

**HYBRID BOND GRAPH OF THE ROBOT'S ARM**

**Dragana M. Trajković**

Collage Of Applied Professional Studies Vranje, Srbijadragana.trajkovic@visokaskola.edu.rs

**Branislav Dimitrijević**

College of Applied Professional Studies Vranje, Serbia [branislav.dimitrijevic@pass.ac.rs](mailto:branislav.dimitrijevic@pass.ac.rs)

**Abstract:** In this papers will be considered bond graph modeling one hybrid robot model. Through digital model of simulation it is possible to make better the system's characteristics. Multibond graph is good solution for modeling and experimental results.

**Keywords:** Robot, Mathematical Model, Bond graph modeling, Dymola.

**MODELOVANJE HIBRIDNOG BOND GRAFA RUKE ROBOTA**

**Dragana M. Trajković**

Visoka Škola Primenjenih Strukovnih Studija Vranje, Srbija e-mail:

dragana.trajkovic@visokaskola.edu.rs

**Branislav Dimitrijević**

College of Applied Professional Studies Vranje, Serbia [branislav.dimitrijevic@pass.ac.rs](mailto:branislav.dimitrijevic@pass.ac.rs)

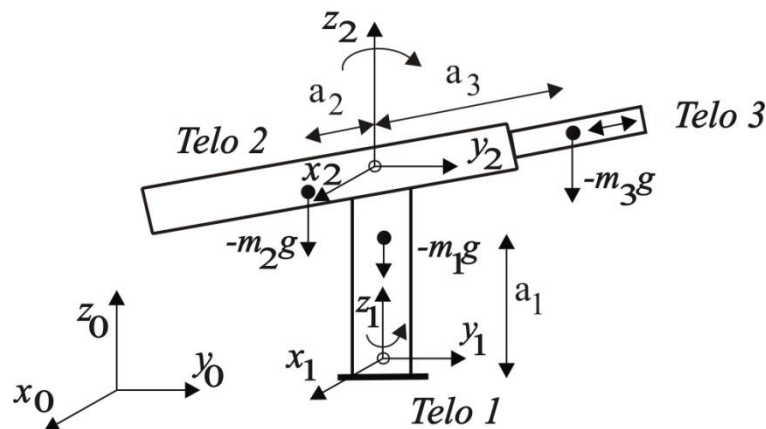
**Rezime:** U ovom radu biće razmotren bond graf modelovanje jednog hibridnog modela robota. Pomoću digitalnog modela simulacije moguće je uporediti i poboljšati karakteristike modela. Multibond graf je dobro rešenje za modelovanje i dobijanje eksperimentalnih rezultata.

**Ključne reči:** Robot, Matematički model, Bond graf modelovanje, Dymola.

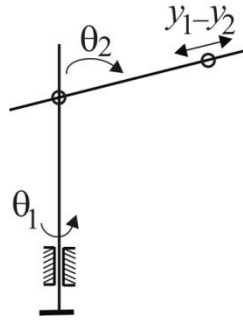
**1. ŠEMA RUKE ROBOTA**

Mehanizam prikazan na slici, sastoji se od tri kruta tela. Izabran je odgovarajući koordinatni sistem. Aktuatori u sistemu su sa električnim motorima i dva hidraulička motora. Električni motor se koristi za ugaonu okretanje tela 1 oko z ose. Hidraulični motori se koriste za ugaonu brzinu tela 2 i 3 oko 2x ose i za linearno rastojanje tela 3 sa kretanjem tela 2 u 2y osi.

Na slici 1 je prikazana slika industrijskog manipulatora. Model se sastoji iz rotacionog cilindra označen kao telo 1, rotacionog cilindra 2 oko y-ose i translatornog kretanja tela 3.



Slika 1: Industrijski manipulator



Slika 2: Uprošćena šema industrijskog manipulatora

## 2. MATEMATIČKI MODEL RUKE ROBOTA

Matrice i diferencijalne jednačine koje opisuju kretanje ruke robota su:

$$\omega_1 = \dot{\theta}_1 k_1 \quad (1)$$

$$\omega_2 = (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) k_2 \quad (2)$$

$$q_k = [\theta] \quad (3)$$

$$J_1 \ddot{\theta}_1 = T_1 - \theta_1 / C_s - R_s \dot{\theta}_1 \quad (4)$$

$$J_2 \ddot{\theta}_2 = T_2 - \theta_2 / C_s - R_1 \dot{\theta}_2 \quad (5)$$

$$V_{c1} = \begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{Y}_1 \\ \dot{Z}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_1 \sin \theta_1 & 0 \\ a_1 \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \dot{\theta}_1 \quad (6)$$

$$V_{c2} = \begin{bmatrix} \dot{X}_2 \\ \dot{Y}_2 \\ \dot{Z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_1 \sin \theta_1 - a_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) & -a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ L_1 \cos \theta_1 + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \dot{\theta}_2 \quad (7)$$

$$V_{c3} = \begin{bmatrix} \dot{X}_3 \\ \dot{Y}_3 \\ \dot{Z}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_1 \sin \theta_1 - L_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) & -d / 2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & d / 2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \dot{\theta}_2 \quad (8)$$

$$Rot(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(9)

$$Rot(y, \theta_2) = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & 0 & \sin \theta_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_2 & 0 & \cos \theta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(10)

$$Transl(0, d, 0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(11)

Eulerova transformacija se dobija množenjem svih triju matrica:

$$A_n = Rot(z, \theta_1)Rot(y, \theta_2)Transl(0, d, 0)$$

(12)

Za analizu su potrebni sledeći parametri: masa, pozicija centra mase i tenzor inercije sa poštovanjem centra mase. Cilindrični deo se rotira oko fiksne ose, ruka robota se takođe rotira oko fiksne ose  $y$ , tako da je inercija sa odnosu na osu bude ortogonalna na vertikalnu osu ne utiče na kretanje uopšte. Sa  $J_c$  je označena inercija sa poštovanjem vertikalne ose kroz centar mase. Oznaka  $m$  predstavlja masu ruke a  $r_c$  odgovarajuće rastojanje između tačke rotacije centra mase. Inercija ruke uz poštovanje tačke rotacije  $J_a$  je dato sa  $J_a = J_c + m r_c^2$ . To je inercija koja je važna za rotaciju ruke i dobija se merenjem. Pretpostavimo da je  $r_c = 0,1225$  mm i da je poznata vrednost. Pretpostavimo da je nominalna vrednost  $J_c = 0,0014$  i  $m = 0,165$ . Pretpostavimo kriterijum integrisanja kvadrata greške ruke robota. Neka je ruka manipulatora u horizontalnom položaju i neka je vreme simulacije 5 s.

$$f_i = m_i \ddot{r}_i$$

(13)

$$n_i = I_i \dot{\omega}_i + \omega_i + I_i \omega_i$$

(14)

Neka su  $r_1$  i  $r_2$  vektori od osa centra mase delova 1 i 2 respektivno. Sila  $f_1$  i  $f_2$  deluju na linkove 1 i 2 respektivno sa masama  $m_1$  i  $m_2$  i relativno su ubrzane sa centrima masa  $\ddot{r}_1$  i  $\ddot{r}_2$  pomoću Njutnovog zakona.

$$f_1 = m_1 \ddot{r}_1$$

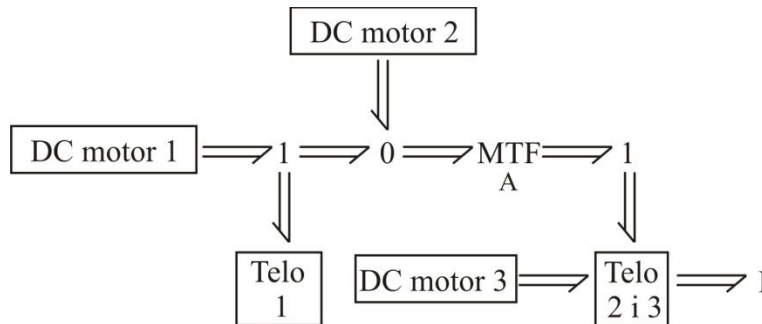
(15)

$$f_2 = m_2 \ddot{r}_2$$

(16)

### 3. BOND GRAF MODELOVANJE INDUSTRIJSKOG MANIPULATORA

Na slici je prikazan opis multi bond graf ruke robota:



Slika 3: Uopšteni bond graf modela ruke robota

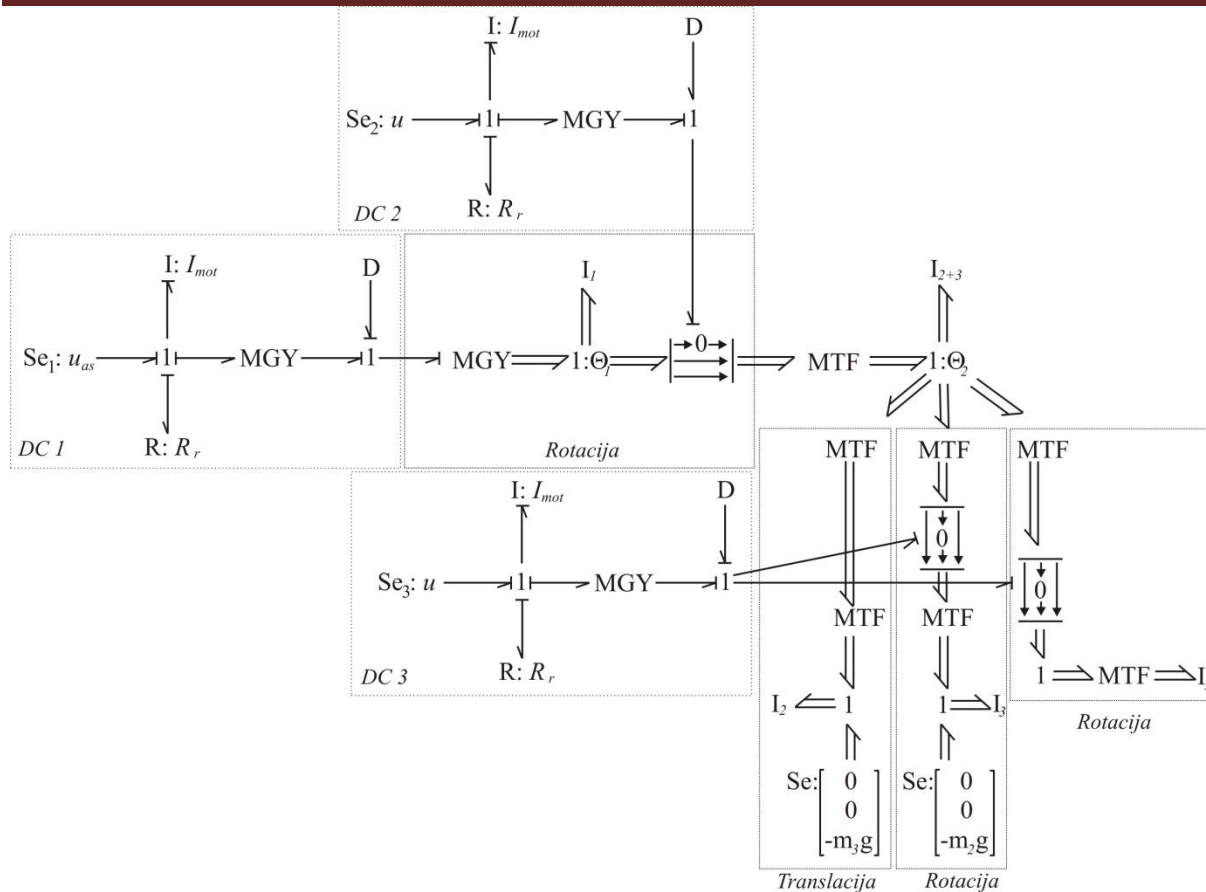
Izvor momenta ugaone brzine tela 1 oko z ose je predstavljen je izvorom napona DC motor 1. Telo 2 je nezavisno u kretanju od tela 1, jer ga pokreće DC motor. Transformacija kretanja rotacionog u translaciono kretanje je predstavljena blokom MTF. Telo 3 ima translatorno kretanje i pokreće ga poseban DC motor.

Bond graf industrijskog manipulatora je detaljno predstavljen na slici 4. Bond graf je predstavljen multibondom-multiport generiše glavne portove i podsisteme. Prikaz sistema počinje s leva na desno. Inercija tela 1, 2 i 3 je predstavljen bond elementom inercije I, otpor je predstavljen otporom R, multi žiratorskim elementom MGY predstavljena je rotacija, D-predstavlja diodu u bond graf modelovanju, MTF predstavlja multitransformacioni model. Elementi C predstavljaju kondenzacioni element bond grafa. Ista brzina prenosa predstavlja se 1-com, a ista snaga je predstavljena portom 0.

Metod modelovanja bond grafa industrijskog manipulatora je prikaz primene na velike mehaničke sisteme.

Industrijski manipulator se sastoji od dve rotacione veze jednu translatornu vezu i tri pokretna tela kao što je predstavljeno na slici. Sve tri veze se pokreću pomoću tri nezavisna DC motora.

Modelovanje je prikazano u Dymoli i opisuje fizički system. Takav model uključuje parametare koji se moraju podesiti. Neki parametri se koriste preko projektne ćelije, a neki direktno. Dymola menja kanale i simulira kada su rešenja zadovoljavajuća. Matematički procedura podešavanja optimizacionih procedura je minimizacija greške između rezultata simulacije i merenja. Promena parametra utiče naravno na izlaz, što međutim nije dovoljno. Dva ili više parametra mogu uticati na rezultate na sličan način koji je drugačiji u odnosu na individualne promene. Dymola uključuje funkcije analize osetljivosti parametra. Kada je podešen skup parametara, preporučljivo je da se potvrdi model i podešenih parametara protiv drugih izmerenih podataka da proveriti da li je dobro slaganje rezultata simulacije i novih merenja. Za određenu seriju izmerenih podataka je moguće dobiti dobre napade povećanjem složenost modela i broj podešenim parametara.



Slika 4: Bond graf model industrijskog robota

Prvi korak u generisanju bond grafa posmatranog robot modela je definicija tri vektora kroz koji se vrši definicija modela bond grafa:

1. Generiše se vector koordinata ( $q_k$ ) pomoću relativnih uglova obrtanja ( $\theta_i$ ) kao i rastojanje za translatorno kretanje (d):

$$q_k = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ d \end{bmatrix}$$

(17)

2. Jednačine koje opisuju potencijalnu energiju,
3. Skup apsolutnih brzina koji definiše kretanje centra masa i rotaciju inercije sistema.

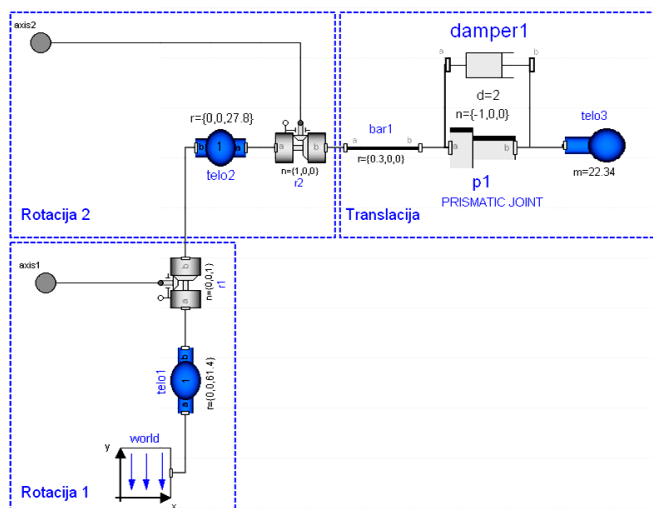
$\dot{q}_n$  -kinetička energija n-tog elementa

Krajnji cilj je realizovati planiranu trajektoriju, rad sa d'Alembertovom silom  $f_i$ , momentum  $M_i$ , Newton-Eulerove jednačine. Newtonove jednačine određuju linearno ubrzanje od centra mase  $\ddot{r}_i$  sila  $f_i$ , masa  $m_i$ , dok Eulerova jednačina određuje ugaonu brzinu i ugaono ubrzanje vektora  $\omega_i$  i  $\dot{\omega}_i$ . Moment  $n_i$  učestvuje sa telom inercije  $I_i$ .

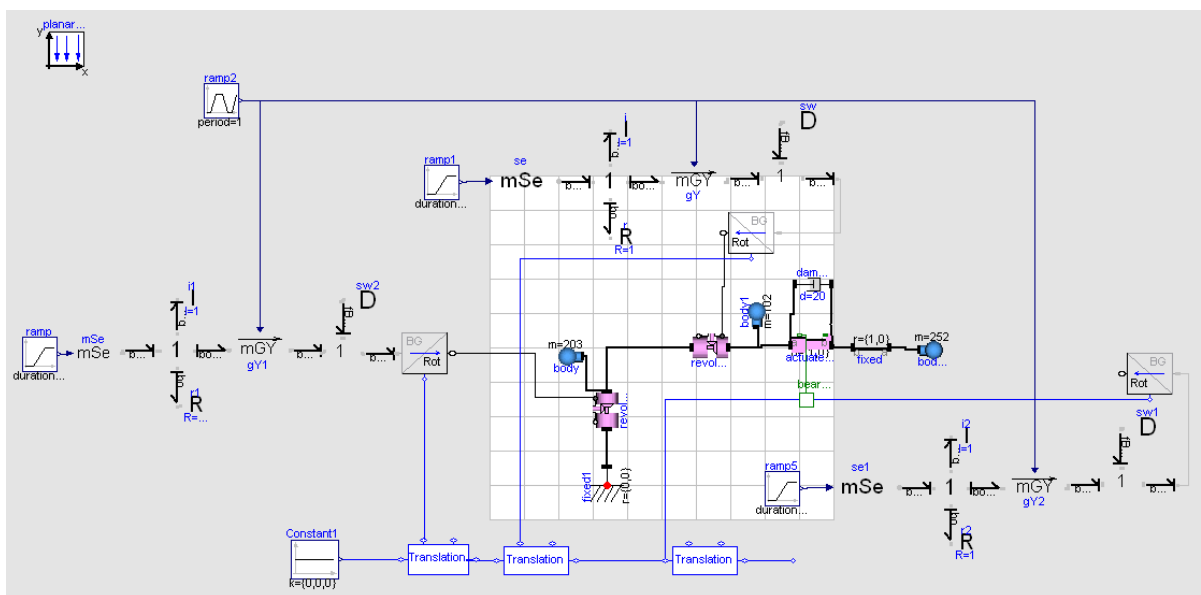
Krajnji položaj tela je određen transformacijom koja određuje rotaciju oko x i y ose uglovima  $\theta_1$  i  $\theta_2$  i translaciju duž y-ose.

#### 4. BOND GRAF MODELOVANJE POMOĆU SOFTVERSKOG PAKETA DYMOLA

Cilj modelovanja sistema putem bond grafa je dobijanje simulacije izlaznih vrednosti. Matematički ekvivalent je skup implicitnih diferencijalnih jednačina. Određivanjem kauzalnosti, moguće je izvršiti simulaciju.



Slika 5: Planarni model ruke robota



Slika 6: Simulacija industrijskog manipulatora pomoću bond graf modela u programskom paketu Dymola primenom planarnih elementa

## ZAKLJUČAK

U radu je dat model hibridnog industrijskog manipulatora- ruke robota pomoću multibond grafa. Prikazan je direktan način modelovanja pomoću softverskog paketa Dymola. Poznavanjem matematičkog modela procesa i fizičkog razumevanja procesa moguće je realizovati modelovanje koji daje rezultate simulacije identične onima u praksi, čime se postiže predikcija u projektovanju novih modela.

## 5. LITERATURA

[1] [R.M.Berger](#), [H.A.ElMaraghy](#), [W.H.ElMaraghy](#), "The analysis of simple robots using bond graphs", [Journal of Manufacturing Systems](#), vol. 9, Issue 1. 3, pp. 13–19, 1990.

- [2] Vladimir R. Milačić, Boris N. Popov, Nebojša DJ. Čović, “Mathematical model of an industrial robot with articulated configuration and six degrees of freedom”, *Robotics & Computer. Integrated Manufacturing*, vol. 8, no. 3, pp. 143-148, 1991.
- [4] R. C. Rosenberg, D. C. Karnopp, “*Introduction to Physical System Dynamics*“, McGraw-Hill Book Co., New York, 1983.
- [5] D.M. Vukobratović, D. Katić, “*COMPUTER-ASSISTED CHOICE OF ELECTROHYDRAULIC SERVOSYSTEMS FOR MANIPULATION ROBOTS USING COMPLETE MATHEMATICAL MODELS*“, *Mech. Mach. Theory* Vol. 22, No. 5, pp. 431-439, 1987
- [6] M. A. Djeziri, B. Ould Bouamama, R. Merzouki, “Modelling and Robust FDI of Steam Generator Using Uncertain Bond Graph Model”, *Journal of Process Control*, vol. 19, pp. 149–162, 2009. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jprocont.2007.12.009>
- [7] D. C. Karnopp, D. L. Margolis, R. C. Rosenberg, *System Dynamics: Modeling, Simulation, and Control of Mechatronic Systems*. John Wiley & Sons, New York, 2012. <http://dx.doi.org/10.1002/9781118152812>
- [8] D. Trajković, V. Nikolić, D. Antić, S. Nikolić, S. Perić, “Application of the Hybrid Bond Graphs and Orthogonal Rational Filters in Sag Voltage Effect Reduction”, *Electronics and Electrical Engineering*, vol. 19, no. 6, (2013), pp. 25-30. Print ISSN: 1392-1215, (Doi No: <http://dx.doi.org/10.5755/j01.eee.19.6.1746>), *Publisher: Kaunas University of Technology*. June 2013
- [9] Vjekoslav Damić, “DYNAMIC ANALYSIS OF AN OMNI-DIRECTIONAL MOBILE ROBOT”, *17<sup>th</sup> International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology" TMT 2013, Istanbul, Turkey, 10-11 September 2013*