

Stateflow alat za modeliranje elektro-hidrauličkog aktuatora

Dragan Pršić

Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu
Univerzitet u Kragujevcu
36000 Kraljevo, Srbija
prsic.d@mfkv.kg.ac.rs

Dragan Nauparac

PPT Inženjering
11 000 Beograd, Srbija
dnauparac@beotel.rs

Marko Miloš

Mašinski fakultet
Univerzitet u Beogradu
11 000 Beograd, Srbija
mmilos@mas.bg.ac.rs

Sažetak—U analizi ponašanja elektro-hidrauličkih sistema posebnu pažnju treba posvetiti tranzicijama između pojedinih režima rada. U radu se ovi prelazi posmatraju kao diskretne promene što kao rezultat daje hibridne modele. Takvi modeli zahtevaju novi pristup modeliranju i drugačije alate za simulaciju. Za fizičko modeliranje elektro-hidrauličkog aktuatora koristimo bond graf pristup uz korišćenje mehanizma prekida za modelovanje diskretnih promena. Kao izvršno okruženje za simulaciju modela koristimo Stateflow alat iz Matlab-a. Ovaj alat nam omogućava da relativno jednostavno modele iz bond grafa transformišemo u konačne automate koji podržavaju kontinualne promene stanja.

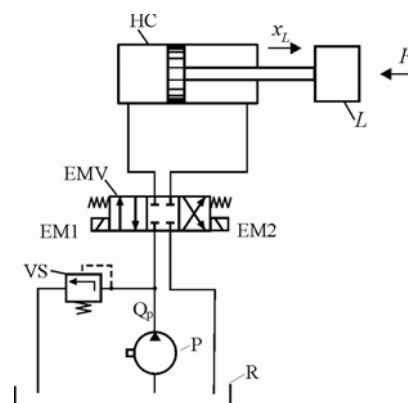
Ključne riječi—elektrohidraulički aktuator; Stateflow; bond graf; hibridni sistem; modeliranje; simulacija;

I. UVOD

Projektovanje elektro-hidrauličkog aktuatora (EHA) zahteva poznavanje odgovarajućeg matematičkog modela [1, 2]. Zbog velike složenosti takvi modeli su retko kad predmet formalne analize. Simulacija u grafičkom okruženju često predstavlja jedini način analize. Da bi se postigao kompromis između složenosti modela i njegove praktične upotrebljivosti opis sistema sadrži samo one pojave koje su od interesa za datu analizu. U ovom radu cilj nam je da modelujemo hibridno ponašanje EHA. Pod hibridnim ponašanjem podrazumevamo kombinaciju kontinualnih i diskretnih promena u dinamici EHA. Strogo uzevši EHA se može opisati i samo pomoću kontinualnih jednačina ali je takav pristup povezan sa određenim problemima. Prvo, zahteva se detaljno, vremenski zahtevno, modeliranje koje uključuje pojave koje su od manjeg značaja za analizu. Drugo, zbog velikog raspona u vrednostima vremenskih konstanti, javljaju se teškoće pri simulaciji takvih sistema [3, 4]. Umesto toga, pojave sa malim vremenskim konstantama se aproksimiraju trenutnim promenama. Tako se dolazi do skupa kontinualnih modela zajedno sa uslovima koji definišu diskretne prelaze između njih. Ovaj drugi pristup

dobija sve više na značaju jer omogućava fokusiranje na bitna dinamička svojstva i modeliranje kompletnog ponašanja sistema, ne samo pojedinačnih režima.

U radu se daje hibridni model EHA čiji je uprošćeni šematski prikaz dat na Slici 1.



Slika 1. Šematski prikaz EHA

Aktuator se koristi za pozicioniranje (x_L) opterećenja (L) podvrgnutog dejstvu spoljašnje sile (F_L). Potrebna energija dobija se od pumpe (P) koja mehaničku energiju sa vratila pretvara u hidrauličku. Na hidrocilindru (HC) se ta energija ponovo pretvara u mehaničku za vršenje rada. Prenosom energije od izvora ka potrošaču upravlja se pomoću elektromagnetnog ventila (EMV) tipa 4/3. Instalacija se od suviše velikog pritiska štiti ventilom sigurnosti (VS). Kružni tok ulja se zatvara pomoću rezervoara (R).

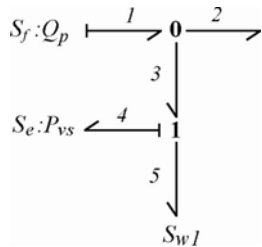
Modeli svih komponenti sistema sa Slike 1. su poznati iz literature. Ovde nam je cilj da dobijemo model celog sistema koji uključuje diskretne promene ponašanja. Za modeliranje kontinualnog ponašanja koristimo bond graf (BG)

metodologiju [5]. Klasičan BG nam omogućava da složenu, kontinualnu dinamiku nekog sistema grafički predstavimo pomoću par jednostavnih energetske koncepcata. Pošto su ovi koncepti invarijantni u različitim fizičkim domenima BG je posebno podesan za modeliranje multidomenskih sistema kao što su elektro-hidraulički. Za modeliranje diskretnih promena ponašanja koristimo prekidački mehanizam kojeg su uveli Söderman, Strömberg i Top [6].

Mada postoje softverski alati koji podržavaju direktno modeliranje u BG-u, u ovom radu kao izvršno okruženje koristimo Stateflow [7] iz paketa Matlab. Iako ovaj alat zahteva dodatni korak transformacije BG modela u dijagram stanja prelaz je relativno jednostavan i intuitivan. Zauzvrat dobija se veća sloboda u modeliranju i jača podrška u drugim alatima. Procedura se odvija u iteracijama što omogućava dodatnu analizu i razumevanje BG modela.

II. 1. MODEL ENERGETSKOG IZVORA

Model podsistema koji se sastoji od pumpe i ventila sigurnosti prikazan je na Slici 2.



Slika 2. Model podsistema Pumpa - Ventil sigurnosti

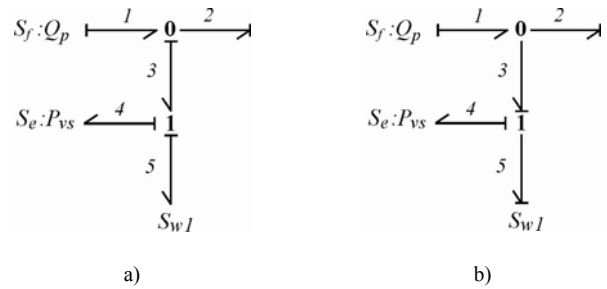
Pumpa se modeluje pomoću izvora F -tipa konstantnog ili promenljivog protoka Q_P . Dinamika ventila sigurnosti se zanemaruje (u odnosu na ostale komponente) i on se modeluje kao izvor E -tipa pritiska otvaranja P_{VS} . I Q_P i P_{VS} se posmatraju kao nezavisne veličine koje se mogu modulisati spolja. Pumpa i VS su povezani paralelno, nad istim pritiscima, pomoću 0 - veze. Za modelovanje režima rada VS (otvoren-zatvoren) koristi se mehanizam prekida S_{W1} sa kojim je redno vezan (1-veza). Veza sa spoljašnjim svetom ostvaruje se preko bonda 2. Samo bondovi 1 i 4 imaju fiksnu kauzalnost (energetski izvori). Kauzalnost ostalih bondova je promenljiva u zavisnosti od režima rada VS -a. Kada je VS otvoren model podsistema ima izgled kao na Slici 3a. Kada je zatvoren, kao na Slici 3b.

U oba slučaja podsistem ima fiksnu kauzalnost i nju prosleđuje prema spoljnjem svetu. U otvorenom režimu protok ulja ka rezervoaru je određen izrazom:

$$f_3 = f_1 - f_2 \quad (1)$$

pri čemu je:

$$f_3 = f_4 = f_5 \geq 0 \quad (2)$$



Slika 3. Kauzalni model podsistema Pumpa - Ventil sigurnosti

Tok f_1 je uvek veći od nule jer je definisan protokom pumpe i uvek je u jednom smeru. Tok f_2 definiše okruženje i može biti pozitivan (protok ka EMV -u), negativan (protok od EMV -a) ili jednak nuli (kada je EMV u neutralnom položaju).

Tranzicija: *Otvoren VS* \rightarrow *Zatvoren VS* dešava se pri:

$$f_3 = f_5 \leq 0 \quad (3)$$

U zatvorenom režimu podsistem diktira protok:

$$f_3 = 0 \quad (4)$$

pa je:

$$f_2 = Q_P \quad (5)$$

dok okruženje reaguje promenom pritiska e_2 .

Podsistem ostaje u tom režimu sve dok je:

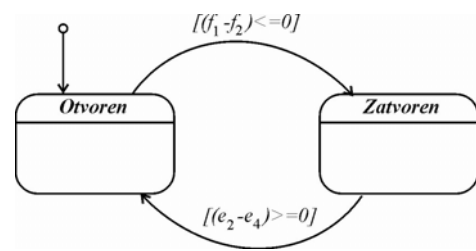
$$e_5 = e_2 - e_4 \leq 0 \quad (6)$$

Tranzicija: *Zatvoren VS* \rightarrow *Otvoren VS* dešava se pri:

$$e_5 > 0 \quad (7)$$

odnosno kada pritisak iz okruženja bude veći od pritiska otvaranja VS -a (P_{VS}).

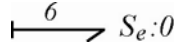
Sada je moguće napraviti Stateflow simulacioni dijagram stanja kao što je prikazano na Slici 4.



Slika 4. Dijagram stanja podsistema Pumpa - Ventil sigurnosti

Treba primetiti da tranziciju: *Otvoren VS* \rightarrow *Zatvoren VS* može da inicira samo okruženje. Sa druge strane, promena režima *Zatvoren VS* \rightarrow *Otvoren VS* može biti uzrokovana bilo promenom pritiska P_{VS} bilo promenom pritiska okruženja.

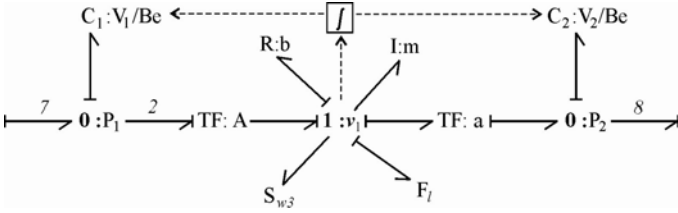
Rezervoar se može opisati kao energetski izvor E -tipa (Slika 5). Kauzalnost izvora je fiksna.



Slika 5. Model rezervoara

III. MODEL HIDRAULIČKOG CILINDRA

Model hidrauličkog cilindra zajedno sa inercijalnim opterećenjem (L) i spoljašnjom silom (F_L) prikazan je na Slici 6.



Slika 6. Model hidrauličkog cilindra sa opterećenjem

Model je preuzet iz literature [8]. U pitanju je nelinearni model koji uzima u obzir stišljivost ulja u komorama cilindra. Položaj klipa (x_L) se koristi za modulaciju radnih zapremina komora. Curenje se zanemaruje. Inercijalna svojstva pokretnih delova uzeta su u obzir preko I - akumulatora. Na klip, pored spoljašnje sile F_L , deluje i sila viskoznog trenja. Ono što je novo u prikazanom modelu to je da smo dodali mehanizam prekida S_{W3} . Naime, cilindar se može naći u jednom od dva režima povezana diskretnim promenama. Prvi režim se odnosi na jedan od dva krajnja položaja klipa određena sa:

$$x_L \leq 0 \parallel x_L \geq h \quad (8)$$

gde je h maksimalni hod klipa.

U tom režimu S_{W3} se ponaša kao nulti izvor F - tipa. Brzina klipa v_L jednaka je nuli. Razmena energije sa okruženjem ide samo preko akumulatora C_1 i C_2 . Konstitutivne relacije u ovom režimu su:

$$\dot{v}_L = 0 \quad (9a)$$

$$\dot{x}_L = v_L \quad (9b)$$

$$\dot{p}_1 = \frac{\beta}{V_1} f_3 \quad (9c)$$

$$\dot{p}_2 = -\frac{\beta}{V_2} f_4 \quad (9d)$$

Drugi režim se odnosi na neki od međupoložaja klipa za koje važi:

$$0 < x_L < h \quad (10)$$

Mehanizam prekida S_{W3} se ponaša kao izvor E - tipa a brzinu klipa određuje I akumulator koji odgovara inercijalnom opterećenju. Konstitutivne relacije u ovom režimu su:

$$\dot{p}_1 = \frac{\beta}{V_1} (f_3 - Av_L) \quad (11a)$$

$$\dot{p}_2 = \frac{\beta}{V_2} (av_L - f_4) \quad (11b)$$

$$\dot{v}_L = \frac{1}{m} (p_1A - p_2a - F_L - bv_L) \quad (11c)$$

$$\dot{x}_L = v_L \quad (11d)$$

Treba primetiti da se na modelu sa Slike 6., pri promeni režima, sinhronizovano menja kauzalnost samo dva bonda. To su bondovi koji povezuju I akumulator i mehanizam prekida S_{W3} . Svi ostali bondovi imaju nepromenljivu kauzalnost. Drugim rečima, za ovakav model HC -a, bez obzira na režim rada, okruženje na oba priključka diktira protoke (f_3, f_4) a cilindar uzvraća pritiscima ($e_3 = p_1, e_4 = p_2$).

Da bi smo nacrtali Stateflow dijagram potrebno je još da definišemo uslove prelaska iz jednog u drugi režim. U jednom od krajnjih položaja sila koja se prosleđuje S_{W3} mehanizmu određena je sa:

$$F = p_1A - p_2a - F_L - bv_L - m\dot{v}_L \quad (12a)$$

Odnosno, pošto je brzina klipa jednaka nuli:

$$F = p_1A - p_2a - F_L \quad (12b)$$

Time dobijamo uslov izlaska iz režima krajnjeg položaja:

$$p_1A - p_2a \geq F_L \quad (13)$$

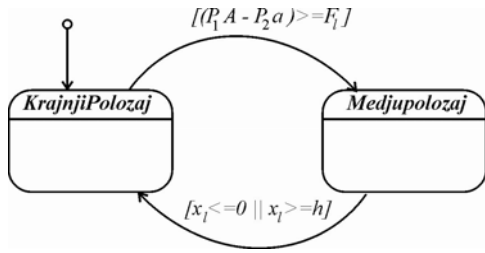
Kada je klip u nekom od međupoložaja S_{W3} se ponaša kao nulti izvor E tipa a dobija informaciju o brzini klipa od I akumulatora. Integraljenjem te brzine, uz poznate početne uslove, može se odrediti položaj klipa. Tako da uslove ulaska u režim krajnjeg položaja možemo definisati:

$$x_L \leq 0 \parallel x_L \geq h \quad (14)$$

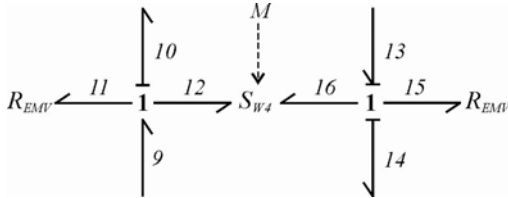
Sada mozemo nacrtati Stateflow dijagram hidrauličkog cilindra sa opterećenjem kao što je to prikazano na Slici 7.

IV. MODEL ELEKTRO-MAGNETNOG VENTILA

Model EMV-a predstavlja sponu između prethodna dva modela. Treba primetiti na osnovu modela energetskog izvora (promenljiva kauzalnost) i modela hidrauličkog cilindra (fiksna kauzalnost) da model EMV-a pored prekidačkog mehanizme (osnovna funkcija) mora da sadrži i mehanizme otpora koji će kompenzovati nesinhronizovane promene kauzalnosti na njegovim krajevima. Model EMV-a prikazan je na Slici 8.

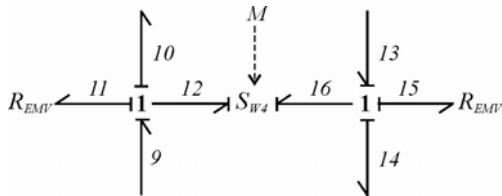


Slika 7. Stateflow model hidrauličkog cilindra sa opterećenjem



Slika 8. BG model EMV

Kroz EMV prolaze dva energetska toka. Jedan od pumpe ka cilindru a drugi od cilindra ka rezervoaru. Kao pozitivan označili smo protok koji izvlači klip cilindra, a kao negativan protok koji ga uvlači. Za modelovanje jednog od dva režima (otvoren/zatvoren) ventila koristimo mehanizam prekida (S_{W4}) koji je spolja modulisan signalom M . Oba energetska toka se sinhronizovano otvaraju ili zatvaraju. Otpori R_{EMV} modeluju gubitke. Njihova uloga je dvostruka: razdvajaju pritiske ispred i iza ventila i kompenzuju promene kauzalnosti na energetskom delu. Bondovi 10, 13 i 14 imaju fiksnu kauzalnost koju diktira cilindar i rezervoar. U zatvorenom položaju kauzalnost ventila prikazana je na Slici 9a.



Slika 9a. Kauzalnost modela EMV-a u zatvorenom položaju

Tada je:

$$f_9 = f_{10} = f_{11} = f_{12} = 0 \quad (15a)$$

i

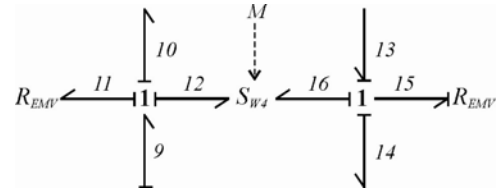
$$f_{13} = f_{14} = f_{15} = f_{16} = 0 \quad (15a)$$

Svi ovi protoci imaju konstantnu vrednost nezavisno od pritiska na priključcima ventila.

Pritisaci e_9 i e_{10} su međusobno nezavisni. Prvi je određen pritiskom otvaranja ventila sigurnosti a drugi opterećenjem na cilindru. I pritisak e_{13} je određen opterećenjem na cilindru dok

je pritisak e_{14} određen pritiskom u rezervoaru. Na osnovu kauzalnosti bonda 9 (Slika 9) i bonda 2 (Slika 3a) vidimo da zatvorenom položaju EMV-a odgovara otvoreni položaj VS-a.

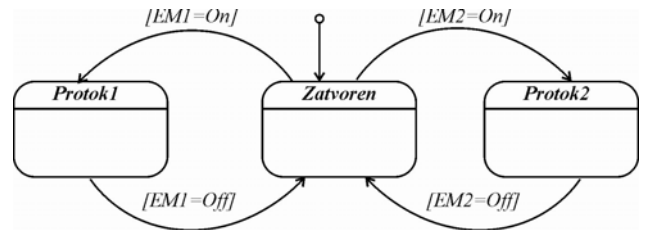
Kauzalnost modela nakon otvaranja EMV-a prikazana je na Slici 9b.



Slika 9b. Kauzalnost modela EMV-a u otvorenom položaju

Kauzalnost ostaje ista nezavisno od toga koji elektromagnet se koristi za otvaranje EMV-a. Menja se samo znak energetske veličine u modelu sa Slike 9b.

Na osnovu BG modela za radne režime zatvoren/otvoren može se nacrtati simulacioni, Stateflow model prikazan na Slici 10.

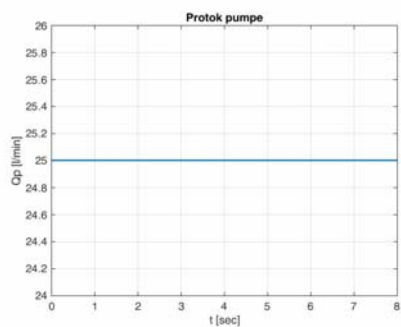


Slika 10. Stateflow model EMV-a

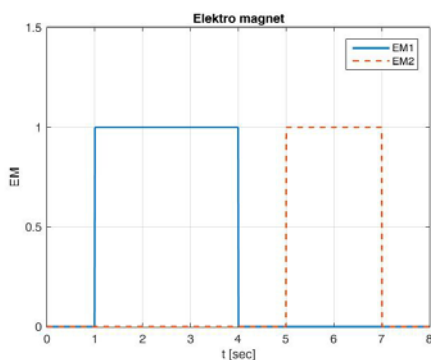
V. REZULTATI SIMULACIJE

Na osnovu modela energetskog izvora (Slika 4), hidrauličkog cilindra (Slika 7) i elektromagnetnog ventila (Slika 10) urađene su simulacije rada hibridnog modela EHA (Slika 11).

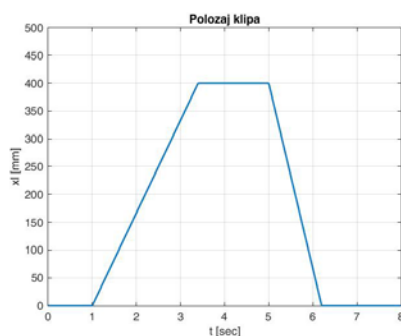
Nakon uključivanja sistema protok na izlazu iz pumpe ima konstantnu vrednost (Slika 11a). Tokom prve sekunde EMV je u neutralnom položaju, nema kretanja klipa (Slika 11c) i sav protok preko ventila sigurnosti odlazi u rezervoar. Pritisak na izlazu iz pumpe određen je pritiskom otvaranja ventila sigurnosti (Slika 11d). U intervalu [1 sec - 4 sec] aktiviran je elektromagnet EM1 (Slika 11b), otvara se EMV i uspostavlja se veza $P \rightarrow A$ i $B \rightarrow T$. Klip počinje da se izvlači konstantnom brzinom koja odgovara protoku pumpe. Istovremeno pritisak na izlazu iz pumpe pada na neku nižu vrednost koja odgovara sili opterećenja. U trenutku $t=3.4$ sec klip dolazi u krajnji izvučeni položaj i prestaje da se kreće. Pritisak ponovo raste pa se otvara ventil sigurnosti. U trenutku $t=5$ sec aktivira se drugi elektromagnet (EM2) i počinje procedura uvlačenja klipa. Pošto je efektivna površina klipa manja klip se sada uvlači većom brzinom. Kada dođe u krajnje uvučeni položaj otvara se ventil sigurnosti, nakon čega se elektromagnet EM2 isključuje.



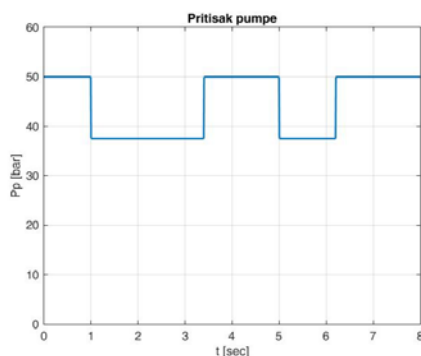
a)



b)



c)



d)

Slika 11. Rezultati simulacije EHA

VI. ZAKLJUČAK

Kombinacija bond graf metodologije i Stateflow alata predstavlja podesu kombinaciju za modeliranje i simulaciju

elektro-hidrauličkih sistema i to za različite režime rada. Bond graf omogućava opisivanje kontinualnih dinamičkih procesa iz različitih naučno-stručnih oblasti (hidraulika, elektrotehnika, mehanika) istim konceptima. Pomoću mehanizma prekida modelujemo diskretne tranzicije između kontinualnih režima. Stateflow predstavlja izvršno okruženje koje omogućava da se u kontekst konačnih automata uključe koncepti iz bond grafa. Stateflow stanja sadrže energetske mehanizme i tokove dok su tranzicije između njih opisane mehanizmima prekida.

LITERATURA

- [1] D. Nauparac, D. Pršić, M. Miloš, "Design Criterion to select adequate control algorithm for electro-hydraulic actuator applied to rocket engine flexible nozzle thrust vector control under specific load", FME Transaction, Belgrade. 41, 1(2013), pp. 31-37.
- [2] D.B. Nauparac, D.H. Pršić, M.V. Miloš, I.S. Todić, "Different modeling technologies of hydraulic load simulator for Thrust vector control actuator", Tehnički vjesnik, Vol.22 No.3, 2015.
- [3] P.Y.Richard, M.Moraescu, J.Buisson, "Bond Graph modelling of hard nonlinearities in mechanics: A hybrid approach", Nonlinear Analysis: Hybrid Systems, Volume 2, Issue 3, August 2008, Pages 922-951
- [4] N. Nedić, D. Pršić, C. Fragassa, V. Stojanović, A. Pavlović, "Simulation of hydraulic check valve for forestry equipment", International Journal of Heavy Vehicle Systems, vol. 24, no. 3, pp. 260 - 276, Jan, 2017.
- [5] D. Karnopp, D. Margolis, R. Rosenberg, "System Dynamics", John Wiley, New York, 2000.
- [6] U. Söderman, J. Strömberg, J. Top, "Variable causality in bond graphs caused by discrete effect", in Granda, J. and Cellier, F.E. (Eds.): *ICBGM '93, Proceedings of the International Conference on Bond Graph Modeling*, 17–20 January, 1993, La Jolla, California. Simulation Series, Vol. 25, No. 2, pp.115–119.
- [7] https://www.mathworks.com/help/pdf_doc/stateflow/sf_ug.pdf
- [8] D. Pršić, N. Nedić, Lj. Dubonjić, V. Đorđević, "Bond Graph Modeling in Simscape", International Journal of Mathematics and Computers in Simulation, North Atlantic University Union, vol. 6, no. 2, pp. 239 - 247.

ABSTRACT

In the analysis of the behavior of electro-hydraulic systems, special attention should be paid to the transitions between the individual modes of operation. In this paper, these transitions are viewed as discrete changes, resulting in hybrid models. Such models require a new modeling approach and other simulation tools. For the physical modeling of the electro-hydraulic actuator, we use a bond graph approach using the switch element to model discrete changes. As the executing environment for simulating the model, we use the Stateflow tool from Matlab. This tool enables us to transform relatively simple models from the bond graph into finite state machines that support continuous changes in the state.

ELECTRO-HYDRAULIC ACTUATOR MODELING BY STATEFLOW TOOL

Dragan Pršić, Dragan Nauparac, Marko Miloš