

## REALIZACIJA VEKTORSKI REGULISANOG POGONA SA SINHRONIM MOTOROM SA PERMANENTNIM MAGNETIMA

Dražen Dujić, Darko Ostojić, Vladimir Katić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*  
Borislav Jeftenić, *Elektrotehnički fakultet, Beograd*

*Nagrađeni rad mladog istraživača – komisija EE*

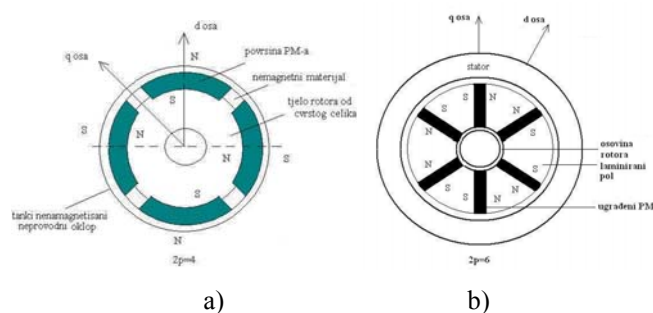
**Sadržaj** – Moderni elektromotorni pogoni su najčešće bazirani na trofaznim naizmjeničnim mašinama kao što su asinhroni motor ili sinhroni motor sa permanentnim magnetima (PMSM). Upotrebom vektorskog upravljanja, dinamika pogona sa naizmjeničnim mašinama se izjednačava po performansama sa odgovarajućim jednosmernim pogonima. Na bazi razvojnog sistema sa digitalnim signalnim procesorom (DSP) ADMC401 prikazana je praktična realizacija vektorski kontrolisanog pogona sa sinhronim motorom sa permanentnim magnetima.

### 1. UVOD

Uporedo sa razvojem komponenti energetske elektronike i mikroprocesorskog upravljanja dolazi i do masovnije upotrebe naizmjeničnih (AC) mašina u regulisanim elektromotornim pogonima. Prve realizacije vektorskog upravljanja su se pojavile sedamdesetih godina. Vektorsko upravljanje je omogućilo nezavisno upravljanje momentom i fluksom naizmjenične mašine, čime su dinamika i performanse naizmjeničnog pogona značajno unapredene. Prednosti koje pruža upotreba AC mašine u odnosu na DC mašinu ogledaju se pre svega u većoj robusnosti, znatno većoj vrednosti momenta i snage za iste gabarite, manjim troškovima i lakšim održavanjem. Implementacija vektorske kontrole u mnogome je olakšana razvojem novih generacija DSP-a koji su nezamenjivi deo jedne upravljačke strukture. Povećana moć procesora omogućava bržu obradu većeg broja informacija sa kraćim vremenima odabiranja i pruža fleksibilnost u radu koja je veoma bitna u fazi razvoja.

### 2. SINHRONI MOTORI SA PERMANENTNIM MAGNETIMA (PMSM)

Dve glavne vrste sinhronih mašina se razlikuju po obliku raspodele magnetnog fluksa u zazoru: mašine sa prostoperiodičnom raspodelom (PMSM) i mašine sa trapeznom raspodelom (BLDC). Obe vrste mašine nalaze svoju primenu u elektromotornim pogonima. Kod PMSM u zavisnosti od načina montaže magnetna razlikujemo PMSM sa površinskom montažom magnetna i PMSM sa unutrašnjom montažom magnetna.



Sl.1 Izvedbe rotora kod PMSM: a) površinska montaža, b) unutrašnja montaža

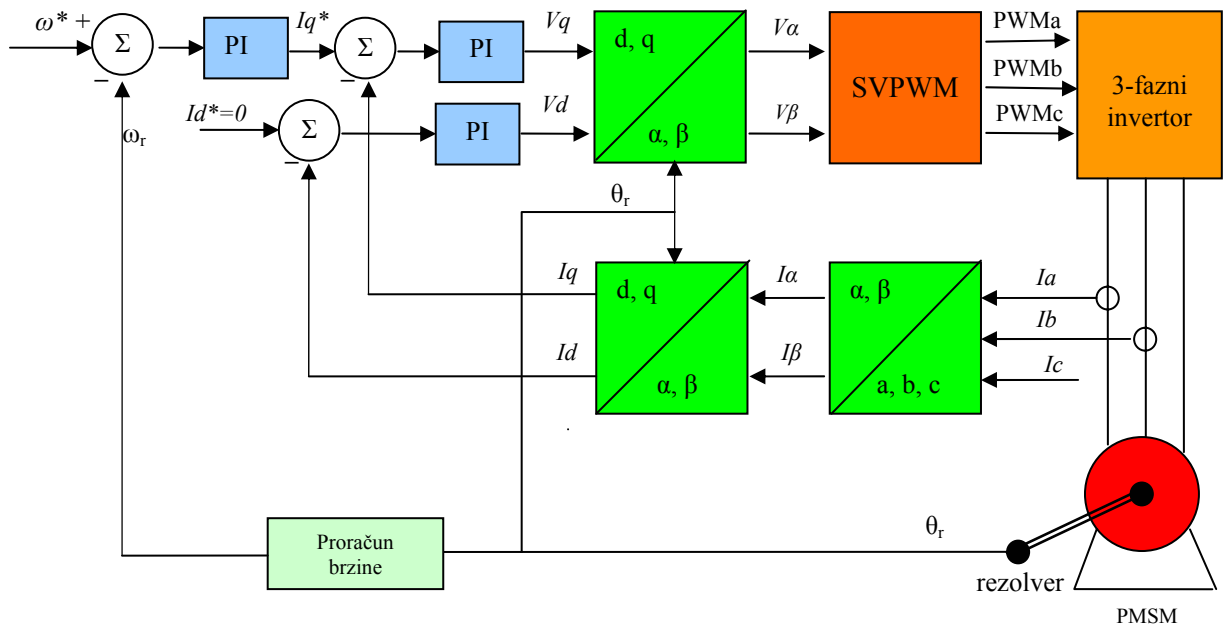
Kod površinski namontiranih magnetna efekat isturenosti je zanemariv i važi  $L_d \approx L_q \approx L_m$ . Magneti se obično spajaju sa površinom rotora lepljenjem i dodatnim spoljnim osiguravanjem od eventualnog odvajanja usled centrifugalnih sila. Karakteristike ovoga tipa mašine su: jednostavna izvedba, konstantost momenta, brz odziv i izuzetna efikasnost. Postavljanjem magnetna unutar rotora, postiže se smanjenje mase magnetna, njihov jednostavniji oblik za izradu, što sve zajedno smanjuje cenu mašine. Moguće je postizanje većih brzina zbog robusnijeg rotora ali je i izraženo postojanje reluktantnog momenta u ukupnom momentu mašine. Takođe su veće induktivnosti statorskog namotaja pa je dinamika pogona lošija. Mehanički posmatrano, kod ovoga tipa mašine, pouzdanost je veća jer ne postoji mogućnost da magneti otpadnu usled vibracija ili centrifugalnih sila pri većim brzinama [1].

### 3. STRUKTURA VEKTORSKI UPRAVLJANOG POGONA SA PMSM

Iako, generalno skuplji, PMSM ipak nalaze svoju primenu u savremenim elektromotornim pogonima zahvaljujući pre svega svojoj efikasnosti. Pogoni visokih performansi obično se realizuju na principu vektorskog upravljanja. Suština vektorskog upravljanja se sastoji u tome da se fluks koji proizvodi direktnu komponentu struje statora održi u fazi sa prostornim vektorom fluksa rotora tokom svih radnih okolnosti. Kvadratura komponenta struje, koja se tada nalazi ortogonalno na vektor fluksa rotora, direktno kontroliše momenat koji mašina razvija. Pravilno implementirana vektorska kontrola omogućuje nezavisnu kontrolu momenta i fluksa naizmjenične mašine, identično kao u slučaju jednosmerne mašine. Moguće su razne izvedbe vektorske kontrole u zavisnosti od performansi koje se žele postići u sistemu. Realizacija direktne ili indirektno vektorske kontrole zavisi pre svega od toga dokle je spremno ići sa kompleksnošću strukture sistema [2]. Na slici 2 je prikazana jedna struktura indirektno vektorski upravljano pogona sa PMSM.

### 4. HARDVERSKI ZAHTEVI

Da bi se uspešno realizovala vektorska kontrola PMSM potreban je odgovarajući hardver, koji mora da ispunjava visoke zahteve u smislu dobrih aritmetičko – logičkih sposobnosti. U ovom radu kao jezgro procesne elektronike izabran je razvojni sistem ADMC401 firme *Analog Devices* zasnovan na digitalnom signal procesoru ADSP2171, uz koga se nalazio i kompletan set neophodne elektronike, kao što su A/D i D/A konvertori [3]. Frekventni regulator je realizovan od strane autora za potrebe laboratorijskih eksperimenata. Takođe je realizovana i dodatna elektronska kartica neophodna za pobudu rezolvera, kao i prilagođenje povratnih signala sa rezolvera pre njihove obrade od strane DSP-a.



Sl.2 Struktura vektorski upravljanoj pogona sa PMSM

Sumirano gledano, zahtevi koji se postavljaju pred procesor su sledeći:

- AD konverzija struja motora
- merenje ugaone pozicije i brzine rotora
- transformacije struja ( $a-b-c \rightarrow \alpha-\beta$ )
- transformacija struja ( $\alpha-\beta \rightarrow d-q$ )
- implementacija PI regulatora struja
- implementacija PI regulatora brzine
- transformacije napona ( $d-q \rightarrow \alpha-\beta$ )
- SVPWM modulacija
- generisanje PWM signala
- implementacija strujne zaštite

Pri prekidačkoj učestanosti PWM signala od 10 kHz, procesor ima na raspolaganju vremenski interval od 100  $\mu$ s da izvrši sva matematička izračunavanja i transformacije, pre generisanja novih faktora ispunje za PWM signale.

#### 4.1. Merenje struja

Okrugenje ADC401 omogućava obradu do 8 analognih signala, u opsegu od -2 V do +2 V, pomoću analognog/digitalnog konvertora. Merene su vrednosti struje u dve faze motora, dok je vrednost struje treće faze proračunavana softverski. Za svaki analogni ulaz postoji posebno prihvatno analogno kolo, realizovano pomoću operacionog pojačavača AD8044 i otporničke mreže, koje konvertuje ulazne signale na ulazu od  $\pm 2$  V, u centrirane signale oko naponske reference, koja može biti interna ili eksterna. Ovo je neophodno jer 12-bitni A/D konvertor na samom čipu očekuje ulazne signale u opsegu 0 – 4 V, koje konvertuje u digitalnu reč u formatu 1.15 u fiksnom zarezu .

#### 4.2. Merenje ugaone pozicije i brzine rotora

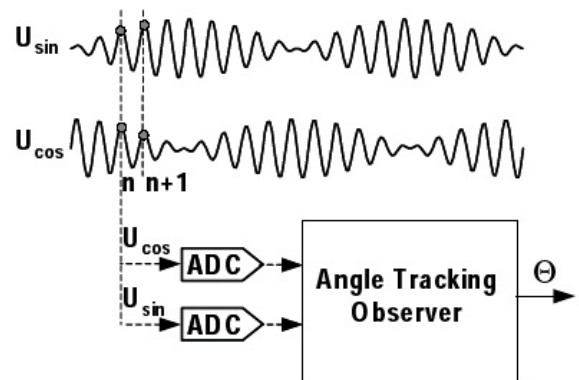
Poznavanje ugaone pozicije i brzine obrtanja vratila električne mašine jedan je od osnovnih zahteva neophodnih za kvalitetnu implementaciju upravljačkih algoritama u

elektromotornim pogonima. Među davačima ugaone pozicije i brzine koji se najčešće mogu sresti u elektromotornim pogonima su: tahogeneratori, enkoderi, elektromagnetni rezolveri i Holovi (*Hall*) davači. U realizaciji vektorski kontrolisanog pogona sa PMSM, na motoru se već nalazio montiran elektromagnetni rezolver pa je on iskorišćen kao davač ugaone pozicije rotora.

Postoji veliki broj komercijalno dostupnih integrisanih kola koja služe za obradu signala sa rezolvera (*resolver to digital converter*). Budući da je ostalo neiskorištenih resursa DSP, analogni signali sa rezolvera su dovedeni na A/D konvertor procesora i softverski obrađeni. Dva su pristupa ekstrakcije ugla pri tome najčešće u upotrebi:

- trigonometrijski metod ekstrakcije ugla
- ekstrakcije ugla pomoću ugaono pratećeg opserversa (*angle tracking observer*)

Obe metode zahtevaju visok nivo tačnosti merenja izlaznih rezolverskih signala  $u_{sin}$  i  $u_{cos}$ , da bi se dobila ugaona pozicija sa što manjom greškom.

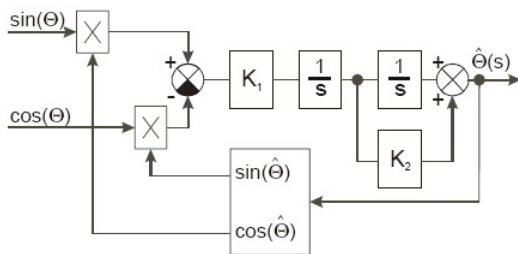


Sl. 3. Principski prikaz ugaono pratećeg opserversa

Metod za estimaciju ugaone pozicije i brzine poznat kao ugaono-prateći opservers (*angle tracking observer*) se zasniva na simultanom uzimanju odbiraka signala sa rezolvera u diskretnim vremenskim trenucima i primeni odgovarajućeg matematičkog postupka za estimaciju ugla i brzine vratila. Glavna prednost ovog algoritma je to što daje vrlo tačnu i filtriranu vrednost ugla i brzine vratila. Principijska šema ovoga postupka prikazana je na slici 3. Pobudni (modulišući) signal za rezolver, učestanosti 5 kHz, je generisan od strane procesora, dodatno uobličen i doveden na pobudni namotaj rezolvera. Da bi postupak bio uspešno realizovan, postoji nekoliko bitnih preduslova koji obavezno moraju biti ispunjeni:

- Izlazni signali sa rezolvera moraju biti odabirani u lokalnim maksimumima frekvencijom uzimanja odbiraka jednakoj frekvenciji pobudnog signala (sl. 3)
- Opseg A/D konvertora mora biti pokriven u potpunosti, tj. signali koji dolaze na ulaz za A/D konverziju moraju biti u opsegu od  $-2V$  do  $+2V$ .

Sama unutrašnja struktura ugaono pratećeg observera je prikazana na slici 4. Konstante  $K_1$  i  $K_2$  su zamenjene sa uobičajenim parametrima  $\omega_0$  i  $\zeta$ , gde je  $\omega_0$  prirodna frekvencija i  $\zeta$  faktor prigušenja. Veza između ovih parametara je:  $K_1 = \omega_0^2$ ,  $K_2 = 2\zeta/\omega_0$ . Izborom ovih parametara se utiče na dinamičke karakteristike observera tj. trajanje vremena smirenja i brzine odziva. Radi implementacije na DSP-u, prikazani model observera je diskretizovan i prilagođen aritmetici procesora.



Sl. 4. Blok šema ugaono pratećeg observera

#### 4.3. SVPWM modulator

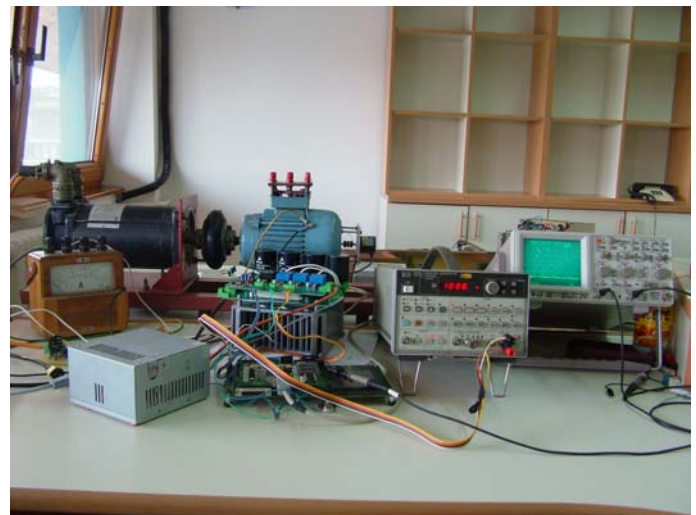
Zadatak SVPWM modulatora je da izvrši proračun faktora ispunje za pojedine IGBT tranzistore u invertoru na osnovu referentnih vrednosti napona  $V_\alpha$  i  $V_\beta$ . Kako izlazi strujnih regulatora predstavljaju potrebne vrednosti  $d$  i  $q$  komponenti napona na motoru, pre samog proračuna faktora ispunja je potrebno  $d$ - $q$  komponente napona transformisati u  $\alpha$ - $\beta$  komponente. Za ovu transformaciju je potrebno imati informaciju o ugaonoj poziciji rotora motora.

Tehnika modulacije prostornim vektorom je odavno poznata i bazira se na činjenici da je moguće ostvariti bilo koji vektor napona koji se nalazi unutar šestougla koji spaja vrhove nenultih prostornih vektora, kao kombinaciju dva najbliža nenulta vektora i nultih vektora  $V_0$  i  $V_7$ . Proračunata vremena vođenja pojedinih tranzistora se direktno upisuju u

PWM registre procesora i prosleđuju ka upravljačkim kolima invertora [4].

#### 4.4. Frekventni regulator

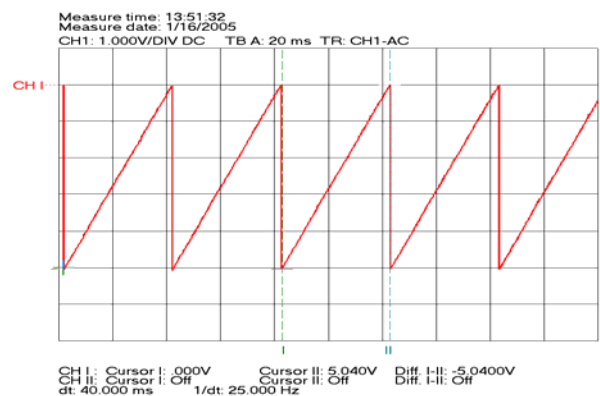
Frekventni regulator je realizovan u potpunosti od strane autora i korišten pri praktičnoj implementaciji. Sa ulazne strane je upotrebljen trofazni diodni ispravljač sa kolom za pretpunjenje kondenzatora, kao i tranzistorom za kočenje u slučaju rekuperacije. Vrednost kapacitivnosti u jednosmernom međukolu ima ukupnu vrednost  $1000\mu F$ . Trofazni inverter je realizovan pomoću tri IGBT polumostna modula (1200V, 40A) upravljana sa integrisanim upravljačkim kolima sa *bootstrap* napajanjem. Za merenje struja su upotrebljene strujne Holove sonde (LEM, prenosni odnos 1/500), sa naknadnim filtriranjem signala radi eliminacije šuma na prekidačkoj učestanosti. Izgled celoga sistema je prikazan na slici 5.



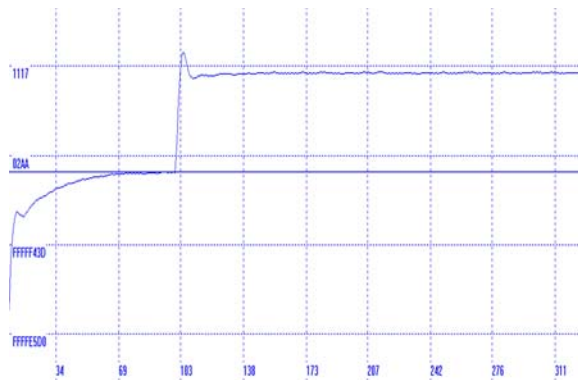
Sl. 5. Izgled ekperimentalnog pogona

## 5. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

U tabeli 1 su dati podaci motora korištenog u pogonu. Na sledećim dijagramima su prikazani eksperimentalni rezultati nastali pri sintezi vektorski regulisanog pogona sa PMSM. Na slici 6. je prikazana estimirana ugaona pozicija vratila pri brzini obrtanja od 1500 o/min, pomoću ugaono pratećeg observera. Prikazane promene vrednosti ugla odgovaraju mehaničkom uglu vratila motora, pa ih pre upotrebe u matematičkim transformacija potrebno prevesti u električnu vrednost ugla, u skladu sa brojem pari polova mašine.



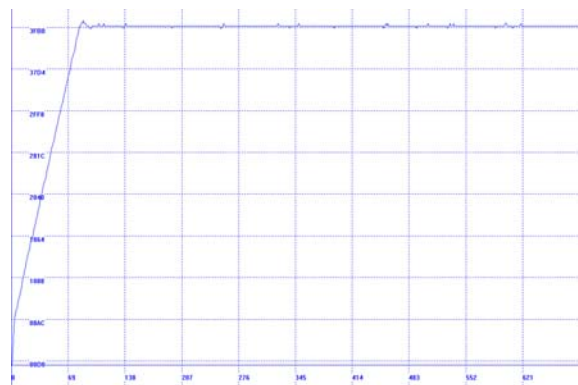
Sl. 6. Estimirana ugaona pozicija rotora



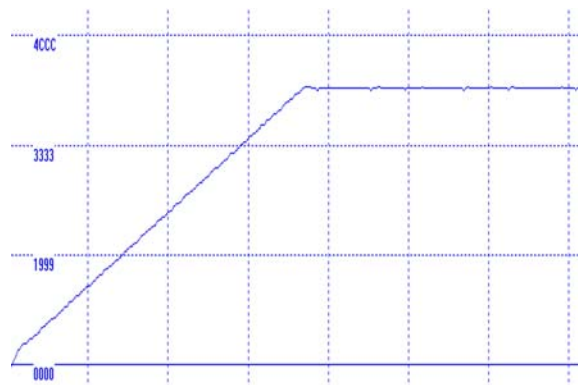
Sl. 7. Odziv regulatora struje na promenu reference

Kako je u pitanju motor sa stalnom pobudom na rotoru referentna vrednost na ulazu  $d$ -regulatora struje je nula tokom rada pogona. S druge strane važi:  $L_d \approx L_q \approx L_m$ , što vodi ka tome da će parametri  $d$  i  $q$  regulatora biti praktično isti. Pri podešavanju parametara regulatora testovi su rađeni na  $d$ -regulatoru sa malom referentnom vrednosti struje (25 - 40% nominalne) dok je referentna vrednost na ulazu  $q$ -regulatora držana na vrednosti nula. Razlog za ovo je sledeći: pri dejstvu  $q$  komponente struje motora dolazi do razvijanja momenta i obrtanja rotora motora što se manifestuje kao poremećaj i utiče na rad regulatora struje. Nakon podešavanja parametara referentne vrednosti na ulazu regulatora su postavljene u skladu sa slikom 2.

Odzivi regulatora brzine su prikazani na slikama 8 i 9 u slučajevima kada je referenca zadana skokovito i preko rampe.



Sl. 8. Odziv regulatora brzine na promenu reference



Sl.9. Odziv brzine pri referenci zadanoj preko rampe

## 6. ZAKLJUČAK

U radu je predstavljena jedna praktična realizacija vektorski upravljano pogona sa sinhronim motorom sa permanentnim magnetima. Date su teorijske postavke ovoga načina upravljanja, kao i specifičnosti koje se javljaju pri implementaciji a vezane su vrstu motora i neophodno elektronsko okruženje. Analizirani su zahtevi koji se postavljaju pred DSP pri upotrebi u regulisanim elektromotornim pogonima visokih performansi. Zbog nedostatka adekvatne opreme nije bilo moguće izvesti eksperimente pod opterećenjem, pa je to ostavljeno za naredna istraživanja.

Sama struktura vektorski regulisanog pogona sa PMSM (slika 2) deluje naizgled jednostavno, ali je za uspešnu implementaciju neophodno realizovati merenje većeg broja fizičkih veličina u realnom vremenu. Sadašnji nivo razvijenosti digitalnih procesora u potpunosti zadovoljava potrebe brze i pouzdane akvizicije i obrade signala, te ne predstavljaju kritični deo sistema. Ono što definiše kvalitet sistema je prvenstveno merna oprema upotrebljena u njegovoj realizaciji. U našem slučaju to se odnosi na obradu struja motora i signala sa rezolvera koji su analogne prirode pa su veoma podložni šumu te je neophodno vršiti njihovo filtriranje pre same obrade od strane DSP.

Tabela 1. Podaci o motoru

GETTYS		AEG	
Permanent Magnet Servo Motor			
Catalog No.	M321-SMRA-1001	Serial No.	0068-03 90
Back EMF $K_e$	51.2 V/Krpm	Tach	V/Krpm
Torque Constant $K_t$	7.5 lb-in/Amp	Sealing	IP55
Rated Current Stall	9.5 Amp		
Conn. Dia.	497-302-0037	Outline Drwg.	497-208-9999
Brake: Hz	Volts 24	Torque	90 lb-in
Gettys Corporation Racine Wisconsin, U.S.A.			MT46418-5

## LITERATURA

- [1] R. Krishnan: "Electric Motor Drives: modeling, analysis and control", *Prentice Hall, Upper Saddle River (USA)*, 2001
- [2] J.F. Moynihan, P. Kettle, A. Murray, "High performance control of AC servomotors using an integrated DSP" in *Intelligent motion, Proceedings. May, 1998*, pp. 213-222.
- [3] "Single Chip, DSP-Based High Performance Motor Controller ADMC401", *Analog Devices Inc., Norwood (USA)*, 2000
- [4] "Application Note 17: Implementing Space Vector Modulation with the ADMC401", *Analog Devices, Norwood (USA)*, 2000.

**Abstract** – This paper deals with practical implementation of a PMSM vector controlled motor drive. Demands and requirements for realization of a high performance control based on a DSP are considered. Methods for rotor angle measurement with use of an electromagnetic resolver are explained.

## PRACTICAL IMPLEMENTATION OF A VECTOR CONTROLLED MOTOR DRIVE WITH PMSM

Dražen Dujić, Darko Ostojić, Vladimir Katić,  
Borislav Jeftenić