YU — ISSN 0039-2480

STROJNIŠKI VESTNIK

LETNIK 32 LJUBLJANA, JANUAR—MAREC 1986 ŠTEVILKA 1—3

UDK 62—501.72

Modeliranje sistemov in povezovalni grafi

ALOJZ HUSSU

1. MODELIRANJE

Eden osrednjih problemov pri tehnični kibernetiki je problem sinteze; to je na osnovi postavljenih meril in zahtev narediti nov sistem tako (ali spremeniti oziroma dopolniti nek že znan sistem), da bo njegovo obnašanje čimbolj ustrezalo zahtevam. Želeno obnašanje zaradi različnih omejitev ni vedno dosegljivo, često je potrebna srednja pot. Osnova za rešitev problemov sinteze je dobro poznavanje zahtev, kaj hočemo in kaj pričakujemo od sistema. Merila, s katerimi ocenjujemo, kako sistem izpolnjuje zahteve, so seveda stvar znanja, presoje, samih zahtev, okusa, mode itd., tj. parametrov, ki jih je včasih težko izraziti s številkami.

Sinteza sistemov ni enovita, obstaja veliko metod, odvisna je od znanja, pa tudi drugih parametrov: časa, denarja, od tega, kakšne so zahteve in kako so postavljene, od pripomočkov, ki so na voljo, od okusa, predsodkov itd.

Zahtevnejše naloge lahko rešujemo po dveh ali več vzporednih poteh, z enakimi ali različnimi metodami. Če dobimo več različnih rešitev, se zastavlja vprašanje, katera je boljša?

Če so merila oz. zahteve bolj ohlapno definirane, lahko pri sintezi nekatere parametre bolj ali manj svobodno izbiramo. Katere vrednosti izbrati?

Primerjavo in izbiro različnih vrednosti parametrov, različic oziroma rešitev je lahko izpeljati, če primerjamo številke. To pa je mogoče tedaj, če merila za ocenjevanje dajo številčne rezultate. Da jih dobimo, moramo imeti številčne podatke. Te lahko dobimo:

— z meritvami na dejanskem sistemu,
— z meritvami na modelu sistema,
— z reševanjem enačb matematičnega modela.

Prva različica predpostavlja, da je dejanski sistem na voljo. Drugi dve terjata model sistema. Modeli sistemov so različnih tipov:

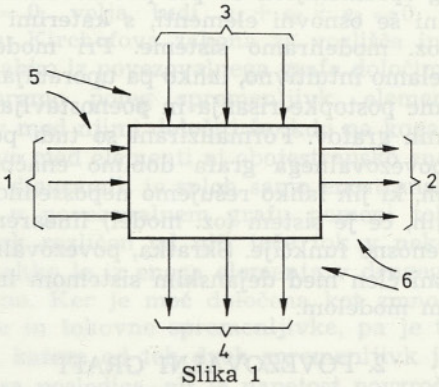
— ikonski, analogni, simbolični.

Tu se bomo omejili na simbolične — matematične modele.

Predpostavljamo, da je sistem opisan s sistemom enačb, iz katerih lahko ugotovimo, kako se v danih razmerah sistem obnaša. Če to lahko ugotovimo, je pot do sinteze sistema z želenim obnašanjem bistveno skrajšana.

Kako dobimo matematične modele? Sistem si zamislimo kot škatlo, ki ima dve vrsti vhodov in dve vrsti izhodov (sl. 1).

Matematični model naj poveže krmilne vhode z izhodi. Enačbe, ki povezujejo vhode z izhodi dobimo na podlagi *teorije* ali s *preizkusi*.



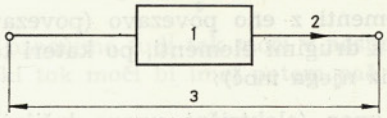
Slika 1

1 — krmilni vhodi, 2 — izhodi, 3 — zunanji vplivi na sistem — nekontrolirani vhodi (npr. motnje, spreminjanje parametrov sistema, spreminjanje karakteristik vhodnih signalov), 4 — vmesne spremenljivke, 5 — neodvisne spremenljivke, 6 — odvisne spremenljivke

Če imamo dinamične sisteme, so med enačbami tudi diferencialne enačbe. Kakšne so sploh povezave med vhodi in izhodi oz. na splošno med spremenljivkami?

Sistem si zamislimo sestavljen iz podsistemov, vsak podsistem pa še posebej naprej sestavljen iz podsistemov in tako naprej, dokler ne pridemo do osnovnih elementov, ki jih več ne delimo. Posamezni elementi vplivajo medsebojno drug na drugega, bodisi fizikalno, kemično, ali kako drugače. Zakoni o ohranitvi mase, energije, itd. omogočajo zapis enačb za medsebojne vplive. Če se omejimo na mehanske, električne, hidravlične, pnevmatske in toplotne sisteme, lahko posplošeno govorimo o treh vrstah spremenljivk, o

— napetostnih,
— tokovnih in
— količinskih spremenljivkah (sl. 2).



Slika 2

1 — element — količinska spremenljivka (lastnost elementa), 2 — tokovna spremenljivka, 3 — napetostna spremenljivka

Količinski spremenljivki sta pravzaprav dve, obe sta povezani z energijo v sistemu. Ena je povezana z napetostno spremenljivko (in določa potencialno energijo), druga pa s tokovno spremenljivko (in določa kinetično energijo).

V nadaljevanju si bomo ogledali modeliranje sistemov s povezovalnimi grafi, ki so primerni za modeliranje prej omenjenih sistemov in torej zelo primerni za področje strojništva, kjer često naletimo na sisteme, ki vključujejo podsisteme z raz-

ličnih področij (npr. toplarna: mehanski sistem + toplotni sistem + kemični sistem + električni sistem itd.). Osnovni spremenljivki (napetostna in tokovna, s katerima opišemo povezavo med dvema elementoma) sta definirani tako, da njun zmnožek pomeni moč. V povezovalnih grafih potem prikazujemo tok moči (to je energije) med elementi.

Poleg spremenljivk so pri povezovalnih grafih definirani še osnovni elementi, s katerimi sestavljamo oz. modeliramo sisteme. Pri modeliranju lahko delamo intuitivno, lahko pa uporabljamo formalizirane postopke risanja in poenostavljanja povezovalnih grafov. Formalizirani so tudi postopki, da iz povezovalnega grafa dobimo enačbe stanj za sistem, ki jih lahko rešujemo neposredno, lahko pa iz njih, če je sistem (oz. model) linearen, določimo prenosne funkcije. Skratka, povezovalni grafi so vmesni člen med dejanskim sistemom in matematičnim modelom.

2. POVEZOVALNI GRAFI

2.1. Spremenljivke povezovalnih grafov

V razpredelnici 1 so podane spremenljivke, ki jih uporabljamo v povezovalnih grafih na posameznih področjih. Kakor je že omenjeno, imamo spremenljivki za napetost e in tok f in dve, ki sta povezani z energijo, premik q ($q = \int f\,dt$) in moment p ($p = \int e\,dt$).

Pri toplotnih sistemih so običajno v rabi za modeliranje spremenljivke T, Q in H, absolutna temperatura T kot napetostna spremenljivka, toplotni tok Q kot tokovna. Njun zmnožek pa ni moč, saj je že Q (toplotni tok) sam po sebi moč. Vendar lahko kljub temu uporabljamo povezovalne grafe. Problem nastane, če imamo toplotni sistem povezan z drugimi sistemi in ne moremo spremljati toka moči. V takih primerih moramo upoštevati spremenljivke T in $\dot{S}$.

Sedaj, ko smo spoznali spremenljivke, si poglejmo še elemente, ki jih uporabljamo pri modeliranju s povezovalnimi grafi. Da si jih laže zapomnimo, jih razdelimo v skupine:

— Elementi z eno povezavo (povezava je vez elementa z drugimi elementi, po kateri teče v element ali iz njega moč):

$\frac{e}{f}R$ — upor (električni upor, dušilni element, trenje...)

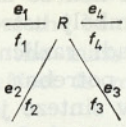
$\frac{e}{f}R$ — kondenzator (električni kondenzator, vzmet, akumulacija tekočine)

$\frac{e}{f}I$ — vztrajnik (induktivnost, masa, vztrajnik, ...)

R, C in I elementi so z eno samo povezavo povezani z drugimi elementi.

Povezavo označimo s črto (povzeto iz kemije: povezava med atomi v molekuli). K povezavi pripadata napetostna spremenljivka e in tokovna spremenljivka f. Če ju pišemo, napišemo napetostno spremenljivko nad črto — povezavo oz. desno, če je povezava navpična.

Včasih imajo R, C in I elementi tudi več povezav (glej sliko 3).



Slika 3

Govorimo o polju R, polju C in polju I. Npr. element R ima dve povezavi, če ga ne obravnavamo kot porabnika energije, temveč kot pretvornik, ki npr. električno moč pretvarja v toplotno in je na eni strani dovod električne moči v element R, na drugi strani pa odvod toplotne moči iz elementa R.

Element R povezuje spremenljivki e in f s povezavo $e = \Phi_R(f)$, če pa je povezava med e in f linearna, smemo pisati $e = R\,f$.

Element C povezuje spremenljivki q in e, velja $q = \Phi_C(e)$; če je povezava med q in e linearna, pišemo $q = C\,e$.

Element I povezuje spremenljivki p in f, velja $p = \Phi_I(f)$; če je povezava med p in f linearna, pišemo $p = I\,f$.

Ker velja, da je energija integral moči, dobimo

$$E(t) = \int p(t)\,dt = \int e\,f\,dt =$$
$$= \int e\,dq, \quad \text{ker velja } f\,dt = d\,q$$
$$= \int f\,dp, \quad \text{ker velja } e\,dt = d\,p$$

oziroma pri linearnih odvisnostih med q in e oziroma med p in f:

$$E(t) = \int e\,dq = \int \frac{q}{C}\,dq = \frac{q^2}{2C} \quad \text{(potencialna energija)}$$

$$E(t) = \int f\,dp = \int \frac{p}{I}\,dp = \frac{p^2}{2I} \quad \text{(kinetična energija)}$$

Elementa z eno povezavo sta še napetostni vir S_e in tokovni vir S_f.

Napetostni vir $S_e \frac{e}{f}$ (npr. električna baterija, gravitacija, ...).

Tokovni vir $S_f \frac{e}{f}$

Razpredelnica 1

Spremenljivke	Področja				
	Elektronika	Mehanska translacija	Rotacija	Hidravlika	Termodinamika
napetost e	napetost u	sila F	moment M	tlak p	abs. temperatura T (abs. temperatura T)
tok f	tok i	hitrost v	kotna hitrost ω	prostornina V	tok entropije $\dot{S}$ (toplotni tok Q)
premik $q = \int f\,dt$	naboj q	premik x	zasuk φ	pretok q, $\dot{V}$	entropija S (toplota $H = \int Q dt$)
moment $p = \int e\,dt$	napetostni pulz	sunek sile	sunek momenta	n.n.	n.n. (n.n.)

Elementi z dvema povezavama: V tej skupini sta dva elementa:

transformator $\frac{e_1}{f_1} \overset{n}{TF} \frac{e_2}{f_2}$

in žirator* $\frac{e_1}{f_1} \overset{r}{GY} \frac{e_2}{f_2}$

Po eni povezavi v element doteka moč (pri napetosti e_1 in toku f_1), po drugi povezavi moč iz elementa odteka (pri napetosti e_2 in toku f_2). Moč se v elementu ne akumulira in mora vedno veljati

$$e_1 f_1 = e_2 f_2$$

Za transformator TF še velja

$$e_1 = n\, e_2 \text{ oz. } f_1 = \frac{1}{n} f_2$$

n — modul transformatorja

za žirator GY pa velja

$$e_1 = r\, f_2 \text{ oz. } f_1 = \frac{1}{r} e_2$$

r — modul žiratorja.

Pojem transformatorja je znan iz elektrotehnike, v mehaniki pa s transformatorjem modeliramo npr. vzvod ali pa zobniške prenose (prestave). Žirator je nenavaden samo po imenu (izvor pri žiroskopu), sicer pa z njim modeliramo elemente, ki jih pogosto srečujemo, zlasti pri pretvarjanju energij npr. iz mehanske v električno (dinamo) ali obratno (elektromotor). Dinamo npr. modeliramo takole (brez izgub):

$$\frac{M}{\omega} \overset{r}{GY} \frac{u}{i} \text{ in velja } u = r\,\omega$$

(napetost sorazmerna hitrosti vrtenja)

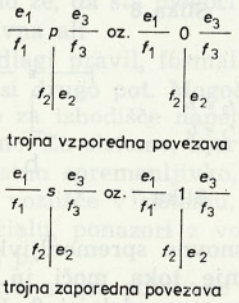
$$\text{in } i = M/r$$

(zaradi ohranitve moči, ker velja $M\,\omega = u\,i$).

Žiratorje najdemo tudi pri tipalih (tudi pretvarjanje).

— Elementi z dvema in več povezavami:

To so elementi, ki jih uporabljamo za povezavo doslej naštetih elementov (R, C, I, TF, G, S_e in S_f). Povezujemo jih na dva načina; vzporedno (paralelno) z elementom p (oziroma 0) in zaporedno (serijsko) z elementom s (oziroma 1) (sl. 4).



Slika 4

* Iz angl. gyrator.

Vzporedni povezovalni element (tudi vozlišče p) ima za vse povezave, ki jih povezuje, skupno napetostno spremenljivko, torej $e_1 = e_2 = e_3$. Ker se energija v elementu p ne kopiči, velja $e_1 f_1 + e_2 f_2 + e_3 f_3 = 0$, oba pogoja skupaj pa dasta $f_1 + f_2 + f_3 = 0$ (ker je napetost skupna). Za serijski povezovalni element (vozlišče s, element s) velja $f_1 = f_2 = f_3$, ker velja tudi $e_1 f_1 + e_2 f_2 + e_3 f_3 = 0$, velja tudi $e_1 + e_2 + e_3 = 0$. To sta v bistvu Kirchofova zakona za vozlišča in zanke.

Da lahko iz povezovalnega grafa določimo enačbe, moramo poleg spremenljivk, elementov in povezav med njimi določiti še, kdo na koga vpliva. Povezava med elementi ni obojestransko enaka (pri bločnih diagramih je sploh samo enostranska). Povezava v povezovalnem grafu pomeni tok moči; če je tok različen od nič, teče tok v nekem trenutku lahko le iz enega elementa v drugega in ne nasprotno. Ker je moč določena kot zmnožek napetostne in tokovne spremenljivke, pa je tudi zanimivo, katera od teh dveh spremenljivk je vzrok in katera posledica, ali je napetost povzročila tok, ali je tok povzročil napetost (vzročnost). Za določevanje enačb je to bistvenega pomena in je treba tudi te stvari (smer toka moči na posameznih povezavah in vzročnost) označiti v povezovalnih grafih. Tok moči označimo s polovično puščico. Npr. električna baterija in upor sta zvezana vzporedno. Ustrezni povezovalni graf je

$$S_e \frac{u_1}{i_1} p \frac{u_2}{i_2} R$$

S_e je izvor napetosti, električna baterija.

Ker ima p element samo dve povezavi, smemo graf poenostaviti, tako da element p opustimo (ker je $u_1 = u_2$ in $i_1 = i_2$). Dobimo

$$S_e \frac{u}{i} R$$

Tok moči teče očitno iz baterije v upor, smer označimo s polovično puščico

$$S_e \xrightarrow[i]{u} R$$

Lahko označimo tudi tok moči v nasprotni smeri, dejanski tok moči bi imel potem pač negativen predznak.

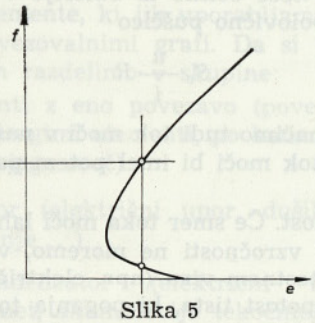
Še vzročnost. Če smer toka moči lahko poljubno izbiramo, pa vzročnosti ne moremo, vsaj ne vedno. Pri napetostnem viru (npr. električna baterija) je gotovo napetost tista, ki poganja tok in ne nasprotno. V našem primeru je torej uporu R napetost vsiljena, tok je pa posledica. Odločimo se, da na povezavah označujemo mesta, kjer je napetost vsiljena. Mesto na povezavi, kjer je napetost vsiljena, označimo s kratko črto, pravokotno na povezavo. V našem primeru torej

$$S_e \xrightarrow[i]{u} \mid R$$

Z označevanjem vzročnosti odpade nejasnost, ki se pogosto pojavlja v modelih, ko pri neki spremenljivki ne vemo, kaj pomeni. Npr. motor vrti neko breme. Na gredi označimo moment, potem pa ne vemo, kateri moment je to, ali tisti, ki ga daje motor, ali tisti, ki ga povzroča breme. Z označitvijo vzročnosti ta nejasnost odpade.

Pri načrtovanju krmilnih sistemov radi poenostavljamo, da so problemi laže rešljivi, če sploh so. Tako npr. pri povezavah včasih zanemarimo eno od spremenljivk, včasih namenoma, da poenostavimo, včasih, ker je zelo majhna. Taka spremenljivka je lahko napetost e ali tok f. Če je ena od njiju zanemarljiva in druga ni pretirano velika, je tudi moč (to je njun zmnožek) zanemarljiva. Toka moči torej na tisti povezavi ni, vendar povezave ne smemo opustiti, ker se vpliv še vedno prenaša, čeprav brez moči (oz. zanemarljivo). V takih primerih povezavo (smer vpliva) označimo s polno puščico (kakor v bločnih diagramih, kjer predpostavimo, da se med bloki ne pretaka energija, samo vpliv). Govorimo o aktivnih povezavah. Z aktivnimi povezavami lahko vplivamo na vse elemente, napetostne in tokovne vire, na module transformatorjev in žiratorjev, na elemente R, C in I. Elementa p in s pa s tem nimata kaj opraviti. Oziroma v posebnih primerih tudi ta, če imamo recimo spremenljive sisteme, ki imajo preklopnike, ki predstavljajo neko resnično napravo ali pa samo model nekega fenomena (fizikalnega ali kemičnega).

Pri označevanju vzročnosti (če jo lahko izbiramo) moramo upoštevati lastnosti posameznih elementov. Tako ima npr. nek element R (npr. trenje) enolično povezavo med spremenljivkama f in e in mnogolično povezavo med e in f (sl. 5). Tu vsaki vrednosti f ustreza ena vrednost e, vsaki vrednosti e pa ena ali dve vrednosti f. V takem primeru bi imeli raje tok f kot vzrok in napetost e kot posledico, ne pa nasprotno.



Slika 5

Element C smo definirali kot element, ki povezuje spremenljivki e in q (preko funkcije Φ_c). Če je linearna odvisnost, velja $q = C\,e$ oziroma $\int f\,dt = C\,e$.

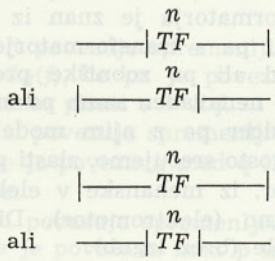
Če gledamo povezavo med e in f, vidimo, da je e izražena z integralom spremenljivke f: $e = 1/C \int f\,dt$, če pa nas zanima f, moramo enačbo odvajati in dobimo $f = C\,de/dt$.

Podobno velja za elemente I. Tako lahko z izbiro vzročnosti dobimo integralne ali diferencialne enačbe, oziroma govorimo o integralni in diferencialni vzročnosti. Za element C dobimo integralno vzročnost, če je f vsiljena, za element I pa dobimo integralno vzročnost, če je e vsiljena.

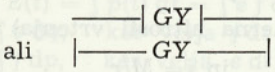
Najvišja stopnja odvoda v diferencialni enačbi, s katero opišemo obnašanje sistema, določa red sistema. Red sistema lahko določimo neposredno iz povezovalnega grafa.

Red sistema je enak številu elementov C in I, če imajo vsi elementi C in I integralno vzročnost ali vsi diferencialno vzročnost. Če nimajo vsi iste vzročnosti, je red sistema manjši za razliko med elementi z eno in drugo vzročnostjo.

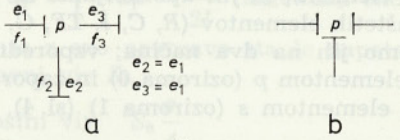
Elementi TF, GY, p in s vnašajo določene omejitve pri označevanju vzročnosti. Pri virih že sam vir odloča, ali je definirana napetost, ali tok. Transformator TF ima dve povezavi, če je na eni povezavi določena napetost, je tudi na drugi (saj velja $e_2 = (1/n)\,e_1$) oziroma, če je na prvi povezavi določen tok, je določen tudi na drugi ($f_2 = n\,f_1$). Torej velja



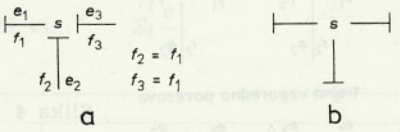
Za žirator pa na podlagi definicijskih enačb velja prav nasprotno



Element p sme imeti samo eno povezavo, kjer je določena napetost, element s samo eno povezavo, kjer je določen tok. Npr. po sliki 6 a in ne npr. po sliki 6 b oz. npr. po sliki 7 a in ne npr. po sliki 7 b.

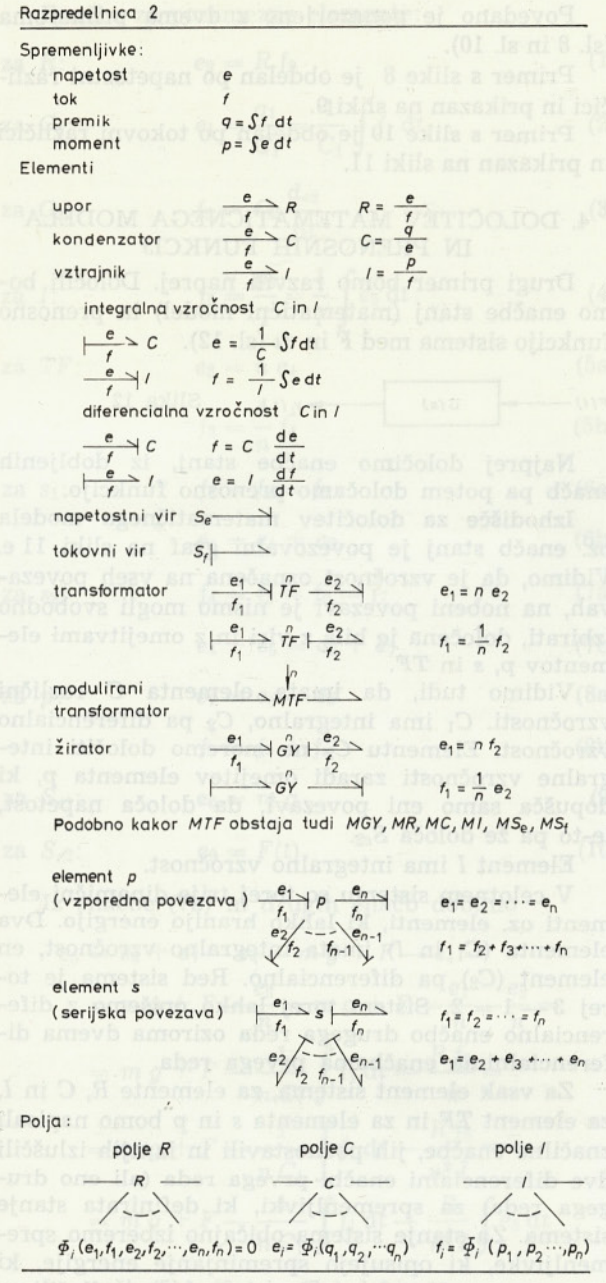


Slika 6



Slika 7

Spoznali smo osnovne spremenljivke, osnovne elemente, označevanje toka moči in vzročnosti. Povzetek najdemo v razpredelnici 2. Kako se lotimo risanja povezovalnih grafov?



3. RISANJE IN POENOSTAVLJANJE POVEZOVALNIH GRAFOV

Dejali smo že, da sta mogoči dve poti:

— intuitivna ali

— na podlagi pravil, formalizirana.

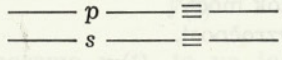
Oglejmo si drugo pot. Mogoči sta dve različici, ali vzamemo za izhodišče napetostno spremenljivko ali tokovno. Za sisteme, kjer vzamemo za izhodišče napetostno spremenljivko, veljajo pravila:

a. Vsako vozlišče v sistemu, ki ustreza določenemu potencialu, ponazori z vozliščem p oziroma z elementom p.

b. Elemente z eno povezavo poveži z vozliščem s in vstavi med ustrezne dvojice vozlišč p. Dodaj še druge elemente.

c. Opusti v grafu vozlišče p, ki ima potencial 0 (ni pretoka moči, ker je $e = 0$), oziroma eno od poljubnih vozlišč p (najbolje tisto z največjim številom povezav, kar vodi do največjih poenostavitev) in pripadajoče povezave.

č. Poenostavi graf povezav

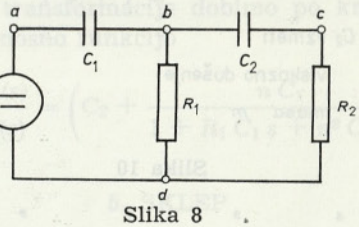


d. Označi tok moči (praviloma iz virov, v elemente z eno povezavo, skozi elemente TF in GY, poljubno (npr. v desno)).

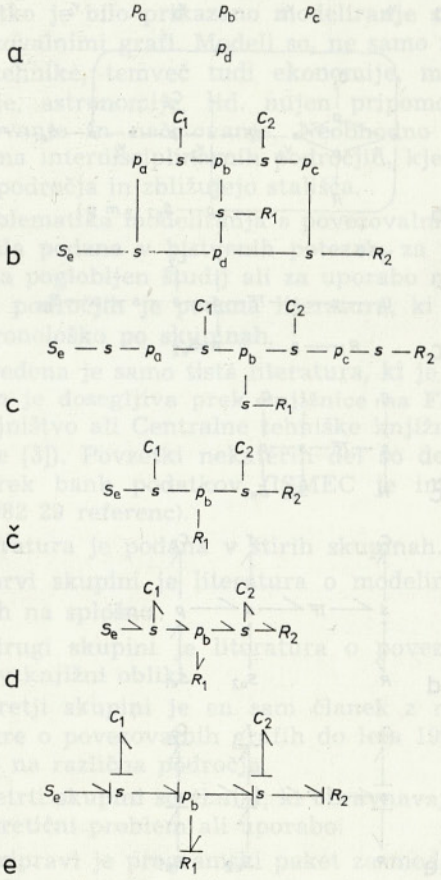
e. Označi vzročnost (viri, integralna vzročnost na elementih C in I, omejitve elementov TF in GY, omejitve elementov p in s, omejitve podsistemov, poljubno).

Analogno velja, če si za izhodišče vzamemo tokovno spremenljivko:

a. Vsako točko v sistemu, ki ustreza določeni tokovni spremenljivki, ponazori z elementom s.



Slika 8



Slika 9

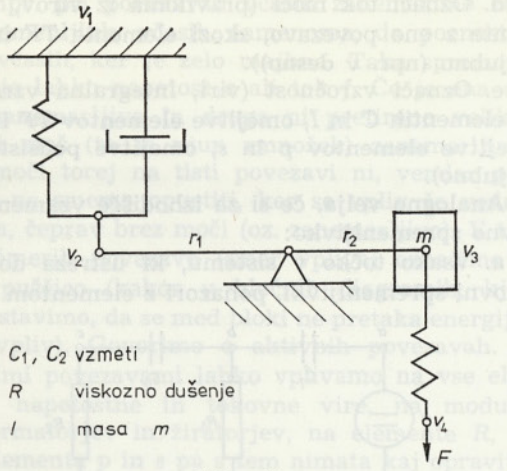
b. Druge elemente poveži neposredno na vozlišča s ali z elementi p med ustrezne dvojice vozlišč s.

c. Opusti v grafu vozlišče s, ki ustreza toku 0 ($f = 0$) in pripadajoče povezave.

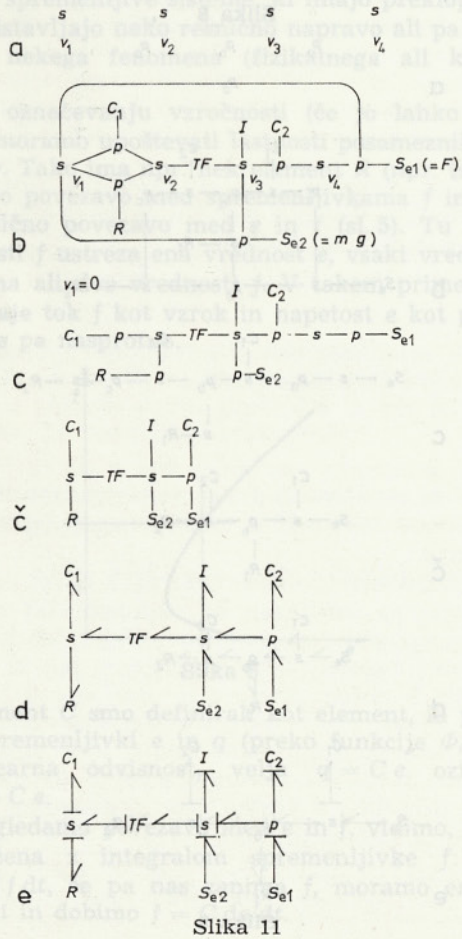
č. Poenostavi graf.

d. Označi tok moči.

e. Označi vzročnost.



Slika 10



Slika 11

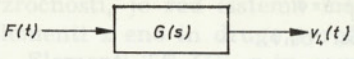
Povedano je ponazorjeno z dvema primeroma (sl. 8 in sl. 10).

Primer s slike 8 je obdelan po napetostni različici in prikazan na sliki 9.

Primer s slike 10 je obdelan po tokovni različici in prikazan na sliki 11.

4. DOLOČITEV MATEMATIČNEGA MODELA IN PRENOSNIH FUNKCIJ

Drugi primer bomo razvili naprej. Določili bomo enačbe stanj (matematični model) in prenosno funkcijo sistema med F in v_4 (sl. 12).



Slika 12

Najprej določimo enačbe stanj, iz dobljenih enačb pa potem določamo prenosno funkcijo.

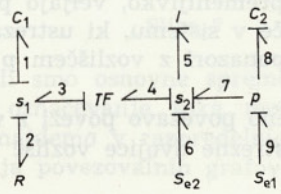
Izhodišče za določitev matematičnega modela oz. enačb stanj je povezovalni graf na sliki 11 e. Vidimo, da je vzročnost označena na vseh povezavah, na nobeni povezavi je nismo mogli svobodno izbirati, določena je bila z viri in z omejitvami elementov p, s in TF.

Vidimo tudi, da imata elementa C različni vzročnosti. C_1 ima integralno, C_2 pa diferencialno vzročnost. Elementu C_2 ne moremo določiti integralne vzročnosti zaradi omejitev elementa p, ki dopušča samo eni povezavi, da določa napetost, le-to pa že določa S_{e2}.

Element I ima integralno vzročnost.

V celotnem sistemu so torej trije dinamični elementi oz. elementi, ki lahko hranijo energijo. Dva elementa (C_1 in I) imata integralno vzročnost, en element (C_2) pa diferencialno. Red sistema je torej $3 - 1 = 2$. Sistem torej lahko opišemo z diferencialno enačbo drugega reda oziroma dvema diferencialnima enačbama prvega reda.

Za vsak element sistema, za elemente R, C in I, za element TF in za elementa s in p bomo napisali značilne enačbe, jih poenostavili in iz njih izluščili dve diferencialni enačbi prvega reda (ali eno drugega reda) za spremenljivki, ki definirata stanje sistema. Za stanje sistema običajno izberemo spremenljivke, ki opisujejo spreminjanje energije, ki je v sistemu. V našem primeru se bomo odločili za napetostno spremenljivko na elementu I in za tokovno spremenljivko elementa C_1. Da bomo laže pisali enačbe, bomo povezave oštevilčili. i-ta povezava ima napetostno spremenljivko e_i in tokovno f_i. Transformator ima razmerje oziroma modul n (določen z razmerjem ročic r_1 in r_2). Ker imamo dva elementa s, ju oštevilčimo, tako dobimo s_1 in s_2 (sl. 13).



Slika 13

Enačbe za posamezne elemente:

za R: $$e_2 = R f_2 \tag{1}$$

za C_1: $$e_1 = \frac{q_1}{C_1} = \frac{1}{C_1}\int f_1 \, dt \tag{2}$$

za C_2: $$f_8 = C_2 \frac{d_{e8}}{dt} \tag{3}$$

za I: $$f_5 = \frac{p_5}{I} = \frac{1}{I}\int e_5 \, dt \tag{4}$$

za TF: $$e_3 = n\, e_4 \tag{5a}$$

$$f_3 = \frac{1}{n} f_4 \tag{5b}$$

za s_1: $$f_1 = f_2 = f_3 \tag{6a}$$

$$e_3 = e_1 + e_2 \tag{6b}$$

za s_2: $$f_4 = f_5 = f_6 = f_7 \tag{7a}$$

$$e_4 + e_5 = e_6 + e_7 \tag{7b}$$

za p: $$e_7 = e_8 = e_9 \tag{8a}$$

$$f_9 = f_7 + f_8 \tag{8b}$$

za S_{e1}: $$e_6 = m\, g \tag{9}$$

za S_{e2}: $$e_9 = F(t) \tag{10}$$

Iz enačbe (7b) in drugih enačb dobimo

$$e_5 = e_6 + e_7 - e_4 = m\, g + F - e_4 =$$

$$= m\, g + F - \frac{e_3}{n} = m\, g + F - \frac{e_1}{n} - \frac{e_2}{n} =$$

$$= m\, g + F - \frac{1}{n\, C_1}\int f_1 \, dt - \frac{R\, f_2}{n} =$$

$$= m\, g + F - \frac{1}{n\, C_1}\int f_1 \, dt - \frac{R\, f_5}{n^2\, I} =$$

$$= m\, g + F - \frac{1}{n\, C_1}\int f_1 \, dt - \frac{R}{n^2\, I}\int e_5 \, dt$$

Iz enačb (5b), (6a) in (7a) dobimo

$$f_5 = n\, f_1$$

Iz pravkar dobljene enačbe in iz enačbe (4) pa dobimo

$$f_1 = \frac{1}{n\, I}\int e_5 \, dt$$

Dobili smo sistem dveh integralnih enačb, ki opisujeta stanje sistema.

$$e_5 = m\, g + F - \frac{1}{n\, C_1}\int f_1 \, dt - \frac{R}{n^2\, I}\int e_5 \, dt$$

$$f_1 = \frac{1}{n\, I}\int e_5 \, dt$$

Če enačbi odvajamo, dobimo sistem dveh diferencialnih enačb. Za simuliranje na računalnikih pa sta integralni obliki primernejši.

Določimo še prenosno funkcijo

$$G(s) = \frac{v_4(s)}{F(s)}$$

Določiti moramo $v_4(t)$, to pa je f_9. Iz enačbe (8b) dobimo

$$f_9 = f_7 + f_8 = n\, f_1 + f_8 = n\, f_1 + C_2 \frac{d_{e8}}{dt} =$$

$$= n\, f_1 + C_2 \frac{dF(t)}{dt}$$

f_9 je torej funkcija f_1 in $F(t)$ (njenega odvoda).

Določiti moramo še f_1, *ker* $F(t)$ mora biti znan. f_1 dobimo iz enačb stanj. Iz enačb stanj lahko izločimo spremenljivko e_5 in določimo f_1. Z uporabo Laplaceove transformacije dobimo po krajšem izvajanju prenosno funkcijo

$$G(s) = \frac{v_4(s)}{F(s)} = \left(C_2 + \frac{n\, C_1}{1 + R_1\, C_1\, s + n^2\, C_1\, I\, s^2}\right) s$$

5. SKLEP

Kratko je bilo prikazano modeliranje sistemov s povezovalnimi grafi. Modeli so, ne samo na področju tehnike, temveč tudi ekonomije, medicine, biologije, astronomije, itd. nujen pripomoček za razumevanje in načrtovanje. Neobhodno so potrebni na interdisciplinarnih področjih, kjer povezujejo področja in zbližujejo stališča.

Problematika modeliranja s povezovalnimi grafi je bila podana v bistvenih potezah, za podrobnosti, za poglobljen študij ali za uporabo na posameznih področjih je podana literatura, ki je urejena kronološko po skupinah.

Navedena je samo tista literatura, ki je bila na voljo in je dosegljiva prek knjižnice na Fakulteti za strojništvo ali Centralne tehniške knjižnice (izjema je [3]). Povzetki nekaterih del so dosegljivi tudi prek bank podatkov (ISMEC je imel npr. 5. 2. 1982 29 referenc).

Literatura je podana v štirih skupinah.

V prvi skupini je literatura o modeliranju in sistemih na splošno.

V drugi skupini je literatura o povezovalnih grafih v knjižni obliki.

V tretji skupini je en sam članek z navedbo literature o povezovalnih grafih do leta 1976, razdeljeno na različna področja.

V četrti skupini so članki, ki obravnavajo določen teoretični problem ali uporabo.

V pripravi je programski paket za modeliranje in simuliranje sistemov s povezovalnimi grafi.

LITERATURA

trans = Transactions of the ASME, Journal of dynamic systems, Measurement, and Control.

[1] H. Chestnut, Systems engineering tools, John Wiley & Sons, 1966.

[2] L. Gyergyek, Teorija vezij in sistemov, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, 1978.

[3] H. M. Paynter, Analysis and design of engineering systems, MIT Press, Cambridge, Mass., 1961.

[4] R. C. Rosenberg, A user's guide to Enport-4, John Wiley & Sons, July 1974.

[5] D. Karnopp, R. Rosenberg, System dynamics: a unified approach, John Wiley & Sons, 1975.

[6] J. U. Thoma, Introduction to bond graphs and their applications, Pergamon Press, Oxford, 1975.

[7] P. E. Wellstead, Introduction to physical system modelling, Academic Press, 1979.

[8] V. D. Gebben, Bond graph bibliography for 1961—1976, trans, Vol. 99, series G, No. 2, jun. 1977, 9—14.

[9] R. C. Rosenberg, State-space formulation for bond graph models of multiport systems, trans, Vol. 93, series G, No. 1, mar. 1971, 35—40.

[10] J. U. Thoma, Bond graphs fo thermal energy transport and entropy flow, J. of the Franklin Institute, Vol. 292, No. 2, Aug. 1971, 109—120.

[11] R. C. Rosenberg, D. C. Karnopp, A definition of the bond graph language, trans, Vol. 94, series G, No. 3, sep. 1972, 179—182.

[12] H. R. Martens, A. C. Bell, A logical procedure for the construction of bond graphs in systems modeling, trans, Vol. 94, series G, No. 3, sep. 1972, 183—188.

[13] R. C. Rosenberg, Multiport models in mechanics, trans, Vol. 94, series G, No. 3, sep. 1972, 206—212.

[14] F. T. Brown, Lagrangian bond graphs, trans, Vol. 94, series G, No. 3, sep. 1972, 213—221.

[15] G. F. Oster, D. M. Auslander, The memristor: a new bond graph element, trans, Vol. 94, series G, No. 3, sep. 1972, 249—252.

[16] F. T. Brown, Direct application of the loop rule to bond graphs, trans, Vol. 94, series G, No. 3, sep. 1972, 253—261.

[17] J. R. Ort, H. R. Martens, The properties of bond graph junction structure matrices, trans, Vol. 95, series G, No. 4, dec. 1973, 362—367.

[18] J. U. Thoma, Entropy and mass flow for energy conversion, J. of the Franklin Institute, Vol. 299, No. 2, feb. 1975, 89—96.

[19] D. Karnopp, Some bond graph identities involving junction structures, trans, Vol. 97, series G, No. 4, dec. 1975, 439—441.

[20] K. R. Young, L. L. Hoberock, J. G. Thompson, An algorithm for automatic reduction of complex signal flow graphs, trans, Vol. 98, series G, No. 4, dec. 1976, 367—374.

[21] B. W. Barnard, P. Dransfield, Predicting response of a proposed hydraulic control system using bond graphs, trans, Vol. 99, series G, No. 1, mar. 1977. 1—8.

[22] J. J. Dixhoorn, Simulation of bond graphs on minicomputers, trans, Vol. 99, series G, No. 1, mar. 1977, 7—14.

[23] D. Karnopp, A bond graph modeling philosophy for thermofluid systems, trans, Vol. 100, No. 1, mar. 1978, 70—75.

[24] R. C. Rosenberg, On gyrobondgraphs and their uses, trans, Vol. 100, No. 1. mar. 1978, 76—82.

[25] D. Karnopp, Pseudo bond graphs for thermal energy transport, trans, Vol. 100, No. 3, sep. 1978, 165—169.

[26] D. L. Margolis, D. C. Karnopp, Bond graphs for flexible multibody systems, trans, Vol. 101, No. 1, mar. 1979, 50—57.

[27] F. T. Brown, Energy-based modeling guasi coordinates, trans, Vol. 103, No. 1, mar. 1981, 5—13.

[28] R. Liebner, F. Abdullah, L. Finkelstein, Structure graphs: a new approach for interactive computer modelling of multy-energy domain systems, trans, Vol. 104, No. 2, jun. 1982, 143—150.

[29] P. C. Breedveld, Proposition for an unambiguous vector bond graph notation, trans, Vol. 104, No. 3, sep. 1982, 267—270.

[30] J. Thoma, Computer und Bondgraphen, Tech. Rundschau, J. 74, n. 43, 26. okt. 1982.

[31] D. Karnopp, Alternative bond graph causal patterns and equation formulations for dynamic systems, trans, Vol. 105, No. 2, jun. 1983, 58—63.

[32] A. Hussu, Modeliranje in simulacija s povezovalnimi grafi, Interklima, Zagreb, junij 1985.

Avtorjev naslov: doc. dr. Alojz Hussu, dipl. inž.,
Fakuteta za strojništvo,
Ljubljana

UDK 539.4:669.131.7

Trajna dinamična trdnost nodularne litine*

IGOR JANEŽIČ — FELIKS ČERNAK

1. UVOD

Železarna Štore ima v svojem izdelovalnem programu izdelavo nodularnih litin NL 42, NL 50 in NL 60. Nodularna litina je primerna za izdelavo različnih strojnih elementov, vendar jo konstrukterji malo uporabljajo, ker niso znane nekatere mehanske lastnosti. To je bil eden od glavnih vzrokov, da so se začele v Laboratoriju za strojne elemente na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani in Železarni Štore raziskave trajne dinamične trdnosti σ_D nodularnih litin NL 42, NL 50 in NL 60. Način preizkušanja in prikazovanja trajne dinamične trdnosti določa JUS C.A4.035.

Izdelali smo diagrame dinamične trdnosti (Smithove diagrame) za natezno-tlačno, upogibno in torzijsko dinamično obremenitev. Pri vrednotenju trajne dinamične trdnosti smo uporabili statistično metodo.

2. KAKOVOST IN UPORABNOST NODULARNE LITINE

Nodularna litina je gradivo, v kateri se zaradi obdelave taline z magnezijem izloči grafit v obliki kroglic (nodulov), pri sicer približno enaki sestavi, kakršna je pri sivi litini (nekoliko višji odstotek C in Si). Po trdnostnih lastnostih je nad sivo litino in je podobna jekleni litini. Ugodna je za ulivanje, dodatkov za obdelavo je manj, obdelovalnost pa boljša kakor pri jekleni litini. Zaradi teh lastnosti nodularna litina hitro pridobiva pri uporabnosti na najrazličnejših področjih strojne tehnike, predvsem pa na področju delov za vozila, delov za hidravliko, kmetijskih strojev, armatur, gradbenih strojev in podobno. NL je določena po standardu JUS C.J2.022 (od leta 1974) glede na zagotovljene trdnostne lastnosti (meja plastičnosti, natezna trdnost, raztegnost) in sestavo osnovnega gradiva. Imenovane vrednosti so podane v razpredelnici 1.

* Označbe v članku niso usklajene z novima standardoma JUS C.A4.001 in 002 (o katerih smo poročali v SV 1985/11—12), ker je bil članek pripravljen za tisk že pred izidom omenjenih standardov in bi vnovično popravljanje stavka in izdelava novih klišejev povzročili preobčutne stroške. Prosimo bralce, da to upoštevajo.

Uredništvo