

ALATI I TEHNIKE ZA MODELIRANJE PROCESA

TOOLS AND TECHNIQUES FOR PROCESS MODELING

Kandidat

ZVEZDAN NEDIMOVIĆ

Mentor

JANOŠ ŠIMON

Subotica, 2021. godine

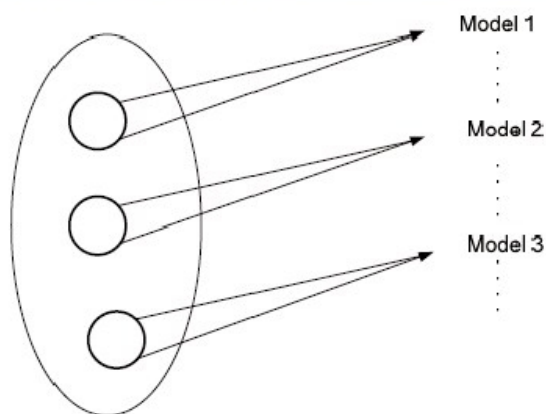
SADRŽAJ

1. UVOD.....	3
2. PRISTUPI IZGRADNJI MODEL SISTEMA.....	5
3. BELI, SIVI I CRNI MODELI.....	7
4. KLASIFIKACIJA MODELA SISTEMA.....	11
ZAKLJUČAK.....	14

1. UVOD

Zadatak modeliranja je da osvetli glavne osobine i fenomene realnog procesa i da ih prevede na neki apstraktan jezik, kao što je jezik matematike [1-3]. Na taj način, modeliranje predstavlja integralan deo nauke i tehnologije, koji obuhvata skoro sve oblasti ljudskog delovanja. Počevši od filozofije i teologije, pa preko sociologije, psihologije, ekologije i ekonomije, doseže konačno i do same tehnike (građevine, hemije, fizike, mašinstva, elektrotehnike, itd.). Suština postupka modeliranja jeste u tome da se izaberu samo one osobine posmatranog procesa koje predstavljaju potrebne i dovoljne karakteristike da se proces opiše dovoljno tačno sa stanovišta namene modela. Postoji praktično neograničen broj modela koji opisuju različite aspekte jedne realne pojave. Svi ti različiti pogledi na realnu pojavu rezultuju u različite modele, kao što je šematski prikazano na slici 1.

Slika 1. Različiti pogledi na realnu pojavu rezultuju u njene različite modele



Pojam modeliranja je neraskidivo povezan sa pojmom procesa ili sistema. U navedenom kontekstu, sistem je skup stavki ili osobina koje predstavljaju zaokruženi deo nekog realnog fenomena koji se proučava. Pri tome, sistem je subjektivan pojam sa ograničenjima koja uključuju one osobine koje su najvažnije sa stanovišta modelara, a isključuje osobine od manjeg značaja za opis posmatranog realnog procesa. Na taj način, model predstavlja sredstvo za opisivanje najbitnijih karakteristika sistema koji se proučava. Uz navedeno, model mora posedovati prikaz objekata unutar sistema, tzv. komponenti sistema, kao i prikaz aktivnosti pod kojima će ti objekti međusobno delovati. Dakle, model reflektuje razumevanje realnog procesa, njegovih komponenti i njihove interakcije koje potiču od strane samog modelara. Važnu stavku prilikom formiranja modela predstavlja izbor ograničenja kojima je podvrgnut sistem. Ova ograničenja određuju koji će deo realnog procesa biti proglašen za sistem koji se proučava. Delovi realnog procesa koji nisu pridruženi sistemu, kao izolovanom delu realnosti, nazivaju se okolinom sistema. Ukoliko su granice sistema suviše široke može se dogoditi da je takav model sistema raktično nemoguće analizirati, pošto su mnoge važne osobine prekrivene nevažnim detaljima. S druge strane, ukoliko su izabrane granice sistema suviše uske, sve relevantne karakteristike realnog procesa neće biti obuhvaćene njegovim modelom, što će rezultovati u neadekvatnu analizu sistema na bazi takvog modela. Zahtevana tačnost prilikom modeliranja povezana je i sa namenom modela. Generalno, postoje dva načina primene modela sistema. Prvi od njih sastoji se u izvođenju eksperimenta u otvorenoj povratnoj sprezi. Kod ovakvog pristupa

model se koristi za predviđanje budućih vrednosti relevantnih promenljivih u sistemu. Na primer, model se može koristiti za izradu vremenske prognoze ili za predviđanje budućih vrednosti nekih ekonomskih pokazatelja, kao što su nezaposlenost, profitna stopa i sl. Zadatak predikcije zahteva adekvatan opis odgovarajućih zakona kojima su podvrgnute relevantne promenljive u modelu, tako da male greške modeliranja mogu prouzrokovati velike greške u rezultatu analize koja je izvršena na bazi takvog netačnog modela. Drugi pristup sastoji se u primeni modela u zatvorenoj povratnoj sprezi i ovakav pristup se obično koristi za projektovanje sistema upravljanja. Ukoliko je model deo sistema upravljanja u zatvorenoj povratnoj sprezi, takav sistem će redukovati dejstvo poremećaja, koji dolazi iz spoljašnje sredine, kao i same greške modeliranja. Na taj način, manje tačan model može se koristiti u ovoj drugoj primeni. Drugim rečima, zahtevana tačnost modeliranja zavisi od načina primene samog modela, odnosno da li se koristi u eksperimentu u otvorenoj povratnoj sprezi ili u okviru povratne petlje kod sistema upravljanja.

2. PRISTUPI IZGRADNJI MODEL SISTEMA

Postoji više načina da se izgradi model sistema, od kojih su najznačajniji sledeći pristupi [1,4].

- Deduktivni pristup (polazi od opšteg ka posebnom).
- Induktivni pristup (polazi od posebnog ka opštem).
- Bond graf (dijagram veza komponenti sistema).

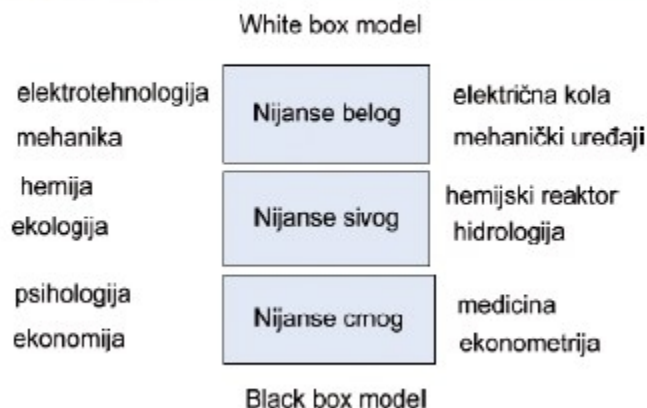
Deduktivni pristup: Ovaj pristup pretpostavlja primenu opštih iskustava koja su stečena prilikom modeliranja različitih specifičnih procesa. Pristup koristi i prethodno znanje o razmatranom procesu, koje se zasniva na poznavanju fizičkih zakona koji definišu matematičke relacije između relevantnih promenljivih u idealizovanom modelu procesa sa idealizovanim

komponentama. Tipičan primer su idealizovane fizičke komponente kod kojih se telo odgovarajuće mase tretira kao tačkasto, uz zanemarivanje njegovih dimenzija, dok su protoci laminarni, koncentracije homogeno raspodeljene u rezervoaru, a mešavine idealne i sl. [2]. Fizički zakoni se obično izražavaju u obliku algebarskih i/ili diferencijalnih jednačina. U opštem slučaju, algebarske relacije definišu ponašanje procesa u ustaljenom (ravnotežnom) stanju ili tzv. statičko ponašanje procesa. Statički modeli se koriste da bi se odredila radna tačka ili ravnotežno stanje procesa, na osnovu kojih se dobija uvid u nominalne vrednosti relevantnih promenljivih, kao što su, na primer, pritisak, protok, temperature ili profit. U industriji se statički modeli nazivaju flow sheets [2]. Dinamičko ponašanje procesa opisuje se diferencijalnim jednačinama [1,5]. Ove jednačine su zasnovane na osnovnim fizičkim zakonima, kao što su zakon o održanju energije, mase, momenta i sl. Apriorno (prethodno) znanje može da se koristi i da se bliže odredi struktura modela sistema, pošto pored relacije koja povezuje ulazne i izlazne promenljive sistema i sama struktura modela predstavlja stavku od interesa. Na primer, ako je na osnovu prethodnog znanja ustanovljeno da sistem ima dve vremenske konstante, tada će to znanje biti iskorišćeno da se iz svih mogućih struktura modela drugog reda izabere ona kojoj odgovaraju dve realne vremenske konstante, odnosno dva realna pola. Navedeni pristupi obično dovode do kvalitativnog modela, u kome postoji određeni broj parametara čije vrednosti nisu poznate. Ponekada je, međutim, moguće da se procene adekvatnož i vrednosti parametara u ovakvom modelu, obično koristeći prethodno znanje o fizičkim osobinama ili gabaritima procesa. Induktivni pristup: U opštem slučaju se ne raspolaže sa dovoljno apriornog znanja da bi se parametri u usvojenoj strukturi modela procenili adekvatno. U takvim situacijama koriste se tehnike parametarske identifikacije sistema, koje koriste merenja ulaza i izlaza sistema da bi estimirale (procenile) vrednosti parametara u modelu [5]. Postupak identifikacije zasniva se i na nekim dodatnim pretpostavkama, kao što su, na primer, klasa linearnih modela, selekcija ulazno/izlaznih varijabli, red modela i sl. Sam postupak pribavljanja informacija o sistemu naziva se indukcija. U navedenom slučaju postavlja se prirodno i pitanje izbora kriterijuma za poređenje različitih modela u uslovima kada su merenja na procesu prisutna.

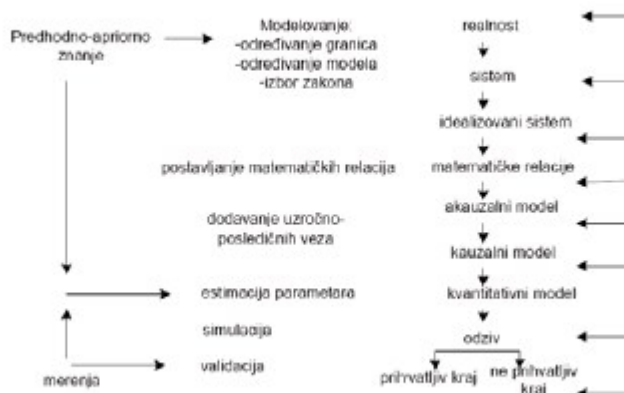
3. BELI, SIVI I CRNI MODELI

Ponekad je moguće da se model sistema izvede samo na osnovu deduktivnog pristupa, koristeći odgovarajuće idealizovane fizičke zakone i procenjene vrednosti parametara, na bazi fizičkih gabarita razmatranog procesa. Takav model naziva se beli model ili na engleskom jeziku white box model. Primeri takvih modela su električna i elektronska kola, a osnovni fizički zakoni koji se koriste prilikom modeliranja su Kirhofovi zakoni. U nekim slučajevima ne postoji adekvatno apriorno znanje o realnom procesu, te model mora da se postavi na osnovu raspoložive merne informacije o ulazu i izlazu sistema, ne posedujući adekvatnu informaciju o internoj strukturi i internim relacijama u sistemu. Tako izveden model naziva se crni model ili na engleskom jeziku black-box model. Između ova dva granična slučaja nalazi se model u formi sive kutije ili na engleskom jeziku “gray-box” model, koji je u sebe uključio svu moguću raspoloživu apriornu informaciju o realnom procesu, što je rezultovalo u primeni odgovarajućih idealizovanih zakona u kojima će se pojaviti određeni broj nepoznatih parametara. Pri tome, ovakva informacija zavisi uglavnom od polja primene modela i obično je veća u slučaju prirodno-tehničkih procesa, nego u slučaju društvenih procesa. U opštem slučaju, izgradnja adekvatnog kvantitativnog modela sastoji se iz nekoliko faza: modeliranja, parametarske identifikacije, simulacije i validacije modela. Koraci (faze) u izgradnji modela prikazani su na slici 3. [1,3] U bilo kojoj fazi opisanog postupka moguće je da se vrati jedan ili više koraka unazad, ukoliko rezultat ne zadovoljava postavljene zahteve.

Slika 2. Tipovi modela u različitim oblastima: beli (white-box), sivi (gray-box) i crni (black-box) modeli



Slika 3. Interaktivni postupak za dobijanje adekvatnog modela sistema



Poslednji korak validacije modela vrši se isključivo na osnovu realnih merenja na sistemu. Kao što je prikazano na slici 3, izgradnja kvantitativnog modela zahteva i uvođenje uzročno - posledične relacije (osobine kauzalnosti). Naime, same matematičke relacije definišu međusobno uticaj nekoliko promenljivih u sistemu. Na primer, Ohmov zakon definiše vezu između napona i struje na otporniku i može se izraziti u obliku $u=R \cdot i$, ili $i=u/R$. Obe relacije su sa matematičkog i fizičkog stanovišta iste, ali se razlikuju sa stanovišta uzroka i posledice, odnosno selekcije ulazne i izlazne promenljive. Prva relacija tvrdi da će struja i (ulaz) prouzrokovati na krajevima otpornika napon u (izlaz), dok druga relacija tvrdi da će napon u (ulaz) rezultovati u struji i (izlaz).

kroz otpornik. Selekcija ulazno-izlaznih promenljivih naziva se postupkom uvođenja kauzalnosti (uzročno-posledičnih veza) u model. Kauzalnost nije fizički pojam i uvedena je veštačkim putem da bi se omogućila odgovarajuća istraživanja i izveo postupak simulacije. Gotovo svi simulacioni paketi rade sa kauzalnim modelima [3]. Kauzalni modeli koriste obične diferencijalne jednačine (engleski ordinary differential equations, ili skraćeno ODE) kao matematičke relacije, dok akauzalni modeli, koji iskazuju samo relacije između promenljivih bez uvođenja uzročno-posledičnih veza (odnosno proglašavanje ulazno-izlaznih promenljivih) koriste diferencijalno-algebarske jednačine (engleski Differential Algebraic Equations ili skraćeno DAE). Neki noviji simulacioni programi koriste akauzalne modele. Takođe, u cilju vizuelizacije veza koje postoje između promenljivih u modelu koristi se grafička reprezentacija modela. Postoji više ovakvih prikaza, od kojih su neki zavisni od samog realnog procesa i njegovih komponenti, dok su drugi opšti i imaju univerzalnu primenu. Navedeni pristupi, polazeći od posebnog ka univerzalnom, prikazani su na sledećoj šemi.

- Crteži (autorova impresija o sistemu)
- Kola (u vezi su sa specifičnom primenom i zahtevaju standardni prikaz komponenti sistema).
- Dijagrami: imaju opšti karakter i mogu biti dvojaki:
 - a. Konsekutivni (sa redosledom izvođenja; primer su dijagram toka ili flow chart u programiranju ili PERT plan u organizacionim naukama).
 - b. Simultani (sa jednovremenim izvođenjem) koji mogu biti:
 - b1.** kauzalni (primer su blok dijagrami i bond grafovi),
 - b2.** akauzalni (primer su bond grafovi).

Dijagrami nisu u vezi sa specifičnom aplikacijom i predstavljaju prilično apstraktan način prikazivanja dinamike sistema. Za prikaz tehničkih sistema koriste se simultani dijagrami, i to obično blok dijagrami. Kod blok dijagrama jednovremeno se uvode relacije između promenljivih i definišu uzročno-posledične veze između njih (osobine kauzalnosti). Za razliku od blok dijagrama, bond graf dozvoljava dvokoračnu proceduru, gde se u prvom koraku definišu samo

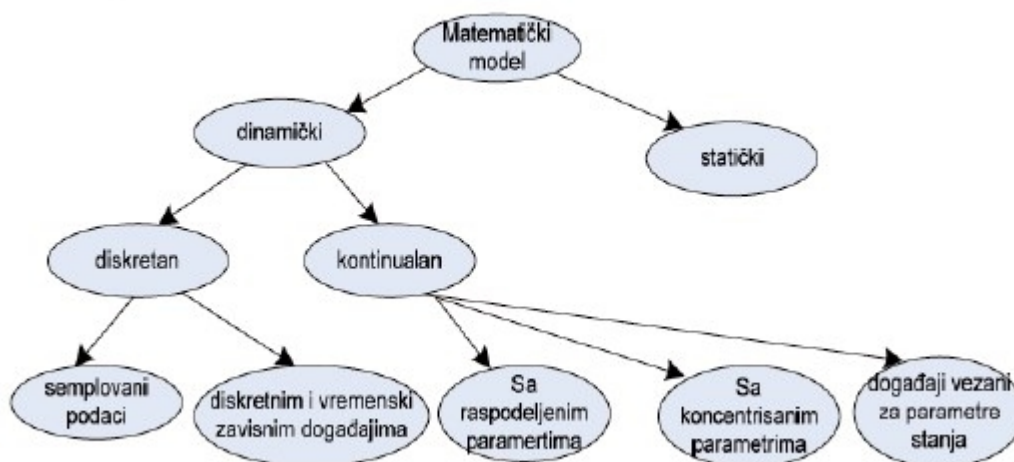
veze između promenljivih, pa se tek u drugom koraku naknadno uvode uzročno-posledične veze između promenljivih [4].

4. KLASIFIKACIJA MODELA SISTEMA

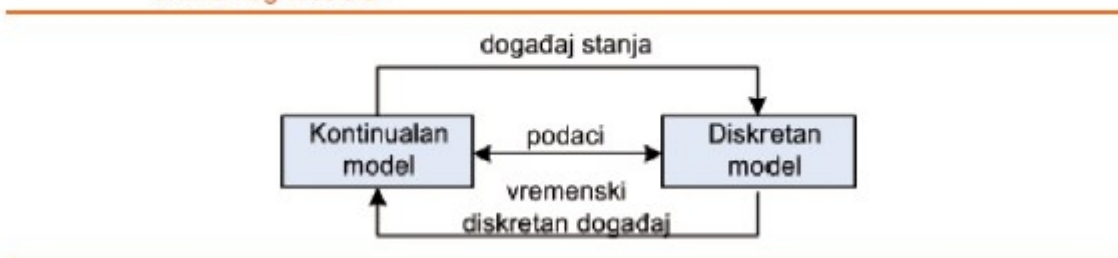
Generalno se razlikuju tri tipa modela koji se mogu koristiti za opisivanje dinamičkog ponašanja realnog procesa:

1. **Skalirani** (proporcionalno umanjeni) model: predstavlja proporcionalno umanjenu fizičku maketu realnog procesa, koja se koristi za ekonomično ispitivanje osobina realnog procesa (cena eksperimentisanja na ovakvom modelu je značajno niža nego na realnom procesu). Ovakav model se koristi kada ne postoji dovoljno tačan matematički model, ili ukoliko izračunavanja u okviru postavljenog matematičkog modela traju neprihvatljivo dugo. Primeri ovakvog modela su aerodinamički tuneli, rezervoari za ispitivanje vodenih tokova i sl.
2. **Opisni** (verbalni) model: koristi se kada su relacije koje opisuju ponašanje sistema suviše kompleksne ili nedovoljno poznate da bi se prikazale u matematičkom obliku, i ako postoji

Slika 4. Tipovi matematičkih modela



Slika 5. Primer složenog modela u kome postoji interkonekcija između kontinualnog i diskretnog modela



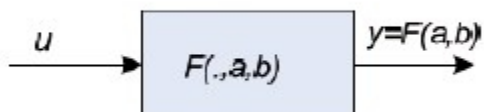
izvesno znanje o kvalitativnim vezama između tih promenljivih. Ovakvi modeli se obično koriste u sociologiji i psihologiji.

3. **Matematički model:** dinamičkon ponašanje sistema je u opštem slučaju opisano skupom nelinearnih diferencijalnih jednačina i oni su dominantni u tehnici [2].

Matematički modeli mogu se dalje podeliti u sledeće kategorije: 1) statički, 2) dinamički, koji mogu biti kontinualni i diskretni. Različiti tipovi matematičkog modela mogu da se kombinuju u okviru složenog modela realnog procesa, kao što je prikazano na slici 5 :

Pojam **dogadjaj stanja** je u vezi su kontinualnim modelom i nastaje kada kontinualna promenljiva stanja pređu neki prag (na primer, kada struja i prođe kroz nulu ili kada pozicija x dostigne graničnu vrednost). Detekcija događaja stanja može aktivirati neki prekidač u kontinualnom modelu ili startovati (trigerovati) neki vremenski mehanizam (brojač) u diskretnom modelu. S druge strane, vremenski događaj se generiše na osnovu vremenskog procesa unutar modela sa diskretnim događajima, a može aktivirati prekidač ili proizvesti neku drugu aktivnost unutar kontinualnog modela. Statički matematički modeli opisuju nelinearnu algebarsku zavisnost između ulazne i izlazne promenljive, kao što je prikazano na slici 6, za skalarne promenljive.

Slika 6. Statički modeli



Ovakav model je linearan ukoliko postoji linearna zavisnost između ulaza u i izlaza y . Međutim, linearnost se može definisati i u odnosu na odgovarajuće parameter (a, b) koji opisuju preslikavanje $F(.)$ između ulaza i izlaza. Mogući tipovi statičkih modela prikazani su sledećom tabelom na slici 7. Realni procesi su generalno nelinearni, tako da adekvatan model procesa obično sadrži nelinearnosti. S druge strane, matematički aparat je dobro razrađen za linearne modele. Ovaj problem se može praktično rešiti uvođenjem pojma radne tačke. Naime, nelinearan model u okolini izabrane radne tačke može se linearizovati, čime se dobija linearizovani model koji se dalje može koristiti za analizu i projektovanje primenom teorije linearnih matematičkih sistema. Naravno, tako dobijeni rezultati će važiti samo u okolini = razmatrane radne tačke, a svaka radna tačka imaće svoj linearizovani model, tako da se sa promenom radne tačke prelazi na njoj odgovarajući linearizovani model. Dakle, linearizovani model predstavlja model sistema za male signale (predstavljaju odstupanja od radne tačke) in može se koristiti za lokalnu analizu stabilnosti sistema oko date radne tačke

Slika 7. Tipovi statičkih modela

$y = F(u)$	$y = F(a, b)$	Primer
linearan	linearan	$y = (a + b)u$
nelinearan	linearan	$y = au + bu^3$
linearan	nelinearan	$y = au / b$
nelinearan	nelinearan	$y = au / (bu + 1)$

ZAKLJUČAK

Reprezentacije modela sistema različite fizičke prirode predstavljaju izuzetno važan alat u nauci i tehnologiji. Ovako dobijeni modeli našli su široku primenu u raznorodnim zadacima analize tehnoloških procesa, njihove simulacije, kao i projektovanja sistema za obradu i prenos signala i upravljanje tehnološkim i industrijskim procesima. Modeli navedenog tipa popularni su i u računarskim telekomunikacijama, za prikazivanje redova čekaanja poruka i podataka, kao i u ekonomiji u oblasti ekonometrije i finansijske matematike.

