toku sa potom pohybuje po kružnici, jej stred však nie je v začiatku súradnicového systému. Je to zapríčinené trvalým ofsetom zložiek magnetického toku $\psi_{r\alpha}$ a $\psi_{r\beta}$. Tento problém sa odstráni v meraní týchto trvalých ofsetov sústavou 1. rádu s časovou konštantou T_o , ktorá môže byť adaptovaná v závislosti od uhlovej rýchlosti nepriamo úmerne. Namerané ofsety sa potom odčítajú od príslušných zložiek toku [7]. Uvedené riešenie obmedzuje zdola šírku frekvenčného pásma pozorovateľa rýchlosti.

Prúdový MRAS pozorovateľ [6] na rozdiel od MRAS pozorovateľa s modelom magnetického toku využíva merané a pozorované statorové prúdy. Neobsahuje otvorené integrátory a preto poskytuje väčšiu šírku pásma na reguláciu rýchlosti.

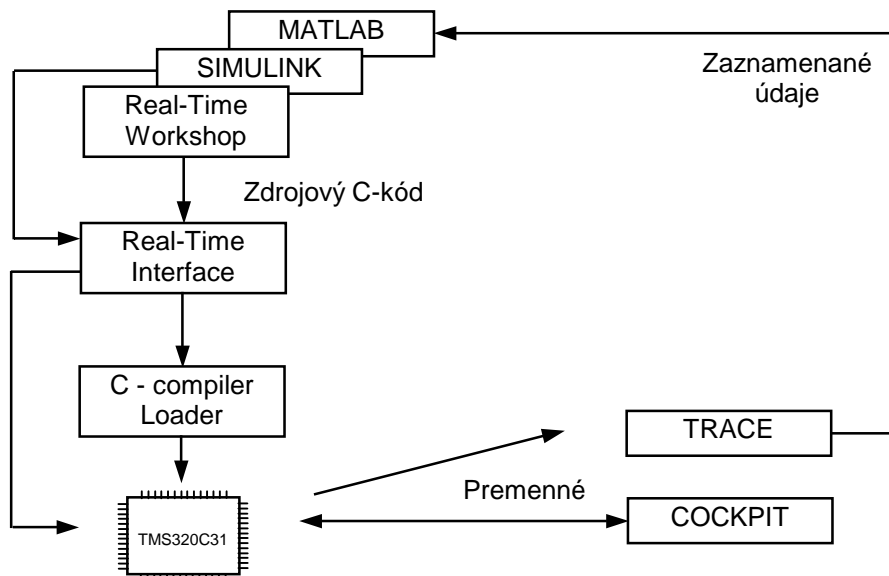
Simulácie sú realizované v prostredí MATLAB SIMULINK v. 5.2. Servopohon je realizovaný na vývojovom prostriedku firmy dSPACE DS1102. Hardvérová interná periférna karta DS1102 do PC je postavená na DSP procesore s pohyblivou rádovou čiarkou TMS320C31. Inštrukčný cyklus trvá 50 ns. Procesor obsahuje 40-bitovú násobičku s pohyblivou rádovou čiarkou, 32-bitovú celočíselnú násobičku, osem 40-bitových akumulátorov, sériový port. Vstupné a výstupné signály sú prístupné na 62-pinovom konektore. Zapojenie je špeciálne vyvinuté pre časovo náročné riadenie v reálnom čase. Spolu so silnou softvérovou podporou umožňuje priamo z prostredia SIMULINKu v MATLABe generovať a vykonávať vysoko optimalizovaný strojový kód nakreslenej riadiacej štruktúry. Odpadá tak nutnosť časovo náročnej tvorby a oživovania aplikačného programu v strojovo orientovanom jazyku. Štruktúra DS1102 je na obr. 4.



Obr. 4. Bloková schéma karty DS1102

Karta obsahuje 128K x 32bit rýchlej statickej pamäte RAM s okamžitým prístupom (čakacie cykly nie sú potrebné), dva 16-bitové A/D prevodníky s automatickou kalibráciou ofsetu (doba prevodu 4 μ s), dva 12-bitové A/D s automatickou kalibráciou ofsetu (doba prevodu 1,25 μ s) a štyri 12-bitové D/A prevodníky. DS1102 obsahuje aj dva vstupy pre inkrementálne snímače. Tieto pozostávajú z linkového prijímača číslicového filtra šumu, dekodéra fázovej informácie a 24-bitového počítadla polohy. Binárne vstupy a výstupy zabezpečuje druhý procesor TMS320P14, ktorý je zapojený ako podriadený procesor.

Systémy reálneho času firmy dSPACE sú prepojené s prostredím MATLAB SIMULINK cez súbor programov tzv. rozhranie reálneho času (Real-Time Interface RTI) vid'. obr. 5. Pomocou týchto programov je možné z blokovej schémy nakreslenej v SIMULINKu, v ktorej môže byť použitá väčšina jeho blokov ako aj špeciálne bloky dosky DS1102, vygenerovať zdrojový kód jazyka C. Tento je potom C kompilátorom preložený do strojového kódu a načítaný do procesora.

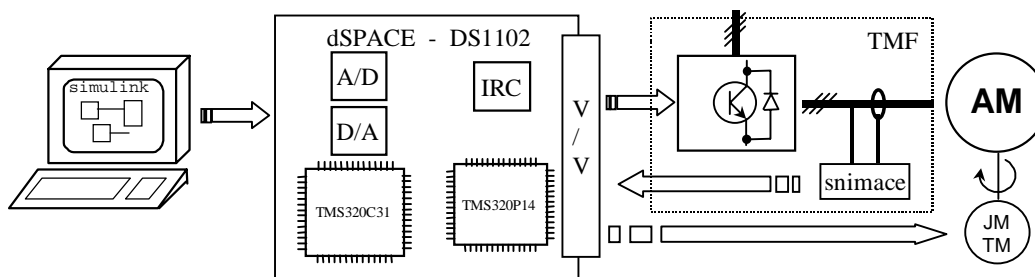


Obr. 5. Prepojenie vývojových prostredí MATLAB a dSPACE

Prácu s riadiacou schémou v reálnom čase umožňujú programy COCKPIT a TRACE. COCKPIT umožňuje grafický výstup a interaktívnu modifikáciu premenných každej aplikácie bežiackej na DS1102. Dáva možnosť meniť a zobrazovať ľubovoľnú premennú z pamäti DSP, ktorá je reprezentovaná celým číslom alebo číslom s pohyblivou rádovou čiarkou a to formou displejov, tachometrov, stupnic, žiaroviek, tlačidiel atď. Program TRACE umožňuje zobrazovať priebehy jednotlivých premenných v reálnom čase podobne ako osciloskop. Je to zabezpečené jeho spoluprácou s DSP. V každej perióde vzorkovania je volaná obslužná rutina, ktorá načíta jeden záznam a zapíše ho do vyrovnávacej pamäte. Keď je zber dát v reálnom čase na DSP ukončený, TRACE prečíta vyrovnávaciu pamäť. To znamená, že perióda vzorkovania zberu dát programom TRACE je taká istá ako perióda vzorkovania aplikácie bežiackej v reálnom čase. V prípade, že program TRACE nezobrazuje žiadnu premennú, nie je spotrebovávaný čas DSP procesora na obslužnú rutinu zberu dát.

Samotné vytvorenie aplikácie spočíva v nakreslení blokovej schémy v MATLABe SIMULINKu verzia 5.2 s využitím blokov z knižníc SIMULINKu a knižnice RTI. Táto obsahuje bloky, ktoré slúžia na prístup ku technickým prostriedkom DS1102 ako A/D, D/A prevodníky, binárne V/V, generátor PWM atď. Niektoré bloky SIMULINKu, ktoré závisia od absolútneho času, môžu po dlhom behu aplikácie dávať nesprávne výsledky. Je to spôsobené kvantovaním premennej absolútneho času v DSP. Ich použitie pri tvorbe aplikácie však závisí prípad od prípadu. Názvy súborov *.mdl zo Simulinku môžu mať len 8 znakov, inak neprebegne kompilácia.

Experimenty sú uskutočnené s 1,1 kW AM, ktorý je pevne spojený s jednosmerným motorom. Jednosmerný motor slúži ako generátor záťažného momentu. Výkonová časť striedavého servopohonu obsahuje menič frekvencie VS 400/7,5-2Q. Snímače prúdu v dvoch fázach motora sú kalibrované na rozsah $\pm 12,28$ A. Napätia a prúdy sú filtrované hardvérovými filtrami štvrtého rádu typu Butterworth s hraničnou frekvenciou 900 Hz (obr. 6).



Obr. 6. Realizácia otvoreného rýchlostného servopohonu s AM

$P_n=1,1 \text{ kW}$	$R_s=7,61 \ \Omega$	$L_s=0,602 \text{ H}$	$L_m=0,580 \text{ H}$	$T_r=0,162 \text{ s}$	$J=0,002 \text{ kg.m}^2$
$n=2840 \text{ min}^{-1}$	$R_r=3,70 \ \Omega$	$L_r=0,602 \text{ H}$	$\sigma=0,072$	$\psi_r=0,7 \text{ Wb}$	$p'=1$

Tab. 1. Parametre motora

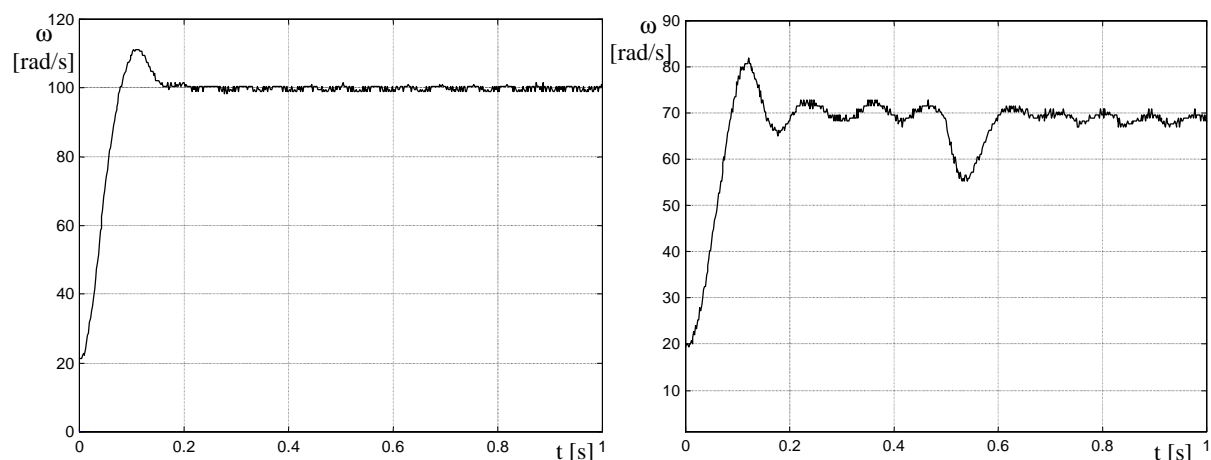
Celá riadiaca časť otvoreného servopohonu je realizovaná v jednoúlohovom režime s jednou periódou vzorkovania $T_{vz}=0,3 \text{ ms}$. Je to najmenšia možná perióda vzorkovania, ktorá bola dosiahnuteľná pri danej štruktúre riadenia. Pričom zo SIMULINKu neboli použité spojené bloky, pretože by sa minimálna perióda vzorkovania zväčšila na $0,5 \text{ ms}$. Pri použití viacúlohového režimu a dvoch periód vzorkovania (jedna pre regulátory prúdov a momentu a druhá pre regulátory toku a rýchlosti) boli hodnoty jednotlivých periód vzorkovania ešte väčšie. Hodnoty dvoch fázových prúdov sa získavajú z dvoch 16-bitových A/D prevodníkov a napätia z dvoch 12-bitových A/D prevodníkov. V SIMULINKu je z knižnice RTI na tieto účely použitý blok DS1102ADC. Informácia o poruchovom stave meniča frekvencie sa privádza cez číslicový vstup (blok RTI: DS1102IN). Menič je možné zablokovať logickým signálom cez číslicový výstup (DS1102OUT). Rýchlosť motora len pre účely zobrazovania je vyhodnocovaná diferenciou. Počet impulzov z IRC sa získava z počítadla impulzov (DS1102ENC_POS). Na generovanie troch kanálov šírkovej modulácie PWM s frekvenciou 6 kHz je použitý blok DS1102PWM. Vstupmi sú želané napätia 0 až 1 , čo zodpovedá 0% až 100% plneniu PWM. Žiadaná hodnota pre generátor záťažného momentu sa získava z D/A prevodníka (DS1102DAC) v rozsahu 0 až 10V , čo zodpovedá 0 až $3,39 \text{ Nm}$.

MRAS pozorovateľ uhlovej rýchlosti s modelom magnetického toku je realizovaný so štruktúrou kompenzácie ofsetov snímačov prúdu, pričom parametre kompenzácie boli $T_i=1 \text{ s}$, $T_0=0,3 \text{ s}$. Prakticky každá metóda kompenzácie ofsetov principiálne spôsobuje, že pozorovateľ je v oblasti blízkych nule nestabilný. Z tohto dôvodu sa experimenty s týmto pozorovateľom vykonávajú s rozbehnutým motorom. Pozorovateľ je však s periódou vzorkovania $0,3 \text{ ms}$ stabilný len do približne polovice nominálnej rýchlosti 300 rad/s . Simulácie ukázali, že na to aby bol MRAS pozorovateľ stabilný v celom rozsahu rýchlostí musí byť perióda vzorkovanie menšia ako $0,1 \text{ ms}$. Výsledky experimentu rýchlostného servopohonu s MRAS pozorovateľom s modelom toku sú na obr.7. Prúdový MRAS pozorovateľ nevyžaduje kompenzáciu ofsetov a je stabilný aj pri rýchlostiach v okolí nuly. Výsledky experimentu rýchlostného servopohonu s prúdovým MRAS pozorovateľom uhlovej rýchlosti sú na obr. 8. Na obrázkoch a.) je ozva servopohonu na skokovú zmenu želanej hodnoty rýchlosti z 0 na 100 rad/s a na obrázkoch b.) je zobrazená ozva servopohonu na skokovú zmenu záťažového momentu z 0 na 1 Nm v čase $0,5 \text{ s}$.

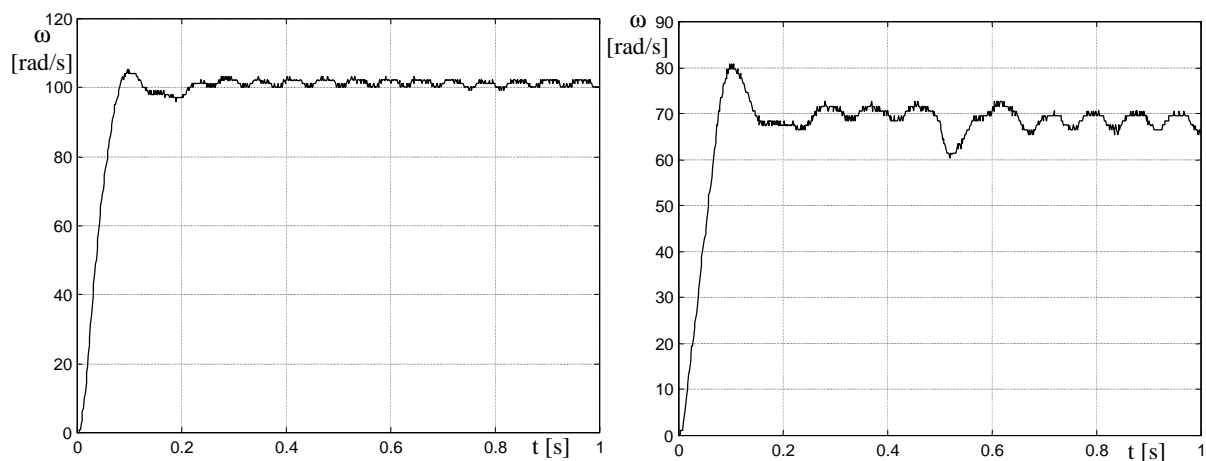
4. ZÁVER

MATLAB v spojení s DS1102 umožňuje veľmi rýchle overenie nových techník riadenia a pozorovania uhlovej rýchlosti. DS1102 v uvedenej konfigurácii sa využíva v pedagogickom procese na cvičeniach, tiež na riešenie ročníkových projektov a diplomových prác. Experimenty ukázali, že MRAS pozorovatele sú citlivé na veľkosť periódy vzorkovania t.j., aby bol pozorovateľ stabilný v celom rozsahu rýchlostí ($-300 \div 300 \text{ rad/s}$), musí byť perióda

vzorkovania menšia ako 0,1 ms. V prípade MRAS pozorovateľa s modelom magnetického toku je kvalita pozorovania rýchlosti daná okrem nastavenia PI korekčného člena aj kvalitou metódy kompenzácie ofsetov snímačov prúdu. Prúdový MRAS pozorovateľ je stabilný aj pri rýchlostiach v okolí nuly, avšak má menšiu presnosť ako MRAS pozorovateľ s modelom magnetického toku.



Obr. 7. Experiment - otvorený servopohon s MRAS pozorovateľom s modelom toku



Obr. 8. Experiment - otvorený servopohon s prúdovým MRAS pozorovateľom

5. LITERATÚRA

- [1] dSPACE: COCKPIT Instrument Panel, User' Guide, Reference Guide, D.V. 3.2, 1996
- [2] dSPACE: Real-Time TRACE Module, User' Guide, Reference Guide, D.V. 3.1, 1996
- [3] dSPACE: Real-Time Interface to Simulink®2 RTI1102, User' Guide, D.V. 1.0, 1997
- [4] Žalman, M., Jovankovič, J.: Syntéza regulátorov vektorovo riadeného AM metódou inverznej dynamiky, AT&P Journal, 1998, č.2, s. 70-73.
- [5] Colin Schauder: Adaptive Speed Identification for Vector Control of Induction motors without Rotational Transducers, IEEE Trans. On Industry Appl. Vol.-28, No.5 1992 pp.: 1054-1061.
- [6] Oualha A., Benmessaoud M., Salma-Belkhdja I., Sellami F.: Discrete Speed Sensorless Drive of IM: Structure and Stability, EPE'99 Lausanne, 10 p.
- [7] Abelovský, M.: Otvorený striedavý rýchlostný servopohon s AM, [Diplomová práca], Bratislava 1999, 64 s. - KAR FEI STU.

Kontakt:

Ing. Michal Abelovský, Katedra automatizácie a regulácie, Fakulta elektrotechniky a informatiky STU, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava, Slovensko. E-mail: mab@elf.stuba.sk