

ANALIZA PONAŠANJA MOMENTNOG MOTORA SERVORAZVODNIKA

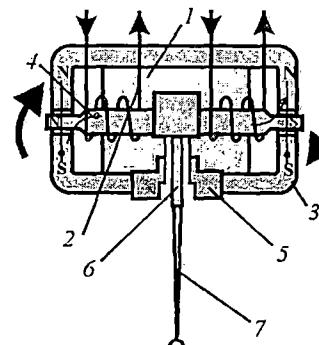
D. Gordić¹, V. Šušteršić, N. Jovičić, M. Babić

Rezime: Kod dvostepenih servorazvodnika, elektromagnetski momentni motor se koristi za pretvaranje strujnog signala male snage u odgovarajuće obrtno kretanje proporcionalno ulaznom signalu jačine struje. U radu su izvedeni izrazi za izračunavanje obrtnog momenta usled elektromagnetskih sila za različite tipove veze namotaja momentnog motora. Analizirana je i opravdanost linearizacije navedenih izraza, što je najčešći slučaj pri analizi funkcionalisanja servorazvodnika. Odredene su prelazne karakteristike ovog obrtnog momenta kod izabranog servorazvodnika za različite odskočne ulazne signale jačine struje.

Ključne reči: servorazvodnik, momentni motor

1. UVOD

Dvostepeni elektrohidraulični servorazvodnici, sa momentnim motorom kao elektromehaničkim pretvaračem i razvodnikom tipa mlaznik - odbojna pločica kao prvim stepenom hidrauličnog pojačanja, predstavljaju najviše korišćeno rešenje servorazvodnika u današnjim elektrohidrauličnim regulacionim sistemima. Momentni motori imaju male pokretnе mase i stoga visoke prirodne učestanosti i brze odzive, a u kombinaciji sa razvodnikom tipa mlaznik - odbojna pločica obezbeđuju relativno veliki odnos između izlazne (hidraulične) i ulazne (električne) snage.



Slika 1 Momentni motor
1 - permanentni magneti, 2 - namotaji za pobudu, 3 - noseći deo, 4 - kotva,
5 - elastična cevčica, 6 - odbojna pločica, 7 - opruga povratne spregе

Osnovni delovi, danas korišćenih momentnih motora, šematski su prikazani na slici 1. Kotva (4), načinjena od nekog magnetnog materijala, postavljena je u vazdušni prostor magnetnog polja permanentnih magneta (1). Dva trajna magneta se postavljaju tako da je magnetno polje najintenzivnije u vazdušnom prostoru između kotve i polova (S i N) tih magneta. Magnetno polje permanentnog magneta ne izaziva obrtni moment na kotvi. U zavisnosti od karakteristika izvora napajanja električne energije i upravljačke elektronike, namotaji za pobudu (2), postavljeni sa obe strane kotve, mogu biti vezani: redno, paralelno i kombinovano, a moguće je i njihovo pojedinačno korišćenje. Pri proticanju struje kroz namotaje, kotva se magnetiše, stvara se obrtni moment i sklop kotve (koga čine kotva i kruto vezana odbojna pločica (6), koja funkcionalno pripada prvom stepenu hidrauličnog pojačanja) se zakreće. Po isključenju struje, moment na kotvi usled

¹ Docent dr Dušan Gordić, dipl. inž. maš., asistent mr Vanja Šušteršić, dipl. inž. docent dr Nebojša Jovičić, dipl. inž. maš. i prof. dr Milutin Babić, dipl. inž. maš. Mašinski fakultet, 34000 Kragujevac, Sestre Janjić 6, email: gordic@knez.uis.kg.ac.yu

elektromagnetskih sila pada na nulu i elastična tankozidna cevčica (5), na koju je sklop kotve oslonjen, vraća kotvu u početni položaj. Kod servorazvodnika sa mehaničkom povratnom spregom, za odbojnu pločicu je kruto vezana opruga povratne sprege (7).

2. IZVOĐENJE IZRAZA ZA IZRAČUNAVANJE OBRTNOG MOMENTA

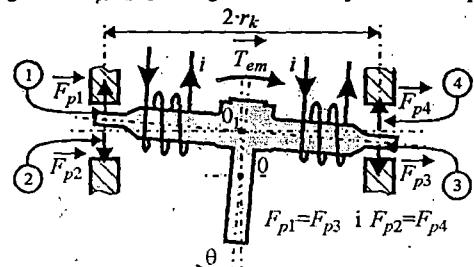
Da bi se došlo do izraza za obrtni moment usled dejstva elektromagnetskih sila - T_{em} [N·m], potrebno je odrediti elektromagnetske sile kojima magnetsko polje dejstvuje na kotvu u sva četiri vazdušna procepa - F_{pi} [N] (slika 2). Pošto je ugao zakretanja kotve - θ [rad], manji od 1° [2], za izračunavanje F_{pi} može se koristiti izraz za elektromagnetsku силу između dve paralelne namagnetisane površine [1]:

$$F_{pi} = \frac{B_{pi}^2 \cdot A_p}{2 \cdot \mu_0}, \quad (1)$$

gde su: B_{pi} [T] - magnetna indukcija u i -tom procepu, A_p [m^2] - površina preseka procepa

upravna na linije magnetske indukcije (ista za sva četiri procepa), $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$ [H/m] - magnetna permeabilnost vazduha tj. vakuuma.

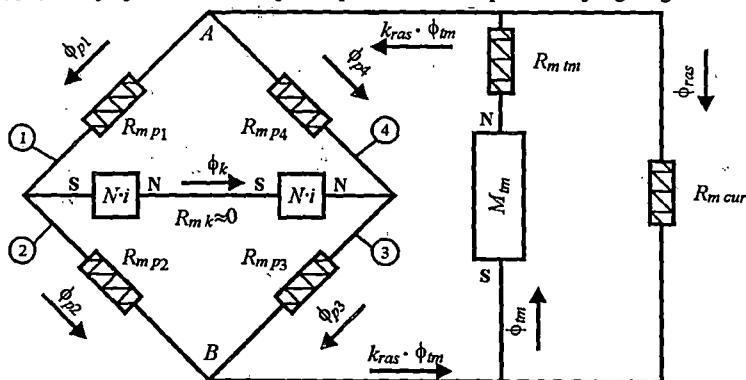
Pošto je magnetna indukcija u i -tom vazdušnom procepu količnik odgovarajućeg magnetskog fluksa ϕ_{pi} [Wb] i površine A_p , i pošto su elektromagnetske sile, tj. magnetski fluksevi, u procepcima 1 i 3, odnosno 2 i 4 (slika 2), jednaki [2], koristeći izraz (1) za T_{em} se može pisati:



Slika 2 Šema momentnog motora za izvođenje T_{em}

$$T_{em} = \frac{\phi_{p1}^2 - \phi_{p2}^2}{\mu_0 \cdot A_p} \cdot r_k, \quad (2)$$

gde je r_k [m] rastojanje od ose simetrije sklopa kotve do ose polova trajnog magneta.



Slika 3 Šematski prikaz magnetcnog kola momentnog motora

Magnetna otpornost (reluktans) magnetskog materijala sklopa kotve - R_{mk} [H $^{-1}$], u poređenju sa reluktansom magnetskog materijala trajnog magneta - R_{mtm} [H $^{-1}$] i reluktansama sva četiri

vazdušna procepa - R_{mp1} [H $^{-1}$], može se zanemariti, jer je permeabilnost nekog magnetskog materijala sklopa kotve mnogo veća od permeabilnosti tvrdog magnetskog materijala trajnog magneta i vazduha [1], [2]. Stoga se magnetsko kolo momentnog motora, za slučaj npr. redne veze namotaja, može šematski prikazati kao na slici 3.

Za reluktansne vazdušnih procepa se može pisati [2]:

$$R_{mp1} = R_{mp3} = R_{mp0} \cdot \left(1 - \frac{r_k \cdot \theta}{x_{p0}} \right), \text{ odnosno } R_{mp2} = R_{mp4} = R_{mp0} \cdot \left(1 + \frac{r_k \cdot \theta}{x_{p0}} \right), \quad (3)$$

gde je x_{p0} [m] dužina vazdušnih procepa u ravnotežnom (nultom) položaju i R_{mp0} [H $^{-1}$] reluktansa vazdušnog procepa u ravnotežnom (nultom) položaju, koja se računa po izrazu:

$$R_{mp0} = x_{p0} / (\mu_0 \cdot A_p). \quad (4)$$

Reluktansa trajnog magneta R_{mtm} [H $^{-1}$] se može računati po izrazu [3]:

$$R_{mtm} = l_{tm} / (A_{tm} \cdot \mu_{tm}) \cdot (1/k_{mp}), \quad (5)$$

gde su: A_{tm} [m^2] - površina poprečnog preseka trajnog magneta, l_{tm} [m] - dužina trajnog magneta, μ_{tm} [H/m] - magnetna permeabilnost materijala trajnog magneta i k_{mp} [-] - konstanta koja uzima u obzir neravnomernost jačine polja po zapremini trajnog magneta i smanjenje jačine magnetskog polja u trajnom magnetu koje izazivaju njegovi polovi.

Ako se sa B_{rtm} [T] označi remanentna magnetna indukcija trajnog magneta, onda se za magnetopobudnu silu - M_{tm} [A] može pisati [3]:

$$M_{tm} = (l_{tm} \cdot B_{rtm}) / \mu_{tm} \cdot (1/k_{mp}). \quad (6)$$

Iz uslova prvog Kirhofovog zakona za magnetna kola [1], po kome je u mestu grananja kola algebarski zbir magnetskih flukseva uvek jednak nuli, za mesta grananja A i B (slika 2,3), može se pisati:

$$k_{ras} \cdot \phi_{tm} = \phi_{p1} + \phi_{p4} = \phi_{p2} + \phi_{p3}, \quad (7)$$

gde su: ϕ_{tm} [Wb] - magnetski flukus u trajnom magnetu i k_{ras} [-] - konstanta koja uzima u obzir rasipanje fluksa u vazdušnom procepu. Konstanta k_{ras} fizički predstavlja deo površine pola trajnog magneta, kroz koju prolaze linije magnetskog fluksa vazdušnog procepa.

Koristeći uslov drugog Kirhofovog zakona za magnetna kola [1], da magnetopobudna sila duž svake zatvorene konture magnetskog fluksa mora da bude jednaka nuli, mogu se, posmatrajući sliku 3, pisati sledeće jednačine za dve različite konture magnetskog fluksa:

$$M_{tm} - R_{mtm} \cdot \phi_{tm} = R_{mp1} \cdot \phi_{p1} - 2 \cdot N \cdot i + R_{mp3} \cdot \phi_{p3} = 2 \cdot R_{mp1} \cdot \phi_{p1} - 2 \cdot N \cdot i, \quad (8)$$

$$M_{tm} - R_{mtm} \cdot \phi_{tm} = R_{mp4} \cdot \phi_{p4} + 2 \cdot N \cdot i + R_{mp2} \cdot \phi_{p2} = 2 \cdot R_{mp4} \cdot \phi_{p4} + 2 \cdot N \cdot i, \quad (9)$$

gde je N [-] - broj navojaka u svakom namotaju momentnog motora i i [A] - jačina struje.

Rešavanjem sistema jednačina datog izrazima (7)+(9), po nepoznatim magnetskim fluksevima, uz zamenu izraza (3) za reluktansne vazdušnih procepa i uvedenjem pojma konstante magnetske reluktanse k_{mre} [-], koja je definisana izrazom:

$$k_{mre} = R_{mtm} / R_{mp0} \cdot (1/k_{ras}), \quad (10)$$

dobijaju se izrazi za magnetske flukseve u vazdušnim procepcima za slučaj redne veze namotaja [2]. Sličnim postupkom bi se mogli dobiti i izrazi za navedene magnetske flukseve, za slučaj paralelne ili kombinovane veze. Zamenom izraza za magnetske flukseve za različite veze namotaja u izraz (1), dobija se generalizovan, konačni izraz za moment T_{em} :

$$T_{em} = \frac{r_k \cdot \mu_0 \cdot A_p \cdot [M_{tm} \cdot (r_k \cdot \theta / x_{p0}) + k_{vn} \cdot N \cdot (1 + k_{mre}) \cdot i^*] \cdot (M_{tm} + k_{vn} \cdot N \cdot (r_k \cdot \theta / x_{p0}) \cdot i^*)}{x_{p0}^2 \cdot [1 - (r_k \cdot \theta / x_{p0})^2 + k_{mre}]^2} \quad (11)$$

gde je sa k_{vn} [-] označen koeficijent tipa veze namotaja; $k_{vn}=1$ za paralelnu i $k_{vn}=2$ za rednu i diferencijalnu vezu namotaja, i sa i^* [A] ukupna jačina struje i (paralelna i serijska veza) ili razlika jačine struja u namotajima Δi (diferencijalna veza namotaja).

3. ANALIZA TAČNOSTI IZRAZA ZA T_{em} I OPRAVDANOST LINEARIZACIJE

U najvećem broju radova u kojima se analizira ponašanje servorazvodnika, za izračunavanje obrtnog momenta T_{em} koristi se linearna jednačina oblika:

$$T_{em} = K_i \cdot i^* + K_m \cdot \theta, \quad (12)$$

gde su: K_i [N·m/A] - "glavno" pojačanje momentnog motora, K_m [N·m/rad] - krutost momentnog motora. Vrednosti parametara K_i i K_m zavise od veze namotaja. Najčešće se određuju eksperimentalno, a mogu se odrediti i teorijski.

Linearizacijom izraza (12) oko ravnotežnog položaja ($i^*=0$ i $\theta=0$), dobija se:

$$K_i = \frac{k_{vn} \cdot N \cdot r_k \cdot \mu_0 \cdot A_p \cdot M_{tm}}{x_p^2 \cdot (1+k_{mre})} \text{ i } K_m = \frac{r_k^2 \cdot \mu_0 \cdot A_p \cdot M_{tm}^2}{x_p^3 \cdot (1+k_{mre})^2}. \quad (13)$$

U poređenju sa izrazima za teorijsko određivanje K_i i K_m koji se mogu naći u literaturi [4], [5], izrazi (13) u imenocu sadrže dodatni član koji zavisi od konstante magnetne reluktanse k_{mre} . Vrednost k_{mre} zavisi od materijala trajnog magneta i geometrije momentnog motora, pa je vrlo teško utvrditi granice u kojima leže moguće vrednosti ovog koeficijenta. Korišćenjem dostupnih podataka neophodnih za izračunavanje k_{mre} , utvrđeno je da ovaj parametar uzima vrednosti iz relativno širokog intervala: oko 0,46 za momentne motore servorazvodnika serije B - "Prva Petoletka Trstenik", tj. 0,7±2 za momentne motore opisane u radu [3]. Kod momentnih motora servorazvodnika serije B - "PPT", vrednost K_i računata izrazom (13) iznosi 1,17 N·m/A, što je 68,25 % vrednosti K_i računate pomenutim literaturnim izrazom, tj. vrednost K_m računata izrazom (13) iznosi 5,18 N·m/rad, što je 46,59 % vrednosti K_m računate pomenutim izrazom bez k_{mre} . Pri tome se navedene vrednosti za K_i i K_m poklapaju sa eksperimentalnim vrednostima koje daje proizvođač [2].

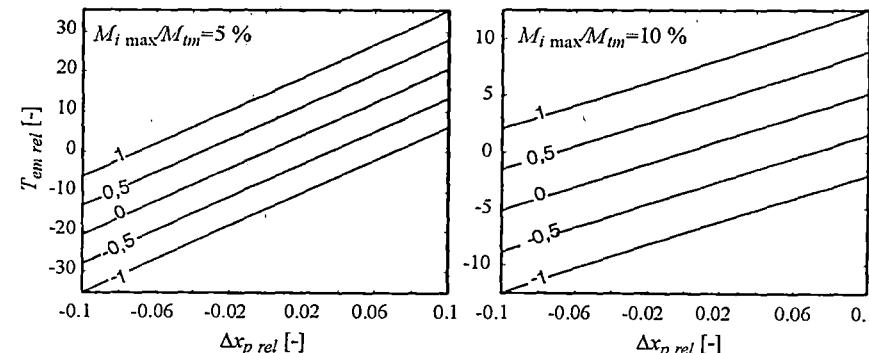
Sa druge strane, postavlja se pitanje opravdanosti linearizacije izraza (11). Za sprovođenje analize opravdanosti linearizacije izraza za obrtni moment usled elektromagnetskih sila, potrebno je odrediti granične vrednosti fizičkih veličina i parametara koji učestvuju u izrazu (11). Da se ne bi narušila "stabilnost" trajnog magneta, tj. da se značajno ne pomeri njegova radna tačka zbog dejstva magnetnog polja koje formira struja kroz namotaje [4], momentni motori se projektuju tako da maksimalna vrednost magnetopobudne sile koju stvara struja u namotajima $M_{i\max} = k_{vn} \cdot N \cdot i_{\max}$, bude znatno manja od magnetopobudne sile trajnog magneta M_{tm} . Sistematsicijom literaturnih podataka za različite momentne motore, može se zaključiti da se vrednosti odnosa $M_{i\max}/M_{tm}$ kreću u intervalu 5 – 10 %. Maksimalna teorijska vrednost relativne promene dužine procepa $\Delta x_{p\ rel} = r_k \cdot \theta/x_p$ je jednaka jedinici, ali se ta vrednost nikada ne ostvaruje zbog značajnog narušavanja linearnosti obrtnog momenta. Vrednost $\Delta x_{p\ rel}$ je određena geometrijom prvog stepena hidrauličnog pojačanja i krutostima elastične cevčice i odbojne pločice [2]. Zato je njenu maksimalnu vrednost relativno teško utvrditi, ali može se proceniti da se maksimalne vrednosti relativne promene dužine procepa, računate za slučaj maksimalnog ugla zakretanja koteve (kada odbojna pločica dodiruje jedan od mlažnika), kreću oko 1/3 [4]. Treba naglasiti i da su u najčešćim mogućim stacionarnim radnim režimima momentnih motora dvostepenih servorazvodnika sa mehaničkom povratnom spregom, pomeranja vrha odbojne pločice znatno manja od ravnotežnog odstojanja odbojne pločice. Zato je maksimalna vrednost $\Delta x_{p\ rel}$ u stacionarnim

radnim režimima ovakvih momentnih motora mnogo manja od navedenih 33% i za momentne motore servorazvodnika tipa B – PPT, ne bi trebalo da bude veća od 10 %. [2].

Za izabrane dve karakteristične vrednosti odnosa $M_{i\max}/M_{tm}$ od 5 % i 10 % i očekivanu graničnu vrednost $\Delta x_{p\ rel} = 10 \%$, dijagramski su predstavljene zavisnosti relativne vrednosti obrtnog momenta usled elektromagnetskih sila $T_{em\ rel}$, definisanog izrazom:

$$T_{em\ rel} = \frac{[(1+k_{mre}) \cdot i_{rel} + (M_{tm}/M_{i\max}) \cdot \Delta x_{p\ rel}] \cdot [(M_{tm}/M_{i\max}) + i_{rel} \cdot \Delta x_{p\ rel}]}{(1-\Delta x_{p\ rel}^2 + k_{mre})^2}, \quad (14)$$

od $\Delta x_{p\ rel}$ i relativne vrednosti jačine struje $i_{rel} = i^*/i_{\max}$ (slika 4). Sa slike se može zapaziti da je zavisnost prilično linearna, pa bi se moglo zaključiti da je upotreba linearizovanog izraza za obrtni moment T_{em} (12) opravdana. Prikazani rezultati su dobiveni za koeficijent magnetne reluktanse $k_{mre}=0,46$. Dijagrami sa slike 4 imaju iste kvalitativne tendove za druge vrednosti k_{mre} . Zbog ograničenja obima rada, samo su tabelarno prikazane maksimalne vrednosti odstupanja linearog od nelinearnog modela (tabela 1), odakle se generalno može zaključiti, da je upotreba linearnog izraza (12) opravdana u stacionarnim režimima rada servorazvodnika sa mehaničkom povratnom spregom.



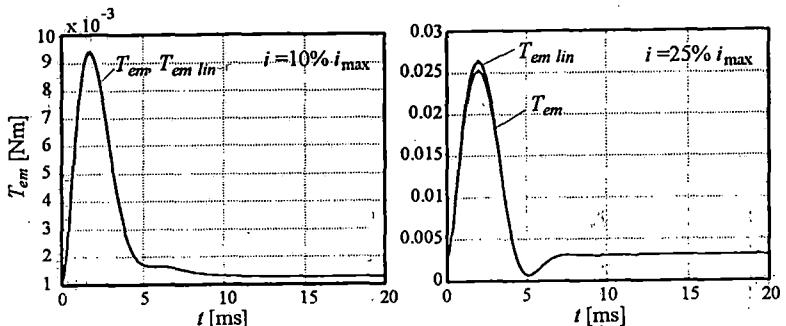
Slika 4 Dijagramska zavisnost $T_{em\ rel}$ ($\Delta x_{p\ rel}$) za različite vrednosti i_{rel}

k_{mre} [-]	0,1	0,4	0,5	1	1,5	2
$M_{i\max}/M_{tm}$ [%]	5	10	5	10	5	10
odstupanje [%]	2,3	2,78	1,91	2,4	1,82	2,31

Tabela 1 Maksimalna odstupanja linearnog od nelinearnog modela za različite vrednosti k_{mre} i odnosa $M_{i\max}/M_{tm}$ i graničnu vrednost $\Delta x_{p\ rel} = 10 \%$

Da bi se analizirala opravdanost linearizacije izraza za T_{em} u nestacionarnim režimima, numerički su modelirani i vremenski odzivi servorazvodnika B.31.210.12.1000.U2V proizvođača PPT, za ulazni signal tipa odskočne funkcije, iz stacionarnog stanja određenog jačinom struje $i=0$, u stacionarno stanje određeno jačinom struje i (paralelna veza namotaja). Analizi su vršene korišćenjem eksperimentalno potvrđenog matematičkog modela [2], za dve karakteristične vrednosti signala jačine struje i - 10% i 25% od nazivnog signala jačine struje i_{\max} . Na slici 5 su uporedo prikazane vremenske promene momenta T_{em} računatog izrazom (11) i momenta $T_{em\ lin}$ računatog izrazom (12). Za niži nivo ulaznog signala, u celokupnom prelaznom procesu, praktično nema razlike između momenata T_{em} i $T_{em\ lin}$. Neznatna razlika se zapaža kod

višeg nivoa ulaznog signala, za relativno velike uglove zakretanja kotve. Može se ipak zaključiti, da je u posmatranim režimima, izraz (12) dovoljno tačan za izračunavanje T_{em} . Za nestacionarne režime sa rapidnijim promenama ulaznog signala, trebalo bi u analizama koristiti nelinearni izraz (11).



Slika 5 Vremenske promene T_{em} za odskočni ulazni signal jačine struje i

4. ZAKLJUČAK

Elektromagnetični zakretni momentni motor, kao elektromehanički pretvarač, koristi se kod dvostepenih elektrohidrauličnih servorazvodnika za pretvaranje strujnog signala male snage u odgovarajuće obrtno kretanje, proporcionalno ulaznom signalu jačine struje. U radu je prikazan jedinstven izraz za izračunavanje obrtnog momenta usled elektromagnetskih sila za različite tipove veze namotaja momentnog motora. Računanje obrtnog momenta korišćenjem navedenog izraza daje rezultate koji su u skladu sa eksperimentalnim. Pokazano je i da je linearizacija navedenog izraza u najčešćem broju mogućih radnih režima opravdana, što je i najčešći slučaj pri analizi funkcionisanja servorazvodnika.

LITERATURA

- [1] Surutka J. "Elektromagnetika", Građevinska knjiga, Beograd, 1971.
- [2] Gordić, D. "Analiza dvostepenih elektrohidrauličnih servoventila sa povratnom spregom po položaju klipa", Doktorska disertacija, Univerzitet u Kragujevcu, 2002.
- [3] Urata, E. "Study of Magnetic Circuits for Servovalve Torque Motors", Bath Workshop on Power Transmission and Control (PTMC'00), Bath, UK, pp. 269-282., 2000.
- [4] Merritt, H. "Hydraulic Control Systems", John Wiley & Sons, New York, 1967.
- [5] van Schothorst, G. "Modeling of Long-Stroke Hydraulic Servo-Systems for Flight Simulator Motion Control and System Design", PhD thesis, TU Delft, Netherlands, 1997.

ANALYSIS OF SERVOVALVE TORQUE MOTOR BEHAVIOR

Abstract: Two-stage servovalves use electromagnetic torque motors for the transformation of low energy current signal into appropriate angular displacement proportional to the signal. In this paper, the equation for the calculation of the torque caused by electromagnetic forces was derived. Justification of linearization of the equation is studied because this is the most common case in servovalve analyses. The torque transient characteristics of one selected servovalve for different step input current signals were also shown.

Key Words: Servovalves, Torque Motors