

**MODELIRANJE I SIMULACIJA TEHNI KIH  
SISTEMA PRIMENOM BONDGRAFOVA**

**MODELLING AND SIMULATION OF TECHNICAL  
SYSTEMS – APPLICATION OF BONDGRAPHS**

**Dr Milorad Ranić**

Visoka tehnička škola strukovnih studija u Zrenjaninu  
e-mail: rancimil@ptt.rs

**Mr Spasoje Erić**

Visoka tehnička škola strukovnih studija u Zrenjaninu  
e-mail: erics@ptt.rs

**Dušan Ranić, dipl. inž.**

IMK 14. oktobar Kruševac

**Sažetak**

*Bondgrafovi su grafička metoda koja se koristi za modeliranje i simulaciju mehaničkih, električnih, hidrauličkih, termičkih i drugih tehničkih sistema. U radu su dati osnovni principi formiranja bondgrafova i njihovi standardni elementi. Izloženi su bondgrafografski modeli za jednostavne i složene pneumatske i hidrauličke uređaje i sisteme.*

**Abstract:**

*Bondgraphs represent a graphical method used for modelling and simulation of mechanical, electrical, hydraulic, thermal and other technical systems. In this paper, bondgraph graphical models for simple and complex pneumatic and hydraulic devices and systems are given as application examples.*

**Ključne riječi:** modeliranje, grafička metoda, bondgraf, pneumatika, hidraulika

**Keywords:** modelling, graphical method, bondgraphs, pneumatic, hydraulic

**1. Uvod**

Bondgrafovi su grafička metoda koja se koristi za modeliranje i simulaciju različitih tehničkih sistema. Nastala je šezdesetih godina a njen idejni autor bio je Henry Paynter (MIT, Cambridge, SAD). Ova metoda je vrlo brzo prihvaćena od američkih, a nešto kasnije i japanskih inženjera i odmah se pokazalo da je veoma pogodna i efektivna. Važne uloge za po etni razvoj Bondgrafova imali su I. Thoma (Univerzitet Ontario, Kanada), D. Margolio (Franklin Institut, SAD) i N. Suda (Osaka Univerzitet, Japan). Sedamdesetih, a naročito osamdesetih godina, ova metoda postaje popularna i u Evropi. Bondgrafovi su mreže, odnosno, grafičke šeme. Njihovini sistem slovničkih oznaka međusobno spojenih vezama koje se zovu bondovi. Primjenjuju se za grafičko prikazivanje mehaničkih, električnih,

hidrauličnih, termičkih i drugih sistema i omogućavaju razvijanje novih i efikasnih metoda projektovanja. Za njihovu primenu nisu neophodna neka široka prethodna teorijska znanja, ali je poželjna osnovna informisanost iz automatskog upravljanja, odnosno, oblasti blok dijagrama, prenosne funkcije i stabilnosti.

Razvoj računarske tehnike, a naročito savremenih mikroracunara i programskih paketa (TUTSIM - 1988. g.), omogućili su značajno uvećanje efikasnosti ove grane metode.

## 2. Simulacija i modeliranje sistema

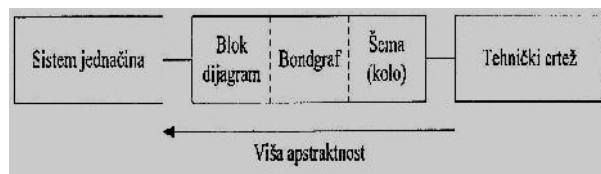
Iako primena modernih računara pruža velike mogućnosti pri simulaciji tehničkih sistema, neki problemi su i dalje prisutni. To su najčešće:

- opisivanje i razumevanje modela
- inspirisanje i treniranje intuicije inženjera
- eliminisanje programskih grešaka
- izbegavanje prepreka i problema primene numeričke matematike

U procesu prevazilaženja ovih nedostataka razvijen je novi pristup koji se naziva realistička simulacija. Ona je omogućila:

- grafički sistem prezentovanja
- inženjersku i naučnu efikasnost
- dubok kontakt sa inženjerstvom
- pouzdanost sa rezultatima bez greške

Suštinu realističke simulacije čini primena grafičkog sistema opisivanja. Od raspoloživih grafičkih sistema, bondgrafovi su se pokazali kao veoma korisni. Na slici 1 upoređena je apstraktnost različitih metoda koji se koriste za opisivanje tehničkih sistema.



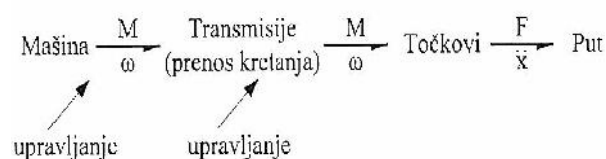
Slika 1. Apstraktnost metoda za opisivanje

Apstraktnost predloženih metoda prezentacije raste sa desna ulevo i najveća je kod analitičkog sistema opisivanja (putem

jednaka). Bondgrafovi se ovde nalaze u sredini.

## 3. Formiranje bondgrafova

Za simulaciju nekog složenog sistema pomoću bondgrafova, pogodno je koristiti sistematski pristup korak po korak. Prvi korak je pisanje bondgraf rešenja. Njegov glavni lanovi i međusobni spojevi, veze, koji se zovu bondovi. Glavni lanovi mogu biti jedno slovo ili simbol, ili više njih, kada pripadaju podgrupu. Bondgraf koji opisuje kretanje motora automobila ima oblik prikazan na slici 2.



Slika 2. Bondgraf kretanja automobila

Slovo označava vrstu promenljive (npr. torzija, rotacija, frekvencija, sila, brzina). Polovina strelice na bondu (vezi) označava smer protoka snage (energije).

Tabela 1. Slovni simboli bondgrafova

Opšti		Elektrotehnika		Mehanika		Mehanika obrtno kretanje		Hidraulika		Termodinamika	
sila, naprezanje	e	napon	U	sila	F	moment	M	pritisak	p	temperatura	T
protok	f	jačina, struja	I	brzina	$\dot{x}$	ugaona brzina	$\omega$	zapreminski protok	$\frac{Q}{V}$	protok entropije	$\dot{S}$
impuls	i	električni impuls	$i_{el}$	impuls	i	ugaoni impuls	L	hidraulički impuls	$i_h$		
pomeranje	q	količina elektr.	q	položaj	x	ugao	$\varphi$	zapremina	V	entropija	S

Uobičajeni slovni simboli bondgrafova za različite tehničke oblasti prikazani su u tabeli 1.

Sledeći korak posle pisanja bondgrafa jeste zamena reči standardnim bondgraf elementima, gde svaki od njih predstavlja određeno dejstvo ili akciju u sistemu. Elementi zauzimaju centralno mesto u sistemu simulacije i formiranja modela u obliku bondgrafa.

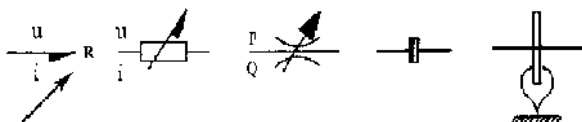
#### 4. Standardni elementi bondgrafova

Klasifikacija standardnih elemenata bondgrafova može se izvršiti prema broju bondova na jednokanalne, dvokanalne, trokanalne i višekanalne.

##### Jednokanalni elementi

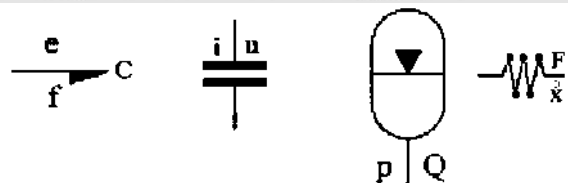
Elementima sa jednim bondom pripadaju otpornici (prigušiva i), induktori (pobuđiva i) i kondenzatori. Njihove oznake su: R - elementi, I - elementi i C - elementi.

Na slici 3 prikazani su bondgraf simboli za R - elemente (a) i to u elektrotehnici (b), u hidraulici (c), u mehanici (d i e).



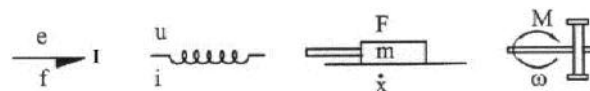
Slika 3. R - elementi

Na slici 4 prikazan je bondgraf za kondenzator ili C - element (a) sa primerima električnog kondenzatora (b), hidrauličkog akumulatora (c) i opruge (d).



Slika 4. C - elementi

Na slici 5 prikazan je bondgraf I - elementa (a) za induktore (pobuđiva e) sa primerom električne indukcije (b), kretanja mase (c) i rotacionog kretanja (d).

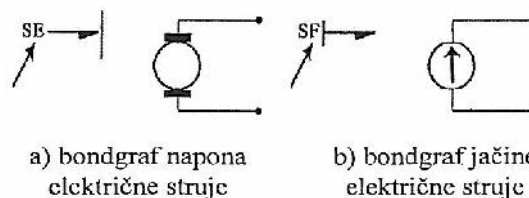


Slika 5. I - elementi

##### Izvori protoka i otpora

Napon i jačina struje u elektrotehnici, uopštavanjem se mogu predstaviti kao izvor otpora i protoka (Slika 6.). Oni za Bondgraf slovo imaju simbole SE i SF.

SE (*symbol source effort*) - izvor otpora SF (*symbol source flow*) - izvor protoka.

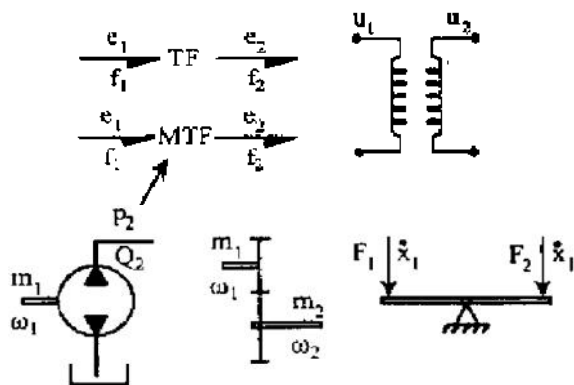


Slika 6. Izvori otpora i protoka

##### Dvokanalni elementi

Postoje dve vrste dvokanalnih elemenata i to: transformeri (pretvara i, transformatori) i žiratori (žiroskopi). Pretvara i su poznatiji u elektrotehnici i imaju simbol TF za konstantan odnos i MTF za promenljiv

odnos, kada se zovu modularni pretvarači, a tada je upravljački signal modularan.

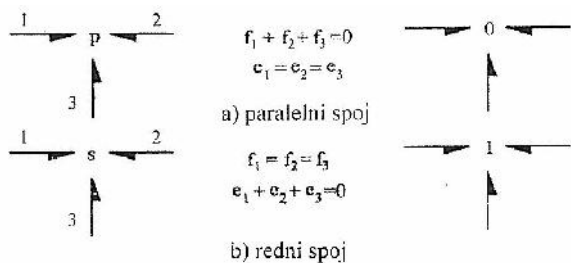


Slika 7. Dvokanalni elementi

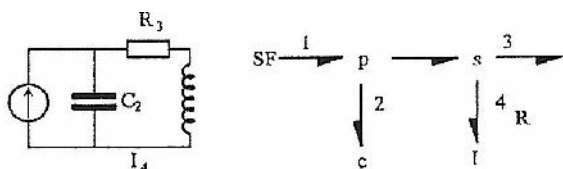
Slika 7. prikazuje bondgraf (a) za neke primere dvokanalnih elemenata: električni transformator (b), hidraulička pumpa (c), mehanički zupasti prenosnik (d) i poluga za mala pomeranja (e).

**Trokanalni elementi**

Spoj koji povezuje tri bonda po konvenciji se zove trokanalni element. Postoje dve vrste ovih elemenata: paralelni i redni spojevi (prikazani na slici 8). Oni održavaju (konzervišu) energiju i reverzibilni su.



Slika 8. Trokanalni elementi



Slika 9. Električno kolo i Bondgraf

Jednostavno električno kolo i odgovarajući bondgraf prikazani su na slici 9.

**5. Hidraulički i pneumatski sistemi i njihovi bondgrafovi**

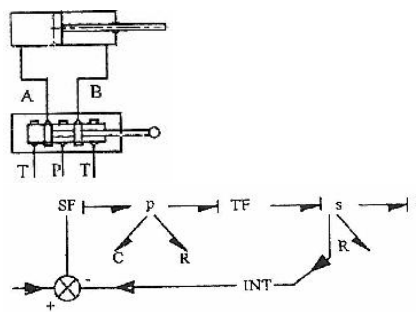
Elementi hidrauličkih i pneumatskih upravljačkih sistema prikazuju se pomoću grafičkih simbola koji su definisani standardima JUS.L.N1.003 i ISO 1219. Izlaže se pregled nekih najčešće primenjenih pneumatskih i hidrauličkih uređaja, njihovi grafički simboli, bondgrafovi i odgovarajuće jednačine.

**6. Primeri modeliranja hidrauličkih i pneumatskih sistema**

*Primer 1.*

Hidraulički servomotor (hidraulički cilindar upravljan pomoću razvodnika 5/2) sa modelom bondgrafa - prikazan je na slici 10.

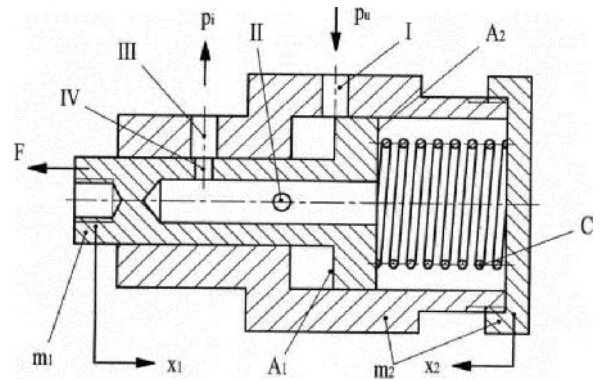
Upravljanje hidrauličkim cilindrom pomoću hidraul. razvodnika 5/2.



Slika 10. Hidraulički servomotor

Tabela 2. - Elementi hidrauličkih i pneumatskih upravljačkih sistema i njihovi bondgrafovi

Naziv elementa	Grafički simbol	Bondgraf	Jednačine
Hidraulička pumpa sa konstantnom radnom zapreminom		$\frac{M}{\omega} \text{ TF } \frac{p}{Q}$	$M = D \cdot \gamma$ $Q = D \cdot \omega$
Hidraulička pumpa sa promenljivom zapreminom		$\frac{M}{\omega} \text{ kT } \frac{p}{Q}$	$M = \alpha \cdot D_0 \cdot p$ $Q = \alpha \cdot D_0 \cdot \omega$
Hidraulički cilindar (motor)		$\frac{p}{Q} \text{ TF } \frac{F}{\dot{x}}$	$F = A \cdot p$ $Q = A \cdot \dot{x}$
Hidraulički i pneumatski ventil (prigušivač, otpornik)		$\frac{p}{Q} \text{ S } \frac{p}{Q}$	$p = c \cdot \mu \cdot Q$ $p = k \cdot Q^2$ $p = c \cdot \mu \cdot Q + k \cdot Q^2$
Hidraulički akumulator		$\frac{p}{V}$	$V = c \cdot p$ $V = c(p) \cdot p$ $V = \frac{V_{\text{max}}}{B} \cdot p$
Kompresor stalne radne zapremine		$\frac{M}{\omega} \text{ TF } \frac{p}{Q}$	$M = k \cdot p$ $\omega = h \cdot Q$
Pneumatski motor stalne radne zapremine sa jednim smerom strujanja		$\frac{p}{Q} \text{ TF } \frac{M}{\omega}$	$p = A \cdot M$ $\omega = A \cdot Q$
Pneumatski motor stalne radne zapremine sa dva smeru strujanja		$\frac{p}{Q} \text{ TF } \frac{M}{\omega}$	$p = A \cdot M$ $\omega = A \cdot Q$
Pneumatski motor promenljive radne zapremine sa jednim smerom strujanja		$\frac{p}{Q} \text{ MTF } \frac{M}{\omega}$	$p = k \cdot A \cdot M$ $\omega = k \cdot A \cdot Q$
Pneumatski motor promenljive radne zapremine sa dva smeru strujanja		$\frac{p}{Q} \text{ MTF } \frac{M}{\omega}$	$p = k \cdot A \cdot M$ $\omega = k \cdot A \cdot Q$
Pneumatski cilindar dvostranog dejstva		$\frac{p}{Q} \text{ TF } \frac{F}{\dot{x}}$	$F = A \cdot p$ $Q = A \cdot \dot{x}$
Pneumatski skumulotor		$\frac{p}{V}$	$V = c \cdot p$



$p_u$  - pritisak vazuha na ulazu u vibrator

$p_i$  - pritisak vazuha na izlazu

I, II, III i IV - kanali za prolaz vazduha

$A_1$  - unutrašnja površina klipa

$A_2$  - spoljašnja površina klipa

$m_1$  - masa klipa

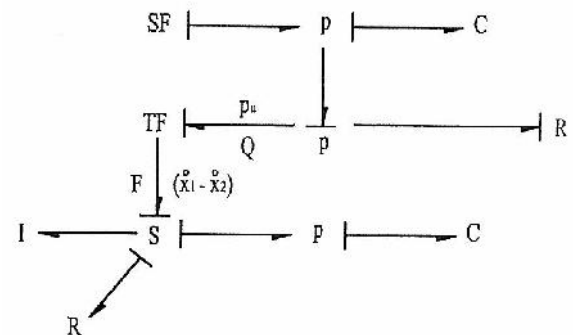
$m_2$  - masa tela vibratora

C - karakteristika opruge

$x_1$  - pomeraj klipa vibratora

$x_2$  - pomeraj tela vibratora

F - udarna sila



Slika 11. Pneumatski vibrator i njegov bondgraf

**Primer 2.**

Pneumatski vibrator i odgovarajući bondgraf prikazani su na slici 11.

### 7. Tablica osnovnih elementarnih bondgrafova

Tabela 3. Tablica osnovnih elementarnih grafova

Veze i spojevi

Grafički prikaz	Opis	Jednačina
	Prosta veza	
	Fluks snage $\overset{0}{E}$	
	Uzročnik sila pritiska u desno, tačka protoka u levo	
	Spoj ječne promenljive $e$ ili $f$ zvezdastar	

Elementi sa jednom vezom (jednokanalni)

Grafički prikaz	Opis	Jednačina
	R - element rasipane ili potrošnja (snage) $\overset{0}{E}$	$e = Rxf$ $f = \frac{e}{R}$
	C - element skladištenje energije $\overset{0}{E}$	$e = \frac{1}{C} \int x f dt$ $f = C \frac{de}{dt}$
	I - element	$f = \frac{1}{I} \int x e dt$ $e = I \frac{df}{dt}$
	skladište E izvor sile snabdevanje	$e = e(t)$
	izvor protoka napajanje (snage) $\overset{0}{E}$	$f = f(t)$

Elementi sa dve veze (dvokanalni)

Grafički prikaz	Opis	Jednačina
	Pretvarači (moduliranje)	$e_2 = r e_1$
	Održanje snage $\overset{0}{E}$	$f_1 = r f_2$
	Žirator (moduliranje)	$e_2 = r f_1$
	Održanje $\overset{0}{E}$	$e_1 = r f_2$

Elementi sa tri veze (trokanalni)

Grafički prikaz	Opis	Jednačina
	Paralelna veza (spoj) - P - takođe označava održanje energije $\overset{0}{E}$	$e_1 - e_2 = e_3$ $f_1 + f_2 + f_3 = 0$
	Serijska veza (spoj) - S - takođe označava održanje energije $\overset{0}{E}$	$e_1 = e_2 = e_3 = 0$ $f_1 = f_2 = f_3$

Ostali elementi

Grafički prikaz	Opis	Jednačina
	C - polje rezervoar energije $\overset{0}{E}$	$e_1 = f_{01}(q_1, q_2)$ $e_2 = f_{02}(q_1, q_2)$
	I - polje rezervoar energije $\overset{0}{E}$	$f_1 = f_{11}(p_1, p_2)$ $f_2 = f_{12}(p_1, p_2)$
	R - polje potrošnja energije $\overset{0}{E}$	$e_1 = f_{01}(f_1, f_2)$ $e_2 = f_{02}(f_1, f_2)$
	RS - polje održanje $\overset{0}{E}$ , generiranje ireverzibilne entropije	$\overset{0}{S} = \frac{ef}{T}$

### 8. Zaključak

Grafoanalitičke metode, poput bondgrafova, pogodni su matematički aparati koji se mogu koristiti za modeliranje, simulaciju i analizu različitih sistema. Bondgrafovi su grafičke mreže namenjene za grafičko prikazivanje. S obzirom da za formiranje bondgrafova nisu potrebna neka posebna teorijska znanja, mogu se lako primenjivati. Zahvaljujući i savremenim računarskim programima, ova metoda je postala efikasna sa širokim mogućnostima aplikacije.

U ovom radu izloženo je nekoliko karakterističnih primera formiranja bondgrafova za simulaciju tehničkih sistema: kretanje automobila, električni elementi i kola, hidraulički servomotor, pneumatski vibrator. Priložene tablice elementarnih bondgrafova upućuju na mogućnost primene i u drugim oblastima poput: sistema upravljanja, termičkih sistema, proizvodno-poslovnih sistema. U odnosu na neke druge grafičke metode za opisivanje i simulaciju (grafičke šeme, blok dijagrami, tehnički crteži, grafovi), metoda bondgrafova ima svojih prednosti jer je formiranje modela jednostavno, apstraktnost opisivanja je zadovoljavajuća, a oblasti primene nisu ograničene.

### Bibliografija

- 1) Ran i M., Pozidaeva V., Živković D. "Modeliranje pneumatskih upravljačkih sistema pomoću bondgrafova", Zbornik radova, HIPNEF, SMEITS, Vrnjaka Banja, 2006. god.
- 2) Ran i M., Živković D., Mulić V. "Modeliranje hidrauličkih sistema pomoću bondgrafova", Zbornik radova, HIPNEF, SMEITS, Vrnjaka Banja, 2004. god.
- 3) Thoma J. "Simulation by Bondgraphs", Springer-Verlag, Berlin, New York, London, Paris, 1990.

### Istorija rada:

Rad primljen: 09.10.2014.

Prva revizija: 18.10.2014.

Prihvatačen: 14.11.2014.