VISOKO-DINAMIČNA HIDRAVLIČNA LINEARNA OS KRMILJENA Z DIGITALNIM PIEZO VENTILOM

Marko ŠIMIC, Niko HERAKOVIČ Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, LASIM

POVZETEK

Prispevek predstavlja visoko-dinamično hidravlično linearno os, ki je krmiljena z digitalnim piezo ventilom in ima integriran nov merilnik pomika direktno v hidravlični valj. Visoko dinamiko ventila dosežemo z uporabo piezo aktuatorjev, optimizacije oblike krmilnega bata in ohišja ventila, ustrezno krmilno elektroniko in algoritmom za pozicijsko regulacijo batnice valja kakor tudi z novim zaznavalom senzorja pomika, ki je integriran v ohišje hidravličnega valja in batnico na kateri je kodni zapis. Poleg hitrega odziva linearne osi dosegamo tudi visoko ločljivost pomika do 1 mikro meter. V prispevku so predstavljene glavne komponente sistema, krmilna metoda in delovanje sistema. Na koncu so prikazani eksperimentalni rezultati odziva sistema in pozicijske ločljivosti batnice hidravličnega valja.

1. UVOD

Danes vse večji izziv predstavljajo napredne aplikacije v proizvodnih procesih, ki zahtevajo od sistemov hiter odziv, visoko pozicijsko ločljivost in nizko porabe električne energije [1], [2]. Rešitev za doseganje teh zahtev se kaže v visokodinamičnih linearnih pogonih krmiljenih s piezo ventili v kombinaciji z naprednimi senzorji in krmilnimi algoritmi [3], [4].

Za zgoraj omenjene aplikacije se še vedno uporabljajo hidravlični pogoni krmiljeni z visokoodzivnimi servo ventili. Dinamične karakteristike so zaradi omejitev mehanske konstrukcije in uporabe konvencionalnih aktuatorjev (linearnih motorjev pri proporcionalnih ali momentnih motorjev pri servo ventilih) omejene na frekvence do 200 Hz [5], [6]. Optimizacijske metode in razvoj novih ventilov so zato osredotočene na razvoj novih komponent krmilnih ventilov kot so geometrijska optimizacija krmilnih batov ventilov v smislu zmanjšanja vztrajnostnih sil in tokovnih sil fluida [7], [8], [9], [10] in [11]. Nadalje lahko konvencionalne aktuatorje nadomestimo naprednimi piezo aktuatorji kar poveča dinamiko ventilov na približno 600 Hz (pri faznem zamiku 90°) oz. se odziv ventila izboljša iz 5 ms na manj od 1 ms [12], [13].

V svetu se zato razvija novo področje digitalne hidravlike in digitalnih ventilov kot alternativa visoko-dinamičnim servo ventilom [14]. Za krmiljenje digitalnih ventilov se običajno uporablja pulzno številčna (*PNM*) in pulzno širinska (*PWM*) modulacija [15]. Z razvojem novih krmilnih batov iz naprednih materialov, uporabe piezo aktuatorjev in napredne krmilne elektronike ter krmilnih metod so digitalni hidravlični ventili postali mnogo bolj uporabni, tudi za visoko-dinamične hidravlične linearne pogone [16], [17].

2. VISOKO-DINAMIČNA HIDRAVLIČNA LINEARNA OS

Visoko-dinamična hidravlična linearna os je sestavljena iz 3 novih podsistemov:

- Hidravlični valj, ki sestavljata dve novi komponenti (batnica s kodnim zapisom in senzor pomika batnice vgrajen v glavo hidravličnega valja).
- Digitalnim hidravličnim piezo ventil sestavljen iz 4 preklopnih ventilov krmiljenih s piezo aktuatorji.
- Krmilno elektroniko in krmilni algoritem za izvajanje pozicijske regulacije batnice hidravličnega valja.

Shemo pozicijske regulacije batnice hidravličnega valja s pripadajočimi podsistemi prikazuje slika 1.

Posvet AVTOMATIZACIJA STREGE IN MONTAŽE 2017 – ASM '17



Slika 1:Shema visoko-dinamične hidravlične linearne osi krmiljene z digitalnimi piezo ventilom.

Za pozicijsko regulacijo batnice hidravličnega valja uporabljamo računalnik (kreiranje referenčne, želene vrednosti pomika), na novo razvito krmilno elektroniko (pozicija 4 na sliki 1, za generiranje ustreznih krmilnih signalov PWM za digitalni ventil), digitalno enoto oz. digitalni piezo ventil (pozicija 3 na sliki 1), hidravlični valj Z integriranim senzorjem pomika LinACE (pozicija 1,2 na sliki 1) ter zunanjim merilnikom pomika visoke ločljivosti Renishaw za zajem in analizo pomika. Regulacija se izvaja z uporabo integriranega senzorja pomika LinACE. Servo ventil 4/3, prikazan na sliki 1, smo zamenjali z digitalnim hidravličnim piezo ventilom. Funkcionalnost 4/3 batnega drsniškega servo ventila (stanja P-A, B-T in P-B, A-T) smo zagotovili S štirimi visoko-dinamičnimi preklopnimi sedežnimi ventili krmiljeni s piezo aktuatorji. Tako en preklopni ventil nadomešča en krmilni rob konvencionalnega 4/3 batnega drsniškega ventila. Hidravlični piezo ventil je podrobneje predstavljen v nadaljevanju kot tudi ostale pomembne komponente sistema.

2.1. Hidravlični valj

Podjetje RLS (Rotary and linear motion sensors) razvija novo generacijo merilnikov pomika *LinACE TM*, ki jih lahko vgradimo v hidravlične valje [18]. Merilnik je sestavljen iz batnice in zaznavala kot je prikazano na sliki 2.



Posebnost predstavlja batnica (prikazana na sliki 1 kot pozicija 1) na kateri je kodni zapis kot je prikazan na sliki 3 [18]. Zapis na batnici predstavlja zareze polnjene z materialom nizke permeabilnosti (krom, baker). Drug možen način zapisa kode na batnico je izdelava kode z laserskim žarkom. Na ta način izdelamo področja nizke permeabilnosti, ki so rezultat lokalne strukturne spremembe zaradi toplotne obdelave – NOVA TEHNOLOGIJA. Glavni problem pri tem predstavlja zagotavljanje toleranc batnice po obdelavi z laserjem. Zaostale notranje napetosti zaradi visoke koncentracije vnosa energije laserskega žarka povzroča ukrivljenost batnice in s tem odstopanja od toleranc.



Slika 3: Hidravlični valj z integriranim senzorjem pomika batnice.

Nadalje ta kodni zapis prepoznavamo z optičnim senzorjem *LinACE TM* (pozicija 2 na sliki 1) sestavljenim iz velikega števila Hall senzorjev postavljenih v vrsto (slika 4).



Slika 4: Branje kodnega zapisa s Hall senzorji.

Hall senzorji zaznavajo majhna odstopanja magnetnega polja kot prikazuje slika 5. Hall senzorji delujejo po dveh principih: bipolarno delovanje omogoča zaznavanje majhnih magnetnih polj, medtem ko unipolarno delovanje zaznava spremembe magnetnega polja permanentnega magneta zaradi vpliva bližine kovinskih predmetov.



Slika 5: Magnetno polje v območju kodnega zapisa na batnici.

Kot rezultat zaznavanja sprememb magnetnega polja dobimo nov kodni zapis primeren za nadaljnjo obdelavo (slika 6).



Slika 6: Kodni zapis kot posledica zaznavanja magnetnega polja s Hall senzorji.

Na novo razvite komponente merilnika pomika smo vgradili v hidravlični valj kot prikazuje slika 7. Batnica s kodnim zapisom je dejansko batnica hidravličnega valja (pozicija 1 na sliki 7) medtem ko je senzor vgrajen v glavo hidravličnega valja (pozicija 2 na sliki 7). Merilnik predstavlja absolutni merilnik pomika, ki je izredno robusten, omogoča delovanje do hitrosti 5 m/s (pomik batnice) in zagotavlja ločljivost do 0,5 mikro metra.



Slika 7: Hidravlični valj z integriranim merilnikom pomika.

2.2. Digitalni hidravlični piezo ventil

Eno od glavnih komponent hidravlične linearno osi predstavlja digitalni hidravlični piezo ventil. Kaj pomeni digitalni ventil v hidravliki lahko pojasnimo s sliko 8. Vsak preklopni ventil lahko dosega več diskretnih stanja zato ga lahko obravnavamo kot več vzporedno vezanih preklopnih ventilov. Ti so lahko enake velikosti ali različne. V našem primeru velikost odprtja ventila in s tem diskretna stanja izhodne veličine dosegamo poljubno. Z enim preklopnim ventilom v prvi fazi lahko dosežemo tri diskretna stanja pri vklopu posameznih piezo elementov PE v enem aktuatorju ventila (PNM metoda). Nadalje lahko s PWM metodo dosegamo še vmesna diskretna stanja. Ravno to dejstvo, da uporabimo en preklopni ventil v kombinaciji z naprednim piezo aktuatorjem, ki ga lahko krmilimo z več diskretnimi stanji je ena od prednosti v primerjavi digitalnimi hidravličnimi ventili z ko za doseganje večih diskretnih izhodnih veličin potrebujemo veliko število preklopnih ventilov.



Slika 8: Digitalni hidravlični ventili.

Digitalni hidravlični piezo ventil je sestavljen iz 4 preklopnih ventilov (V1 do V4 prikazan na sliki 9) krmiljenih s piezo aktuatorji (slika 9). Hiter odziv ventila je dosežen zaradi optimizacije oblike krmilnega bata in ohišja ventila, kjer smo tokovne sile fluida zmanjšali za okrog 30%. Na ta način smo dosegli tudi bolj stabilno delovanje. Piezo aktuator je sestavljen iz treh piezo elementov, ki so vgrajeni v primerno ohišje za zagotavljanje ustreznega prednapetja in možnost vgradnje v ventilski blok. Maksimalni pomik aktuatorjev znaša 75 mikronov kar določa pretok skozi en preklopni ventil približno Q = 20 l/min pri tlačni razliki 35 bar. Odzivnost ventila znaša pod 0,3 ms kar je do 15x boljše od odzivnosti konvencionalnega servo ventila (5-10 ms). Glavna prednost digitalnega hidravličnega piezo ventila se kaže v odzivnem času v celotnem območiu signalov. Bistvene razlike v času za doseganje 10% ali 100% odprtja ventila NI (razlika 0,05 ms). Vemo, da je odzivni čas servo ventila močno odvisen od velikosti odprtja ventila. V območju malih signalov (do 10%) ima servo ventil dobro dinamiko, medtem ko se pri večjih signali dinamika ventila močno poslabša.



Slika 9: Digitalni hidravlični piezventil - zgradba.

2.2. Krmilna elektronika in krmilni algoritem

V laboratoriju LASIM (UL, FS) smo razvili novo krmilno elektroniko za kriljenje 12 piezo elementov, ki so vgrajeni v aktuatorje digitalnega hidravličnega ventila. Piezo elementi so krmiljeni popolnoma neodvisno, kar daje sistemu visoko fleksibilnost in možnost razvoja novih krmilnih algoritmov. Krmilni sistem, shematično predstavljen na sliki 10, je sestavljen iz treh glavnih komponent: računalnik, mikrokrmilnik in ojačevalniki.

Računalnik je povezan z mikrokrmilnikom, ki krmili podsistem ojačevalnikov. Preko računalnika zajemamo signale senzorjev. Kreiramo lahko poljubne referenčne signale pozicije, izbiramo vrste krmilnih metod in parametrov (PID, PWM, PNM). V osnovi je uporabljena PID regulacija (slika 10). Željeni referenčni signal pomika primerjamo z dejansko izmerjeno vrednostjo pomika (merilnik LinACE) in dobimo napako pozicije. Nato se na podlagi pozitivne ali negativne napake (pomik premajhen, pomik prevelik) določijo aktivni in neaktivni preklopni ventili (V1 do V4). Glede na velikost napake v poziciji v nadaljnjem koraku določimo število aktivnih in neaktivnih piezo elementov aktuatorjev ventilov (PE1 do PE3) – PNM metoda. Sledi generiranje ustreznih PWM signalov nizke napetosti (3-12 V) in visoke napetosti (200 V) za aktivne piezo elemente, ki krmilijo odprtje ventila in s tem pretok ventila.



Slika 10: Shema krmilnega algoritma.



Slika 11: Generiranje PWM signalov in pretvorba v visoko-napetostni krmilni signal.

Krmilni algoritem in krmilni signali potekajo na nivoju nizko-napetostnega električnega kroga (3-12 V). Z nizkonapetostnimi signali vklapljamo preklopna stikala za povezavo visokonapetostnega električnega kroga in generiranje PWM krmilnega signala visoke napetosti (200 V), ki je potrebna za krmiljenje piezo elementov v aktuatorjih ventilov. Na primeru vklopa ventila Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, LASIM

V3 in generiranja PWM signala za 3. piezo element ventil V3 si poglejmo kako generiramo ustrezen PWM signal visoke napetosti (slika 11). Za posamezen piezo element (PE3, V3-PWM3.3) določimo vklopne in izklopne pulze PWM signala (primer: PWM3.3. \rightarrow 40% ON, 60% OFF). PWM siganl naprej pretvorimo v signal napetosti 12 V, ki je potreben za krmiljenje preklopnih stikal visoko-napetostnega ojačevalnika. Ta napetost iz omrežja pretvori v ustrezno napetost primerno za krmiljenje piezo elementov (200 V). Na ta način dobimo PWM signal PWM3.3 velikosti amplitude 200 V in lahko krmilimo piezo element PE3.3.

5. EKSPERIMENTALNI PREIZKUSI

V sklopu eksperimentalnih preizkusov smo primerjali krmiljenje hidravlične linearne osi krmiljene s konvencionalnim proporcionalnim ventilom in novim digitalni piezo ventilom. Izvedli smo dva testa. Prvi test predstavlja odziv sistema pri krmiljenju batnice hidravličnega valja ko izvedemo pomik iz začetne lege v končno želeno pozicijo (slike 12, 13 in 14). Pri tem opazujemo prehodno območje pospeševanja in zaviranja batnice hidravličnega valja. Drugi test predstavlja pozicijsko ločljivost, ki smo jo izvedli le za linearno os krmiljeno z digitalnim ventilom (sliki 15).

Slika 12 prikazuje krmiljenje batnice hidravličnega valja od začetne pozicije 0 mm do končne pozicije 40 mm. Podrobneje smo analizirali prehodna področja prikazana s sliko 13 (odziv sistema in pospeševanje) in sliko 14 (odziv sistema in zaviranje). Opazimo lahko, da je sistem krilen z digitalnim piezo ventilom bolj odziven tako pri pospeševanju kot tudi pri zaviranju batnice hidravličnega valja. Predvsem se opazi razlika pri času zakasnitve kjer sistem krmiljen z digitalnim signalom reagira hitreje (3-4 ms na sliki 13). Podobno velja pri doseganju končne pozicije batnice hidravličnega valja, kjer se pri sistemu krmiljenem s proporcionalnim ventilom pojavi prenihanje sistema in potreben je določen čas za ustalitev pozicije batnice. Pri sistemu krmiljenem z digitalnim ventilom prenihanja sistema ni zaslediti.



Slika 12: Primerjava med digitalnim piezo ventilom in konvencionalnih proporcionalnim ventilom.









Na sliki 15 je prikazan odziv sistema pri krmiljenju po korakih 1 mikro meter. Digitalna hidravlična linearna os krmiljena z digitalnim ventilom omogoča pozicijsko ločljivost do 1 mikron tako za gibanje batnice valja naprej kot tudi nazaj.



Slika 15: Ločljivost pomika batnice 1.

5. ZAKLJUČEK

Prispevek predstavlja novo hidravlično linearno os, ki je krmiljena z digitalnim piezo ventilom in novim integriranim merilnikom pomika. Dokazujemo, da so digitalni hidravlični piezo ventili v kombinaciji z ustrezno krmilno elektroniko, krmilnim algoritmom in senzoriko za izvajanje pozicijske regulacije batnice hidravličnega valia dobra alternativa za zamenjavo servo ventilov v visoko-dinamičnih hidravličnih pozicionirnih sistemih. Z uporabo novih komponent dosegamo boljše odzive hidravlične linearne osi in tudi boljšo pozicijkso ločljivost (do 1 mikron) v primerjavi konvencionalnimi servo hidravličnimi pogoni (5-8 mikronov).

Literatura

- [1] Esposito, A. Fluid Power with applications: International fifth edition. Miami University, Oxford, Ohio, Department of Manufacturing Engineering, 2000
- [2] Bower, J. Digital Fluid Control System. US Patent No. 2999482, 1961
- [3] Motohiro, K., Hitoshi I., Makoto I., Hiromu H. Fastresponse and high-precision positioning using iterative learning control. Department of Electrical and Computer Engineering, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2007
- [4] Herakovič, N. Mechatronische Systeme in der Ventilentwicklung. Int. j. autom. Austria, 2007, letn. 15, št. 1, str. 43-52
- [5] Uusi-Heikkilä J. IHA-Intelegent Hydraulics and Automation [online]. Finland: Tampere University of Tehchonolgy, [view at the time 10.10.2011]. Available on: http://www.iha.tut.fi/research/digihydraulics/
- [6] Johanes Keppler University Linz. Austria. Institute of Machine Design and Hydraulic Drives. [view at the

time 11.10.2011]. Available on: http://imh.jku.at/research/index.en.php

- [7] Institute for Fluid Power Drives and Controls (IFAS). RWTH Aachen. [view at the time 11.10.2011]. Available on: http://www.ifas.rwthaachen.de/index_e.php
- [8] Centre for Power Transmision and motion control. United Kingdom: University of Bath. [view at the time 11.10.2011]. Available on: http://www.bath.ac.uk/ptmc/research/index.html
- [9] Herakovič, N. Die Untersuchung der Nutzung des Piezoeffektes zur Ansteuerung fluidtechnischer Ventile. Der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen vorgelelegte Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften. Aachen: [N. Herakovič], 1995. IV, 152 f., ilustr
- [10] Herakovič, N. Flow-force analysis in a hydraulic sliding-spool valve. Strojarstvo, 2007, letn. 49, št. 3, str. 117-126
- [11] Herakovič, N. Zmanjševanje krmilnih sil v hidravličnih ventilih = The reduction of control forces in hydraulic valves. Ventil (Ljubl.), 2001, letn. 7, št. 4, str. 214-217
- [12] Reichert, M., Murrenhoff H. New Concepts and Design of High Response Hydraulic Valves Using Piezo-Technology. Institute for Fluid Power Drives and Controls, RWTH Aachen University, Germany, 2010
- [13] Reichert, M. Development of High-Response Piezo-Improved Performance Servovalves for of Electrohydraulic Cylinder Drives. Von der Fakultat fur Maschinenwesen Rheinisch-Westfalischen der Technischen Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation, 04.02.2010
- [14] Linjama, M., Laamanen, A. & Vilenius, M. Is it time for digital hydraulics? Proceedings of the Eighth Scandinavian International Conference on Fluid Power, May 7–9, 2003, Tampere, Finland, pp. 347– 366
- [15] Linjama, M. Energy saving digital hydraulics. In Proc. Of The Second Workshop on Digital Fluid Power, DFP' 09, stran 5-20, Linz, Avstrija, 12-13 November 2009
- [16] Uusitalo, J. P. A novel Digital Hydraulic Valve package: A fast and Small Multiphysics Design. Thesis for the degree of doctor of Science in Technology, Tampere university of technology, Publication 912, 30th of Septemeber 2010
- [17] Prof. Dr.-Ing. Hubertus Murrenhoff. Trends in Valve Development. Institute for Fluid Power Drives and Controls (IFAS), RWTH Aachen, O + P »Ölhydraulik und Pneumatik« 46 Nr. 4 (2003)
- [18] Matjaz Sivec: LinACE in-axis absolute linear encoder. RLS: Rotary and linear motion sensors.