

Strukturalno modeliranje fizičkih sistema u Simscape okruženju

Dragan Pršić, Vladimir Đorđević

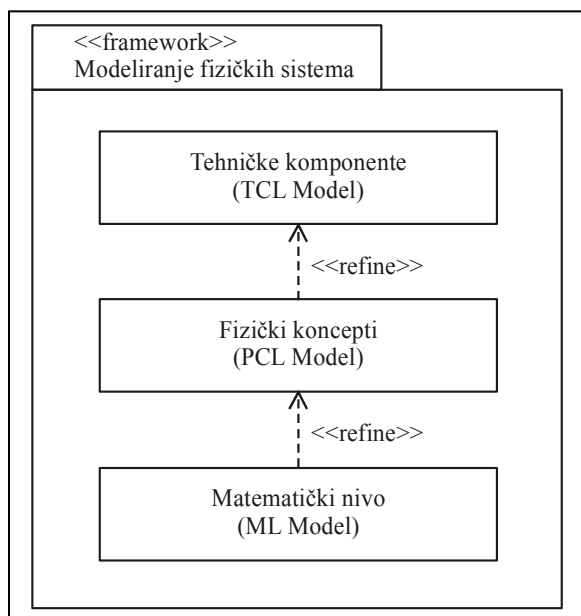
Katedra za energetiku i automatsko upravljanje
Univerzitet u Kragujevcu, Mašinski fakultet Kraljevo
Kraljevo, Srbija
prsic.d@mfkv.kg.ac.rs, vladadj@bluenet.rs

Sadržaj — Modeliranje fizičkih sistema je složen proces koji se realizuje kroz više faza. Polazimo od realnih fizičkih komponenti i njihovih veza da bi smo stigli do apstraktnog matematičkog opisa kojeg koristimo u analizi. U radu je dat prikaz strukture modeliranja u Simscape™ okruženju. Pored toga uvodimo dodatni nivo apstrakcije za opis ponašanja pomoću bond grafa.

Ključne riječi - Modeliranje fizičkih sistema; Simscape; Bond graf; Hidraulički sistem

I. UVOD

I pored usvojene metodologije, modeliranje je kreativan proces koji je teško formalizovati. Na početku izrade modela, makar i neformalno, potrebno je da usvojimo konceptualni okvir da bi smo se lakše kretali kroz modelarski prostor. Modeliranje se obično strukturiira kroz tri nivoa apstrakcije (SL 1 [1], [2]) gde svaki nivo predstavlja drugačiji ugao gledanja na sistem. Proces modelovanja obično započinjemo na nivou tehničkih komponenti (Technical Component Level - TCL). U sistemu se identifikuju podsistemi/komponente i njihove međusobne veze.



Slika 1. Konceptualni okvir modeliranja fizičkih sistema

Za grafičko predstavljanje podsistema/komponenti koriste se manje ili više standardni (domenski) simboli koji ukazuju na njihovu funkciju. Veze između elemenata modela crtamo prateći realne veze koje postoje između komponenti sistema. Tako dolazimo do mrežnog prikaza sistema koji opisuje strukturu (funkciju) sistema. Svaki čvor (nod) te mreže može biti komponenta ili podsistem koji se može dalje dekomponovati. Tipičan primer ovakvog modela je šema neke hidrauličke instalacije. Krajnji model iz ove etape definiše interfejs, kako za ceo sistem tako i za svaku komponentu pojedinačno, koji modeli na sledećim nivoima treba da realizuju.

Nakon završene strukturne dekompozicije prelazimo na opisivanje ponašanja sistema, tj. na nivo fizičkih koncepata (Physical Concept Level - PCL). U zavisnosti od svrhe modela i željene tačnosti, svakoj komponenti pridružujemo relevantne fizičke procese i njihove međusobne veze. Drugim rečima, kvalitativno opisujemo ponašanje sistema. Proces nije jednoznačan jer istoj komponenti možemo pridružiti različite fizičke koncepte. Ideja je da se sistem opisuje fizičkim pojmovima (inercija, trenje, curenje, otpor, kapacitivnost, induktivnost, itd.) koji su mnogo bliži domenskom ekspertu a da se matematička strana problema stavi u drugi plan. Pri tome moramo da vodimo računa o ugovoru koji je komponenta, preko svog interfejsa, preuzela u prethodnoj fazi modelovanja. Ovo je najvažnija etapa u modeliranju jer zahteva ne samo dobro poznavanje sistema već sposobnost i iskustvo u odlučivanju koje procese uključiti u model a koje izostaviti.

Na poslednjem nivou, nivou matematičke apstrakcije (Mathematical Level - ML), fizičke procese i njihove veze opisujemo pomoću matematičkih relacija koje nazivamo konstitutivnim relacijama. Ni ovaj proces nije jednoznačan jer se istom fizičkom mehanizmu mogu pridružiti različiti matematički opisi. Čak i forma matematičkog modela može biti različita. Na primer, model se može implementirati kao skup diferencijalnih i algebarskih jednačina ili kao program za simulaciju. Međutim, važno je da promene na ovom nivou ne utiču na promene modela na prethodnim nivoima.

Iz prethodnog se može videti da je modeliranje proces koji se sastoji od niza transformacija. Osnovni problem je velika konceptualna udaljenost polaznog i krajnjeg domena modela. Sa jedne strane imamo korisnika koji sliku realnog sistema formira koristeći domenske pojmove i notaciju (npr. električne

i hidrauličke šeme), a sa druge strane strogo formalizovanu sintaksu i semantiku niskog nivoa (npr. diferencijalne jednačine ili računarske programe).

II. SIMSCAPE PRISTUP MODELIRANJU

Da bi omogućio upotrebu jedinstvenog jezika za modeliranje na sva tri nivoa apstrakcije MathWorks [3] je svoj paket Simulink® (MATLAB®, R2007a) proširio alatom Simscape™. Simscape je namenjen modeliranju, simulaciji i analizi multidomenskih fizičkih sistema. Modeliranje se bazira na konceptu generalizovane mreže i uopštenih Kirhovljevih zakona [4]. Umesto matematičkih blokova (Simulink), za gradnju modela sistema koriste se blokovi koji odgovaraju fizičkim komponentama (Simscape) kao što su pumpa, ventil, cilindar, prigušnica itd. Između komponenti se uspostavljaju veze koje odgovaraju energetskim tokovima i tokovima signala. Na taj način struktura modela odgovara strukturi realnog sistema a sam proces formiranja modela liči na sklapanje realnog sistema. Dakle, za razliku od Simulink-a gde sistem modelujemo tek na trećem nivou apstrakcije (ML), u Simscape-u modelovanje započinjemo na prvom nivou (TCL).

Radi ilustracije, na Sl. 2a dat je šematski prikaz jednog hidrauličkog sistema a na Sl. 2b odgovarajući TCL model baziran na pristupu generalizovane mreže.

Sa slike se vidi sličnost strukture sistema i strukture modela (na primer cilindru odgovara blok 1, razvodniku blok 2, itd.). Ta sličnost je još očiglednija kada se svaki blok u modelu predstavi domenskim simbolom date komponente. Tako je kreiranje modela intuitivan proces koji liči na sastavljanje realnog sistema. Korisnik iz biblioteke bira odgovarajuće blokove a onda ih povezuje linijama prateći strukturu sistema.

Na korisničkom nivou, svaka komponenta je predstavljena pomoću svog interfejsa. Interfejs je određen brojem i tipom priključaka preko kojih se razmenjuju energija i informacije sa spoljnim svetom. U Simscape terminologiji ovi priključci se

zovu energetski odnosno signalni portovi. Portovi su konceptualna mesta kroz koja energija/signal ulazi/izlazi iz komponente. Energetski portovi odgovaraju fizičkim vezama kroz koje se vrši dvosmerna razmena energije bez gubitaka.

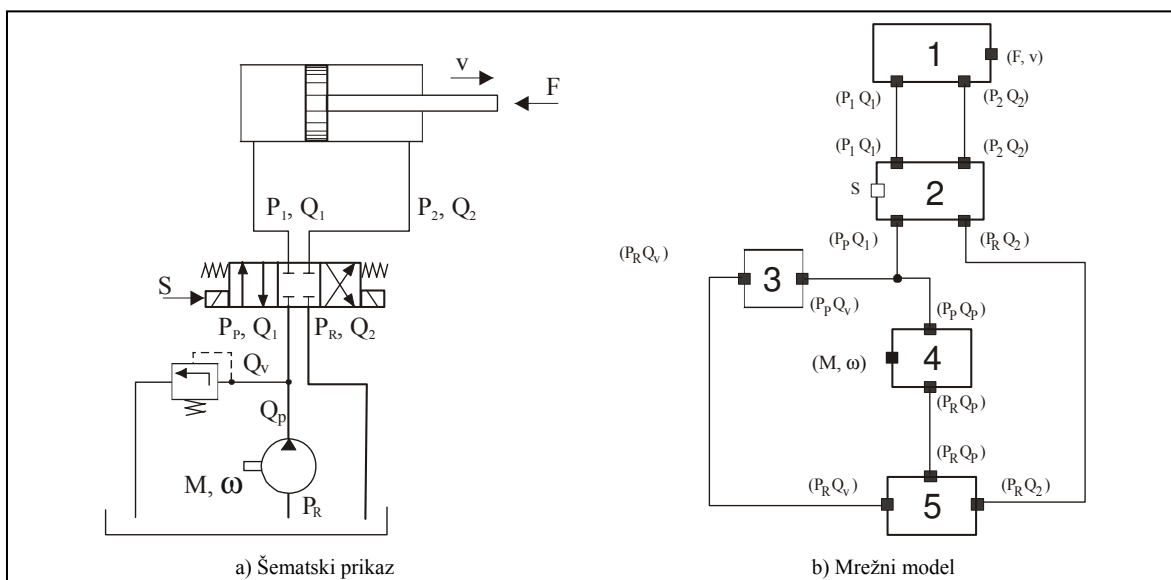
Signali portovi su jednosmerni i kroz njih se prenose signali između blokova. Na primer, blok 2 koji odgovara razvodniku, ima četiri energetska i jedan port za prenos signala (dva priključka ka cilindru, po jedan ka pumpi i rezervoaru i jedan priključak za upravljački signal). Energetski portovi imaju svoj tip u zavisnosti od energetskog domena kojem pripadaju (električni, hidraulički, termalni, mehanički). Svakom energetskom portu se pridružuju po dve energetske veličine (napor i tok) čiji proizvod određuje protok energije kroz dati port. Tako recimo, blok 1 (cilindar) ima dva hidraulička (sa pridruženim P_1, Q_1 i P_2, Q_2 veličinama) i jedan mehanički port (v, F).

Podela na napor-tok (across-through) veličine se bazira na načinu merenja ovih veličina. Veličinu napora posmatramo kao razliku (promenu) između dve prostorno odvojene tačke u energetskom toku. Komplementarna veličina toka (u smislu da njihov proizvod određuje snagu) je karakteristika jedne tačke u energetskom toku.

Veze između komponenti (blokova) se modeluju pomoću linija koje predstavljaju fizičke veze koje prenose energiju ili signale. Energetske veze su dvosmerne. Kada formiramo vezu između dve komponente ne moramo da definišemo smer toka energije. Signali su, kao i u Simulinku, jednosmerni.

Konekcije između blokova u modelu imaju ulogu mehanizma za distribuciju energije. One uvode ograničenja u raspodelu energije u sistemu.

U slučaju direktne veze između dva bloka ista količina energije koja napušta jedan blok ulazi u drugi. Drugim rečima, veza predstavlja trenutnu razmenu energije između blokova.



Slika 2. Hidraulički sistem

U matematičkom pogledu to znači da su veličine na oba kraja veze jednake. U slučaju kada je potrebno povezati tri ili više komponente energetska konekcija se može granati. Tada je, u svakom trenutku, energija koja stiže u čvor jednaka energiji koja taj čvor napušta.

U matematičkom pogledu povezane komponente imaju jednake veličine napora dok se veličina toka deli između njih.

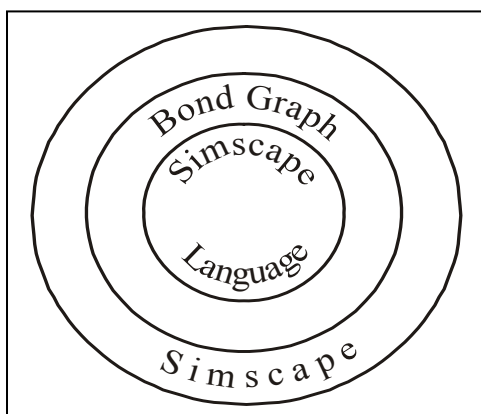
Osnovni gradivni elementi u Simscape-u su blokovi koji predstavljaju realne komponente kao što su otpornik, kondenzator, masa, opruga, ventil, komora itd. Oni su organizovani u biblioteke u skladu sa domenom kojem pripadaju. Blokovi se mogu opisati na dva načina: kao bazični elementi kojima se opisuje neka fizička pojava (model ponašanja) ili kao mreža blokova nižeg nivoa (model strukture). Za opis ponašanja koristi se *Simscape™ Language* (SL). To je tekstualni, objektno-orijentisan jezik za opis ponašanja korisnički definisanih blokova [5]. SL samo proširuje mogućnosti *Simscape* okruženja ali se ne može koristiti kao samostalni jezik. Drugim rečima, pomoću SL-a se formira novi modela ponašanja, dok se za formiranje strukturnih modela i dalje koristi *Simscape* grafički editor.

Ideja je da se između *Simscape*-a i SL-a uvede novi sloj (Sl. 3) koji bi se bazirao na bond grafu (*Bond graph* - BG) [6]. Bond graf bi se realizovao pomoću SL-a a koristio bi se za definisanje ponašanja u *Simscape*-u. Time bi se modelar oslobodio potrebe da ulazi u svet tekstualnog jezika za programiranje već bi koristio dobro poznat, grafički jezik za modeliranje ponašanja.

Kako je broj osnovnih BG elemenata ograničen rešenje koje se nameće je formiranje bond graf biblioteke u SL-u.

III. BOND GRAF BIBLIOTEKA U SL-U

Novi bazični model u *Simscape*-u naziva se model komponente i sastoji se od interfejsa i njegove implementacije koja opisuje unutrašnje ponašanje. Interfejs prema drugim komponentama se definiše brojem i tipom bidirekcionih portova, nodova u *Simscape* terminologiji. Komponenta može sadržati nodove različitih tipova ali se konekcija može uspostaviti samo između dva noda istog tipa.



Slika 3. Kapsuliranje Simscape-a pomoću bond grafa

Tip noda je definisan domenom kojem pripada odnosno vrstom energije koja kroz njega prolazi. *Simscape* u sebi sadrži nekoliko predefinisanih domena, kao što su hidraulički, električni, mehanički, itd. Ovi domeni su uključeni u bazičnu biblioteku (*Foundation Library*) i predstavljaju osnovu za izgradnju *Simscape* blokova. Na primer, deo opisa hidrauličkog domena prikazan je na Sl. 4.

```

domain hydraulic
% Hydraulic Domain
% Copyright 2005-2008 The MathWorks, Inc.
%...

variables
    p = { 0 , 'Pa' };
end

variables(Balancing = true)
    q = { 0 , 'm^3/s' };
end

end

```

Slika 4. Model hidrauličkog domena (delimičan prikaz [3])

Centralni deo modela domena predstavlja deklaracija promenljivih (zajedno sa početnim vrednostima i jedinicama mere) kojima se definiše protok energije kroz dati domen. Blok koji počinje sa rezervisanom rečju *variables* sadrži listu veličina napora iz datog domena. Blok koji počinje sa *variables* (*Balancing=true*) deklariše veličine toka domena. U prethodnom primeru promenljive *p* i *q* su redom veličina napora i veličina toka.

Iako pri izgradnji novih blokova možemo da koristimo predefinisane *Simscape* domene ipak pri formiranju biblioteke BG osnovnih elemenata moramo da definišemo novi domen. Razlog je što nod iz jednog domena može biti povezan samo sa drugim nodom iz istog domena. Sa druge strane, BG je multi-domenski pristup modeliranju fizičkih sistema pa bi vezivanje za neki od domena iz *Simscape* biblioteke suzilo mogućnost primene BG blokova. Ovo se može objasniti time da se *Simscape* domeni odnose na TC nivo modeliranja dok se BG odnosi na PC nivo modeliranja (Sl. 1). Dakle, potrebno je definisati novi domen koji će nam poslužiti kao baza za definisanje energetskih portova svih BG blokova.

Kako se u BG-u koriste samo idealne (*point-to-point*) konekcije u domenskom modelu moramo koristiti samo mehanizam jednakosti. Blok za deklaraciju veličina toka mora ostati prazan. Tako dolazimo do BG domenskog modela prikazanog na Sl. 5.

Kao što se vidi, u BG domenu interakcija se opisuje pomoću dve bezdimenzijske veličine (*effort*, *flow*) inicijalno setovanih na nulu. Između odgovarajućih veličina dva različita porta uspostavlja se samo relacija jednakosti.

Pored biblioteke osnovnih BG elemenata potreban nam je dvoportni interfejs kako bi smo BG model povezali sa mrežnim modelom na nivou komponenti.

```

domain BondGraph
% Bond Graph Domain
%...

variables
    effort = { 0, '1' };
    flow = { 0, '1' };
end

end

```

Slika 5. Domenski model bond grafa

Kao što je ranije pomenuto biblioteka osnovnih BG elemenata nam služi za modelovanje unutrašnje dinamike pojedinih komponenti ali za modelovanje sistema koristimo Simscape okruženje koje se bazira na generalizovanim mrežama. Pošto ne možemo direktno da povežemo portove koji pripadaju BG domenu sa portovima koji pripadaju drugim domenim (hidraulički, električni, mehanički) potreban nam je interfejs koji će povezati veličine različitih domena. Na Sl. 6 prikazan je interfejs koji povezuje BG i hidraulički domen.

Interfejs se sastoji od dva noda: jednog koji pripada BG domenu i drugi koji pripad domenu sa kojim se vrši povezivanje. U sekciji equations uspostavljamo vezu između energetskih veličina jednog i drugog domena. Veza se uspostavlja pomoću parametara (K_p , K_q) kako bi se obezbedila kompatibilnost fizičkih jedinica.

```

component BGHydInterface
% BG-Hydraulic Interface

nodes
    hyd=foundation.hydraulic.hydraulic;
    bg=BondGraph.BondGraph; % bg:right
end

parameters (Hidden=true)
    Kp={1, 'Pa'};
    Kq={ 1 , 'm^3/s' };
end

variables
    p = { 0 , 'Pa' };
    q = { 0 , 'm^3/s' };
    e = { 0 , '1' };
    f = { 0 , '1' };
end

function setup
    through(q,hyd.q, []);
    across(p,hyd.p, []);
    across(f,bg.flow, []);
    across(e,bg.effort, []);
end
%.....
end

```

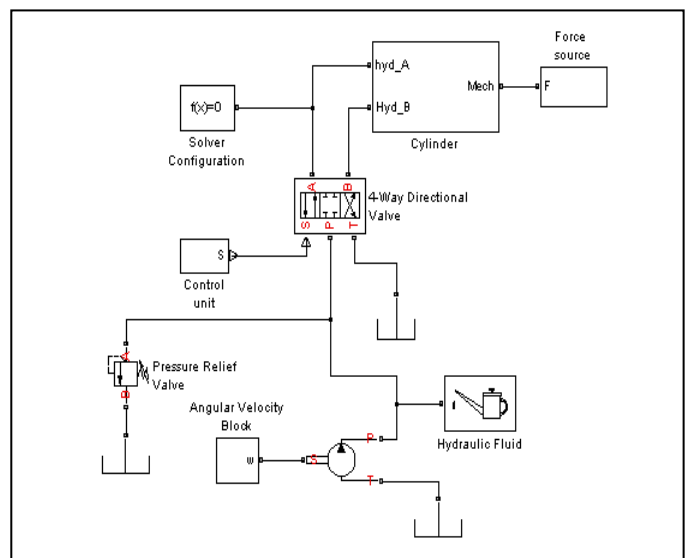
Slika 6. Bond graf – Hidraulički interfejs

IV. PRIMERI PRIMENE BG SLOJA U SIMSCAPE-U

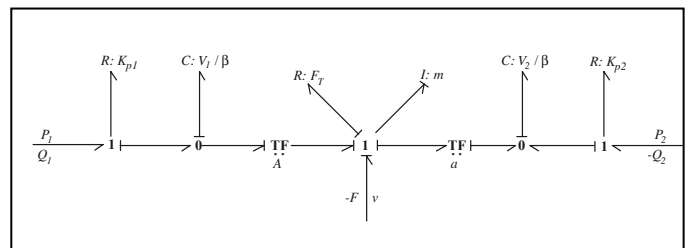
U cilju ilustracije primene bond graph sloja, realizovanog u SL-u, koristimo model hidrauličkog kola sa Sl. 2. Simscape model ovog sistema prikazan je na Sl. 7.

Svi blokovi, osim bloka Cylinder, predstavljaju Simcape komponente. Za modelovanje cilindra koriste se BG blokovi. Dakle, u istom modelu koristimo dva različita pristupa modeliranju. Na najvišem nivou koristimo mrežni pristup kako bi topologija modela odgovarala topologiji realnog sistema. Na nivou komponenti možemo da biramo standardne Simscape ili bond graph blokove.

BG model cilindra prikazan je na Sl. 8. Za formiranje modela koristimo grafički editor. Svaki BG element predstavljen je pomoću ikonice sa interfejsom koga čine portovi datog bloka. Prateći strukturu BG-a između portova povlačimo linije koje predstavljaju idealne, point to point veze.



Slika 7. Simscape model hidrauličkog kola



Slika 8. Bond graf hidrauličkog cilindra dvostranog dejstva

U radu se uvodi novi sloj apstrakcije u Simscape alat za modeliranje i simulaciju fizičkih sistema. Time se smanjuje diskontinuitet u transformaciji opisa nekog sistema od njegove realne slike do oblika koji se može izvršavati na računaru. Umesto da koristi tekstualni jezik za programiranje krajnji korisnik koristi energetske koncepte iz bond grafa koji su bliži realnom svetu. Da bih mogao da se koristi bond graf potrebno je formirati biblioteku konačnog broja osnovnih bond graf elemenata korišćenjem SL-a. Naravno i u Simscape-u postoje blokovi osnovnih energetskih procesa (trenje, otpor, inercija, induktivnost) pomoću kojih gradimo složenije modele. Prednost bond grafa je što omogućava formiranje multidomenskih blokova. Na primer, uvodi se blok koji odgovara gubicima slobodne energije bez obzira da li se radi o mehaničkom trenju ili električnom otporu.

Osnovni problem u realizaciji bond grafa kroz SL javlja se zbog različitog tumačenja veza. U SL-u se koriste konekcije bazirane na generalizovanoj mreži (uopštavanje prvog Kirhovljevog zakona) dok se u bond grafu koriste konekcije bazirane na portovima. Prednost je što modelar ne mora da razmišlja o detaljima implementacije. Jedino što korisnik treba eventualno da uradi je promena konstitutivnih relacija.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je potpomognut od strane Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije u okviru projekta TR 33026

- [1] A.P.J. Breunese, J.L. Top, J.F. Broenink, J.M. Akkermans, "Libraries of reusable models: theory and application", *Simulation* 71 (1) (1998), pp.7-22.
- [2] G. Booch, J. Rumbaugh, I. Jacobson, *The Unified Modeling Language User Guide*, 2nd ed., Addison Wesley Professional, 2005.
- [3] <http://www.mathworks.com> - zvanični sajt kompanije.
- [4] The MathWorks, *Simscape™ 3, User's Guide*, 2009.
- [5] The MathWorks, *Simscape™ 3, Language Guide*, 2009.
- [6] Wolfgang Borutzky, *Bond Graphs, A Methodology for Modelling Multidisciplinary Dynamic Systems*, SCS Publishing House, Erlangen, San Diego, 2004.

ABSTRACT

Summary: Systems modeling is a complex process that is implemented through several phases. We are starting from the physical components and their relationship and ends with abstract mathematical description we use in the analysis. The paper gives an outline of modeling in Simscape™ environment. In addition we introduce an additional layer of abstraction to describe the behavior using the bond graph.

STRUCTURAL MODELING IN SIMSCAPE ENVIRONMENT

Dragan Pršić, Vladimir Đorđević