

## 2. SISTEMI IN VODENJE SISTEMOV

### 2.1 SPLOŠNO O SISTEMIH IN VODENJU SISTEMOV

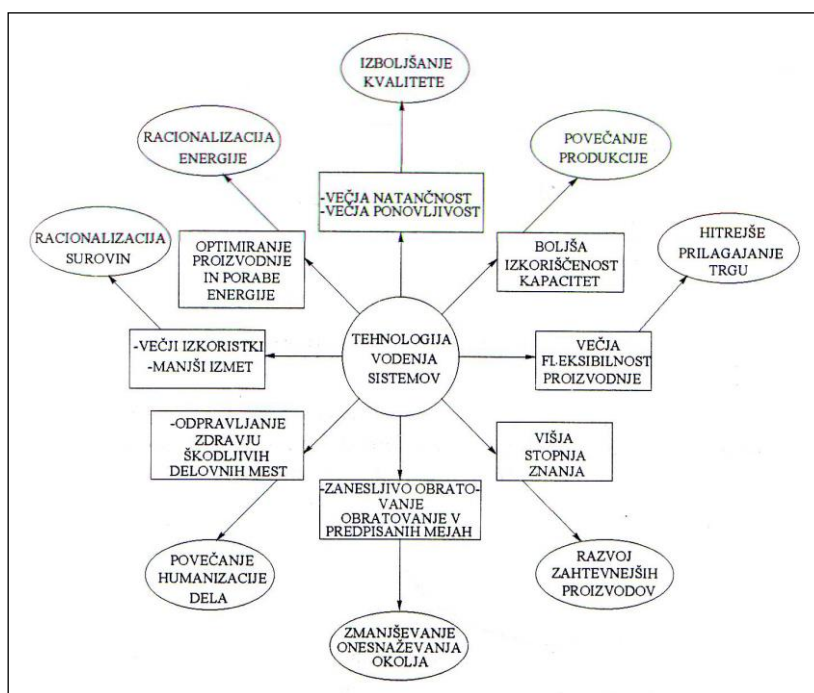
Realni sistem predstavlja kombinacijo elementov ali komponent, ki so medsebojno povezani v celoto in delujejo v smislu doseganja nekega cilja. Sisteme sestavljajo tudi podsistemi, ki se lahko spet delijo na pod-podsisteme, itd. Pojmi kot so elementi, parametri, spremenljivke, medsebojne povezave (struktura), aktivnosti, omejitve, ipd., so ozko povezani na pojem sistema, ki se povezuje z okolico preko vhodov in izhodov. Vhodi izvirajo iz okolice in niso direktno povezani z dogajanjem v sistemu, medtem ko so izhodi nekakšen produkt sistema, ko le-ta sodeluje z okolico.

Pod pojmom vodenje (upravljanje) razumemo skupek trenutnih ali časovno naprej definiranih akcij, ki so usmerjene k izvajanju enega ali več jasno definiranih ciljev. Človek se neprestano srečuje s problemom vodenja. Voden je s svojimi lastnimi aktivnostmi, torej sam s seboj. Najpreprostejši primeri za to so gibanje, govor, mimika ipd. Prav tako pa človek vodi sisteme, del katerih je tudi on sam z namenom, da doseže določene cilje. Takšni zgledi so vožnja kolesa, avtomobila, letala, čolna ipd. Vsi subjekti in objekti, ki so vključeni v proces vodenja, in njihove lastnosti so med seboj povezani z opredeljenimi povezavami v specifično celoto, ki jo imenujemo sistem. V najširšem smislu besede je sistem izdvojena funkcionalna celota, ki je sestavljena iz množice subjektov in objektov, njihovih ustaljenih lastnosti in medsebojnih povezav.

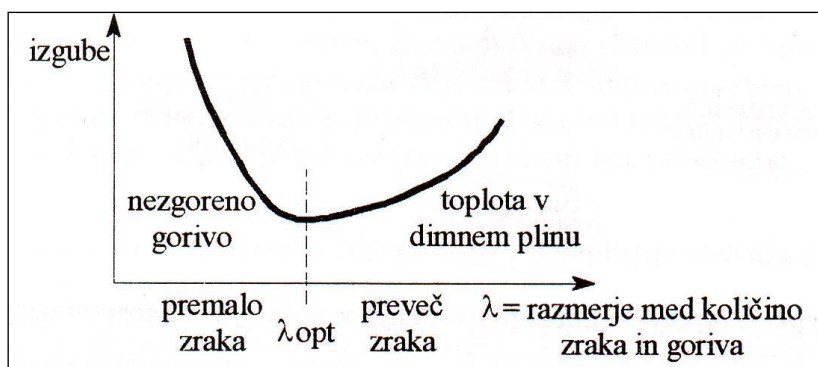
Vodenje sistemov je stalno prisotna in aktualna problematika človeštva, ki se tiče prav vseh ved. Posebno področje vodenja sistemov je avtomatsko vodenje, ki je igralo pomembno vlogo pri razvoju znanosti in inženirske prakse (vesoljske ladje, izstrelki v vojaški industriji, avto pilotski sistemi v letalstvu in pomorstvu, računalniško vodeni obdelovalni stroji, roboti). Avtomatsko vodenje oz. avtomatizacija sistemov kot nekoliko ožje področje vodenja sistemov je tudi ključni in integralni del sodobnih industrijskih procesov, npr. v procesni industriji (regulacija tlaka, temperature, vlažnosti, pretoka, viskoznosti ipd.). Uporabnost se je razširila tudi na druga področja kot so ekonomija, urbanizacija, ekologija ter na pomorstvo in promet.

Avtomatizacija v industriji omogoča večjo produktivnost, boljšo kvaliteto izdelkov, večjo ponovljivost proizvodnje, manjšo porabo energije ter tudi sociološke in ekološke izboljšave proizvodnih procesov. V prometu avtomatizacija pomeni večjo prepustnost cestnega omrežja, zmanjšanje potovalnih časov, zmanjšanje polucije, povečanje prometne varnosti, krmarjenje plovil in ladij ipd. V tehnologijo prometa indirektno sodijo tudi tehniški sklopi kot npr. ABS zavorni sistem, zaporne rampe, sistem za izravnavanje nagiba pri hitrem vlaku (Pendolino), hladilni sistemi, vzmetenje vozil ipd. Učinki uvajanja tehnologije vodenja v podjetjih in gospodarstvu so prikazani na sliki 2.1. Slikovno sta prikazana tudi dva primera: racionalizacija energije (slika 2.2) in zmanjševanje onesnaževanja okolja (slika 2.3).

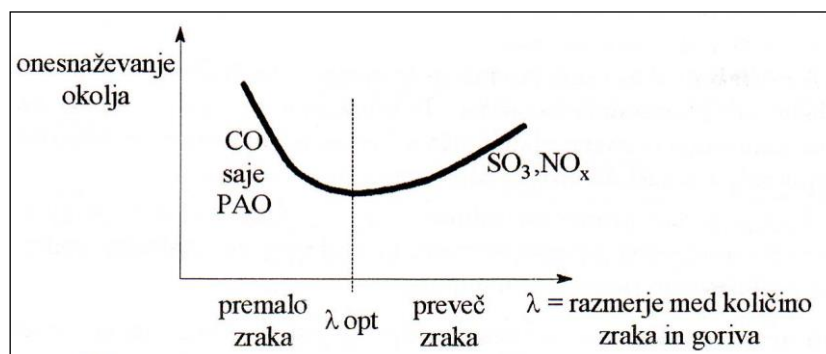
O procesih vodenja lahko govorimo tudi neodvisno od volje in zavesti človeka. Med nekaj znanih primerov sodijo mehanizem vzdrževanja krvnega tlaka, telesne temperature, ravnotežja pri gibanju ipd. Brez razglabljanja teh primerov je povsem jasno, da so ti procesi in sistemi zelo zahtevni.



Slika 2.1: Učinki uvajanja tehnologije vodenja v podjetjih in gospodarstvu



Slika 2.2: Zmanjšanje izgub pri optimalnem izgorevanju



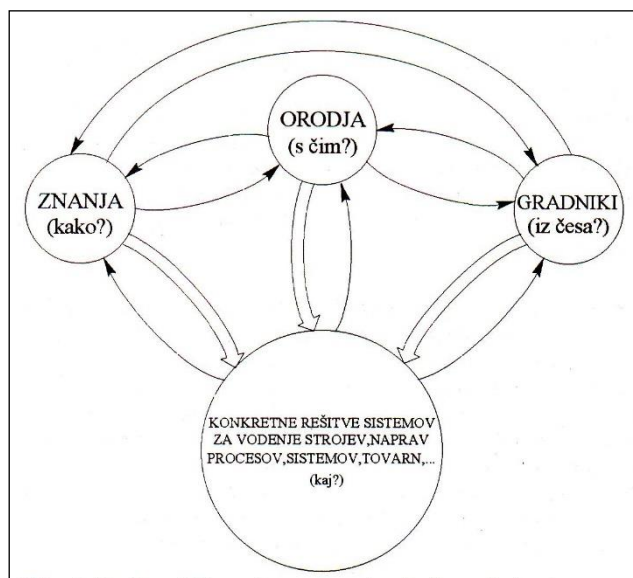
Slika 2.3: Zmanjšanje onesnaževanja okolja pri optimalnem izgorevanju

## 2.2 OPREDELITEV TEHNOLOGIJE VODENJA

Tehnologija vodenja sistemov je dejavnost, ki zajema razvoj in povezavo vseh znanj, orodij, gradnikov in spremljajočih aktivnosti, ki so potrebne, da načrtujemo, razvijemo, zgradimo in uspešno uporabljamo nek podsistem vodenja s katerim bomo vodili stroj, napravo, objekt, sistem, proces, podjetje, tovarno, ipd. tako, da bodo delovali v okviru omejitev ter v skladu s predpisanimi kriteriji in dosegali cilje, ki smo jih postavili.

Tehnologija vodenja obsega tri osnovne elemente. Povezave med njimi so prikazane na sliki 2.3:

- **Znanja**, ki jih potrebujemo pri reševanju problemov vodenja;  
(teorija vodenja, sistemska teorija, računalništvo, informatika, elektronika, strojništvo, ekonomija, specifična znanja, itd.)
- **Orodja** za načrtovanje in implementacijo sistemov vodenja;  
(programski paketi za računalniško podprto načrtovanje vodenja, simulacijski paketi, ekspertni sistemi, orodja za konfiguriranje nadzornih sistemov, regulatorjev, krmilnikov, itd.)
- **Gradnike** s katerimi gradimo sisteme vodenja;  
(senzorji, aktuatorji, pretvorniki, krmilniki, regulatorji, računalniški sistemi, itd.)



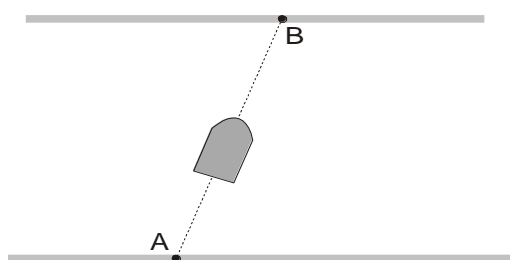
Slika 2.3: Opredelitev elementov tehnologije vodenja

## 2.3 OSNOVE IZ TEORIJE VODENJA SISTEMOV

Oglejmo si podrobneje enega izmed omenjenih sistemov. Predpostavimo, da se nahajamo za krmilom plovila in ga želimo voditi iz točke A na eni strani obale do točke B na drugi strani, kot prikazuje slika 2.4. Kot krmar plovila le-to lahko vodimo na dva značilna načina:

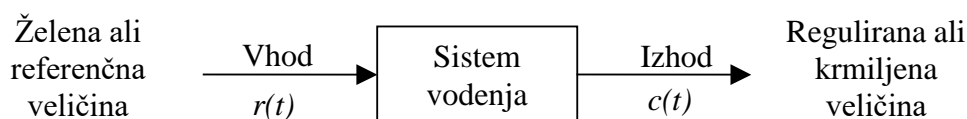
1. Usmerimo plovilo v točki A k cilju – točki B. V tem položaju fiksiramo krmilo in nadaljnji potek dogajanja med vožnjo k cilju nas ne zanima več.
2. Neprestano nadzorujemo položaj plovila med vožnjo glede na ciljno točko B. Zamišljena linija, ki spaja premec plovila s točko B, nam služi kot referenčna os. Odstopanje smeri vožnje od te osi korigiramo s spremembo položaja krmila.

Vprašamo se ali bomo v obeh primerih vodenja plovila dosegli želeni cilj ali ne. S precejšnjo verjetnostjo lahko rečemo, da v prvem primeru vodenja tega cilja ne bomo dosegli. Plovilo je izpostavljeno med vožnjo različnim zunanjim vplivom: vetru, vodnemu toku, valovom ipd. Vsi ti vplivi so naključni in jih je v naprej težko predvideti in pri vodenju upoštevati. Delujejo kot motnje na v naprej zastavljeni kurz vožnje. V drugem primeru vodenja plovila lahko z gotovostjo rečemo, da bomo ciljno točko B dosegli, saj neprestano spremljamo smer vožnje in morebitna odstopanja od zelenega kurza vožnje, kot posledica vpliva zunanjih motilnih veličin, popravljamo s spremembo položaja krmila.



Slika 2.4: Vodenje plovila

Kadar predstavljamo sisteme vodenja v smislu vgrajenih gradnikov si pomagamo s tehnološkimi shemami, pri proučevanju njihovih dinamičnih lastnosti, pa se uporabljajo bločne sheme. Vsak sistem vodenja lahko ponazorimo z blokom kot ga prikazuje slika 2.5.



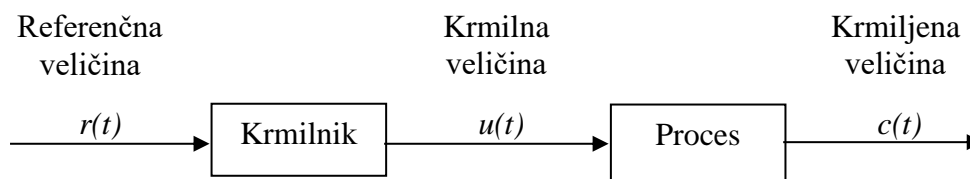
Slika 2.5: Sistem vodenja

Izhodu sistema pravimo, glede na vrsto sistema, krmiljena ali regulirana veličina (npr. temperatura prostora), vходу pa zelena ali referenčna veličina (npr. temperatura na termostatu). Pogosta zahteva sistema vodenja je ta, da se krmiljena regulirana) veličina čim boljše ujema z referenčno (želeno) veličino ne glede na motnje, ki vplivajo na sistem vodenja.

### 2.3.1 ODPRTO-ZANČNI IN ZAPRTO-ZANČNI SISTEM VODENJA

Opisana primera obnašanja krmarja pri vodenju plovila predstavljata dva povsem različna sistema vodenja: odprti sistem vodenja in zaključeni sistem vodenja. Za odprti sistem vodenja se pogosto uporablja termin krmiljenje ali odprto-zančno vodenje, za zaključeni sistem pa (avtomatska) regulacija ali zaprto-zančno vodenje. Vodenje sistemov je torej odprto-zančno ali zaprto-zančno vplivanje na realni objekt (npr. plovilo) ali proces (npr. ogrevanje prostora) z

namenom, da se doseže želene cilje oz. želeno vodenje objekta ali procesa. Blokovo upodobitev strukture in delovanje obeh sistemov vodenja sta prikazana na slikah 2.6 in 2.7.

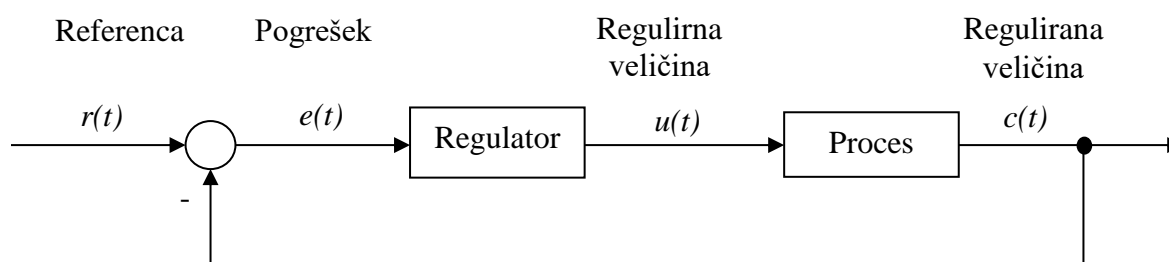


Slika 2.6: Bločni diagram krmilnega vodenja sistema

Tipičen primer krmiljenja predstavlja ogrevanje prostora z grelom in časovnim krmilnikom, ki periodično vključuje in izključuje grelo. Uporabnik lahko nastavi le razmerje med časom vklopa in izklopa. Z določenimi izkušnjami (v korakih) uporabnik lahko nastavi razmerje, ki omogoča približno želeno temperaturo. Vendar tako vodenje ne upošteva spreminjanje zunanje temperature, možne motnje v sistemu (npr. odpiranje oken ali vrat). Jasno je, da je kvaliteta vodenja slaba, temperatura pa le redko enaka željeni.

Primer odprto-zančnega sistema iz prometa so semaforji. Elektronska enota v semaforski omarici, ki prižiga semaforske luči (zelena, rumena, rdeča) z vnaprej programiranim, konstantnim časovnim ciklom, in semafor tvorijo krmilnik. V tem primeru je proces odvijanje prometa po cesti.

Tisto kar manjka krmilnemu sistemu za točnejše in bolj prilagodljivo delovanje, je povratna informacija (zanka) iz izhodne proti vhodni (ali referenčni) veličini. Sistem z dodano povratno zanko (slika 4) imenujemo zaprto-zančni sistem vodenja ali regulacijski sistem. Za doseg točnejše regulirane veličine  $c(t)$ , jo moramo primerjati z referenco  $r(t)$ , regulator pa na osnovi pogreška definira ustrezno regulirno veličino  $u(t)$  tako, da le-ta pogrešek zmanjšuje. Človek je prav gotovo najkompleksnejši tovrstni regulacijski sistem, saj vsebuje nešteto povratno-zančnih struktur, ki omogočajo kompleksne operacije in koordinirano delovanje.

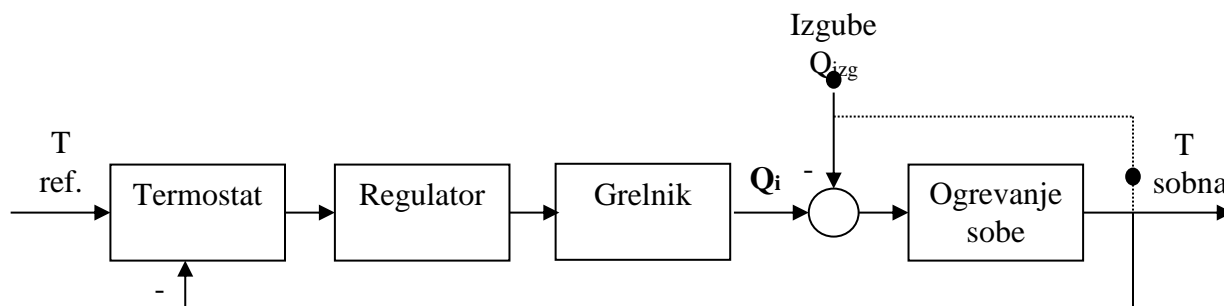


Slika 2.7: Bločni diagram regulacijskega vodenja sistema

Lastnosti povratno-zančnih regulacijskih sistemov so

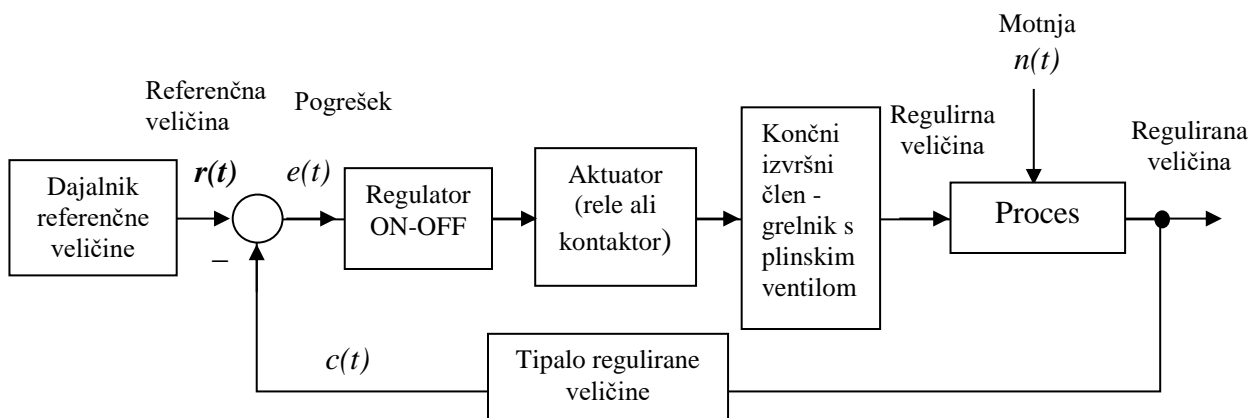
- dobre:
- povečana natančnost;
  - zmanjšana občutljivost (na zunanje dejavnike);
  - zmanjšan vpliv nelinearnosti (s povratno vezavo);
  - povečana hitrost odziva;
- slabe:
- tendenca oz. nagnjenost takih sistemov k oscilacijam ali nestabilnostim (zato mora biti tak sistem pravilno dimenzioniran).

Regulacija sobne temperature s pomočjo termostata predstavlja najenostavnejši primer zaprt-zančne regulacije (slika 2.8). Za razumevanje delovanja regulacijskega sistema prikazanega na sliki 2.8 predpostavimo, da sta zunanja  $T_{zun}$  in regulirana temperatura  $T$  precej nižji od referenčne temperature  $T_{ref}$ . V tem primeru je termostat vključen, kar pomeni, da je grelo vključeno in temperatura v sobi narašča. Sistem mora biti načrtovan tako, da je toplota, ki jo ustvarja grelo  $Q_i$ , bistveno večja od izgub  $Q_{izg}$  (odvajanje toplote skozi stene). S tem temperatura v sobi hitro narašča, dokler ni nekoliko višja od želene  $T_{ref}$ . Takrat se grelo izključi in sobna  $T$  začne počasi upadati, saj na proces deluje le ( $- Q_{izg}$ ). Ko temperatura  $T$  upade nekoliko pod želeno  $T_{ref}$ , se grelo ponovno vključi in celoten cikel se ponovi.



Slika 2.8: Bločni diagram ogrevanja sobe

Popolnejši bločni diagram tega problema prikazuje slika 2.9. Proces je ogrevanje sobe, regulirana veličina je temperatura prostora. Motnja predstavljajo odvajanje toplote skozi stene, sprememba zunanje  $T_{zun}$ , odprtje okna ipd. Aktuator je naprava, ki signal regulatorja (v tem primeru kontakt termostata) pretvori v signal, ki krmili končni izvršni člen (v tem primeru rele ali kontaktor za vkloppljanje in izkloppljanje plinskega ventila). Tako se pri pozitivnem pogrešku grelnik vključi, pri negativnem pa izključi. Bistvo (princip) regulacije je v tem, da izgube ne vplivajo na delovanje sistema. Termostat je v tej sliki razbit v tri bloke (dajalnik referenčne temperature, tipalo regulirane in komparator (sumacijska točka), regulator pa na dva bloka (ON-OFF regulator in aktuator)

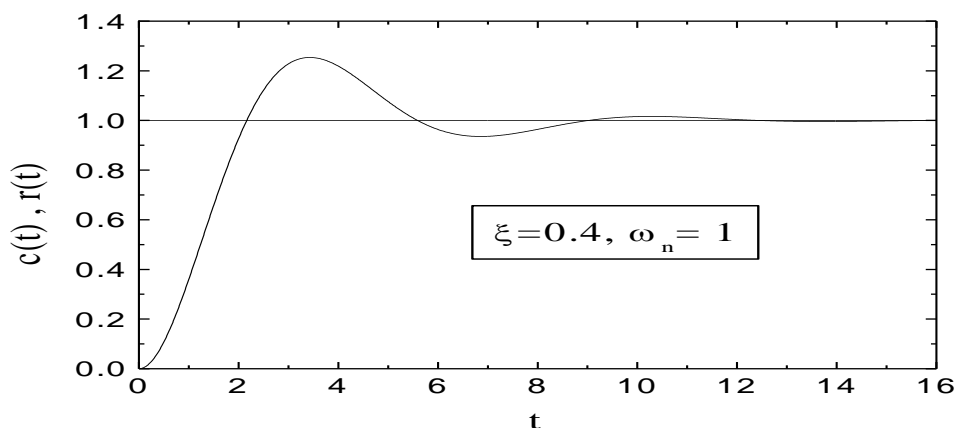


Slika 2.9: Popolnejši bločni diagram ogrevanja

Primer iz prometa, prižiganje semaforjev povezano s stalno meritvijo gostote prometa, je obravnavan v poglavju 2.4.2.

### 2.3.2 SLEDILNO DELOVANJE VODENJA SISTEMA

Sledilno delovanje je ena od najpogosteje zahtevanih delovanj vodenih (regulacijskih) sistemov. Pri tem mora biti vodeni sistem načrtovan tako, da vodena (regulirana) veličina čim bolj verno sledi referenčni veličini. Bločna shema takega sistema je že prikazana na sliki 2.7. Na sliki 2.10 je prikazan odziv regulirane veličine v odvisnosti od nenadne (skočne) spremembe referenčne veličine v času  $t = 0$ ,  $r(t) = 1$  za  $t > 0$  pri sledilnem vodenju. Pri načrtovanju sledilne regulacije je manj pomembno, kako regulacijski sistem deluje pri morebitnih motilnih signalih.

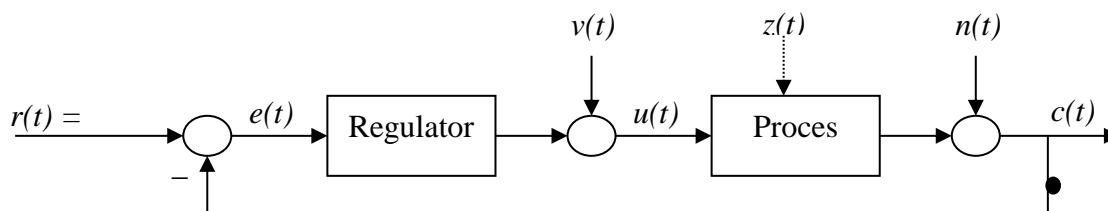


Slika 2.10: Tipična poteka referenčne in regulirane veličine pri sledilni regulaciji

Tipični primeri sledilne regulacije so: ogrevanje prostora, krmarjenje plovil in ladij, zagotovitev temperaturnega profila pri številnih procesih v kemijski industriji, regulacija zasuka vesoljskih ladij, sledenje strelne naprave tarči, potek tlaka pri litju plastike, zagotovitev hitrostnega profila pri delovanju dvigala in mnogi drugi.

### 2.3.3 REGULACIJSKO DELOVANJE VODENJA SISTEMA

V regulacijskih sistemih je zelo pomembno, da le-ta učinkovito odpravlja motnje, oz. da le-te čim manj vplivajo na regulirano veličino. Takemu načinu delovanja regulacijskega sistema pravimo regulacijsko delovanje. Motnje lahko vstopajo v regulacijsko zanko kjerkoli, pri regulirani veličini ali pa nekje vmes. Ustrezna bločna shema je prikazana na sliki 2.11. Pri tej regulaciji nas učinkovitost reagiranja na spremenjen referenčni signal ne zanima, ker se predpostavlja, da je želena vrednost nastavljena na neko konstantno vrednost in se ne spreminja.

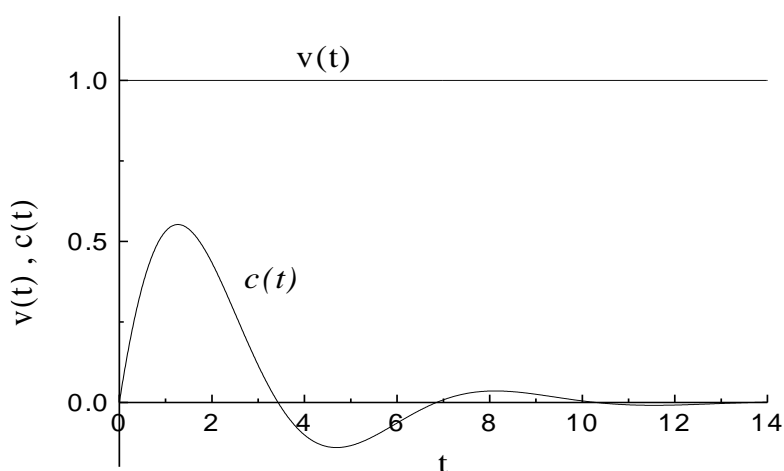


Slika 2.11: Bločna shema regulacijskega sistema v prisotnosti motenj

Tipični primer je regulacija temperature v prostoru, ko je želena  $T$  konstantna, regulator pa mora čim bolj izločiti vplive motenj (sprememba zunanje  $T$ , odpiranje vrat, oken ipd.). Pri tem je za načrtovanje regulatorja bistveno kje vstopajo motnje:

- na vhodu procesa pri regulirni veličini, npr.  $v(t)$ ;
- na izhodu pri regulirani veličini, npr.  $n(t)$ ;
- nekje vmes, npr.  $z(t)$ .

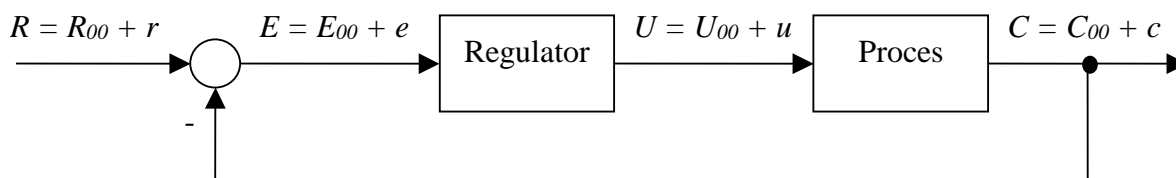
Če smo načrtovali sledilni regulator, le-ta optimalno odpravlja tudi motnjo na izhodu, saj  $r(t)$  in  $n(t)$  delujeta v isti točki regulacijskega sistema. Motnje na vhodu procesa ali v motnje v notranjosti procesa, zahtevajo regulacijsko delovanje regulacijskega sistema, skratka drugačen regulator. Na sliki 2.12 je prikazan tipičen signal za motnjo  $v(t)$  na regulirni veličini (stopničasta sprememba) in ustrezno regulirano veličino  $c(t)$ . Dober regulator lahko izdatno zaduši vpliv motnje in ga v čim krajšem času izniči. Ta čas pa je omejen z dinamiko procesa, saj se motnja  $v(t)$  prenaša na regulirano veličino preko dinamike procesa. Pri načrtovanju regulacijskega delovanja je manj pomembno kako regulacijski sistem sledi morebitnim spremembam reference.



Slika 2.12: Odziv na motnjo na regulirni veličini v regulacijskem sistemu

### 2.3.4 DELOVNA TOČKA REGULACIJSKEGA SISTEMA

Vse signale v regulacijskih sistemih si lahko predstavljamo tako, da so sestavljeni iz nekaj delovnih, enosmernih vrednosti in iz manjših sprememb v okolici delovne točke. Ustrezne oznake prikazuje slika 2.13.

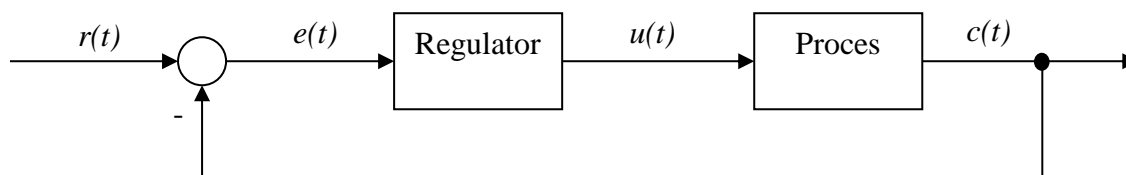


Slika 2.13: Obravnava regulacijskega sistema v okolici delovne točke

$R_{00}$ ,  $E_{00}$ ,  $U_{00}$ ,  $C_{00}$  so enosmerne vrednosti signalov, ki določajo delovno točko regulacijskega sistema. Vrednost reference  $R_{00}$  povzroči pogrešek  $E_{00}$ , regulirno veličino  $U_{00}$  in regulirano veličino  $C_{00}$ . Običajno velja (če ni ustaljenega pogreška)  $E_{00} = R_{00} - C_{00} = 0$ . V nadaljnjem bomo obravnavali samo regulacijske sisteme, ki se okoli delovne točke vedejo linearno. Zaradi

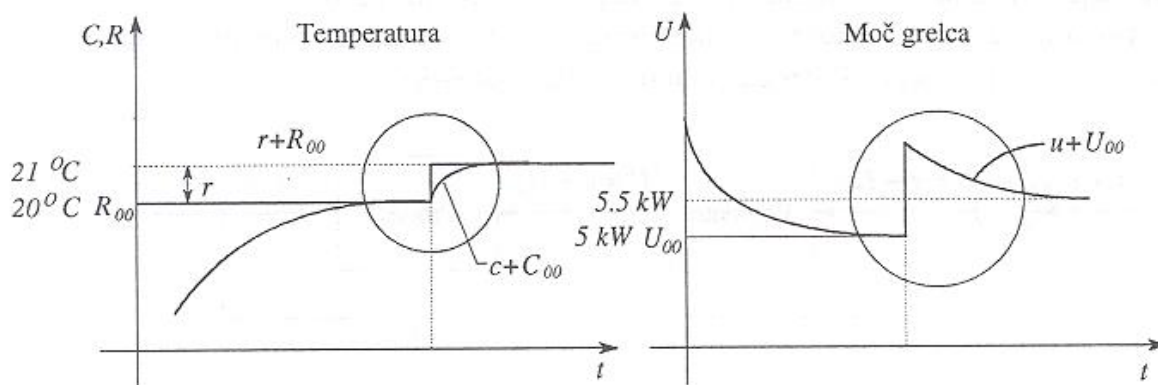


zakona superpozicije, obravnavan v nadaljevanju, lahko od vseh nastopajočih signalov odštejemo vrednosti delovnih točk ( $R_{00}$ ,  $E_{00}$ ,  $U_{00}$ ,  $C_{00}$ ) in dobimo regulacijski model prikazan na sliki 2.14. Takemu modelu regulacijskega sistema pravimo deviacijski model. V nadaljnji obravnavi, ob oznakah, prikazanih na sliki 2.14, bomo imeli v mislih le spremembe signalov v okolici delovne točke. Torej, vrednosti delovne točke ne bomo jemali v obzir.



Slika 2.14: Deviacijski model regulacijskega sistema

Kot zgled za boljše razumevanje si oglejmo naslednji primer. V prostoru imamo nastavljeno želeno temperaturo  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ta temperatura se vzpostavi po določenem prehodnem pojavu in zahteva moč grela  $5\text{ kW}$ . Če spremenimo želeno temperaturo za  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , se, po prehodnem pojavu, moč grela poveča za  $500\text{ W}$ . Prehodna pojava prikazuje slika 2.15. Pri nadaljnji obravnavi imamo vedno v mislih le prehodni pojav (obkroženo). Velikokrat bomo analizirali sisteme pri enotini, skočni spremembi referenčnega signala (enotina stopnica). To ne pomeni, da se je referenčni signal dejansko spremenil iz  $0$  na  $1$  problemske enote, ampak, v delovni točki, za neko konstantno vrednost, ki jo normiramo na vrednost  $1$  zaradi preglednosti in enostavnosti nadaljnje obravnave, kar ne predstavlja nikakršne izgube splošnosti.



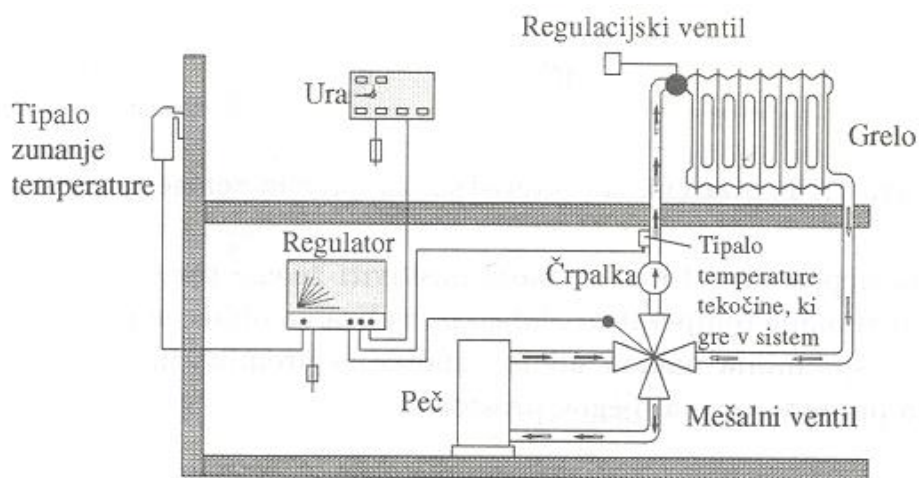
Slika 2.15: Prehodni pojavi pri regulaciji temperature v sobi

## 2.4 PRIMERI REGULACIJSKIH SISTEMOV

### 2.4.1 REGULACIJA TEMPERATURE V PROSTORU

Za regulacijo temperature  $T$  v prostoru obstajajo številni načini, ki v precejšnji meri dependirajo od uporabljenega grela. V glavnem uporabljamo ti. stopenjsko (ON-OFF) regulacijo v povezavi z električnimi greli, pa tudi bolj sodobno zvezno regulacijo pri sistemih, ki imajo določeno akumulacijo toplotne energije. Stopenjska regulacija je sicer najcenejša, vendar povzroča nezaželeno nihanje temperature.

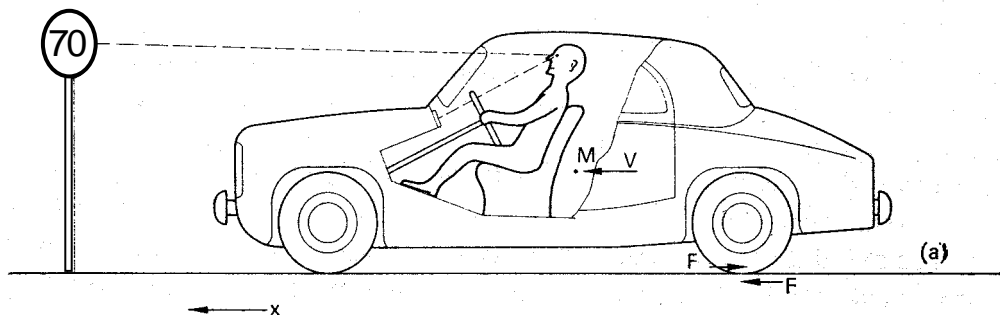
Na sliki 2.16 je prikazan primer zvezne regulacije temperature prostora s centralnim ogrevanjem. Regulacijski del sestavljajo tipalo zunanje temperature, tipalo temperature tekočine, ki jo pošiljamo v sistem, regulator, ura, ki se nahaja v prostoru, ter mešalni ventil (končni izvršni člen), ki ga odpira in zapira motor (aktuator). Izvršni člen sestavljajo peč za centralno ogrevanje, črpalka, mešalni ventil, grelo v prostoru, ustrezen povezovalni sistem. Proces (sistem) je ogrevanje prostora. Osnovna zanka omogoča regulacijo temperature  $T$  tekočine, ki jo pošiljamo v sistem. Regulator, glede na razliko med želeno in dejansko temperaturo  $T$  tekočine, ki jo meri tipalo, daje motorju ustrezen signal za zasuk ventila. Ventil je mešalnega tipa, ki omogoča želeno temperaturo  $T$  tekočine tako, da v pravilnem razmerju meša tekočino v peči (ta je na konstantni, precej visoki temperaturi  $T$ , regulirana z ustrežno ločeno regulacijsko zanko v kotlu) in povratno tekočino, ki se v procesu (ogrevanje prostora) precej ohladi.



Slika 2.16: Regulacija temperature v prostoru

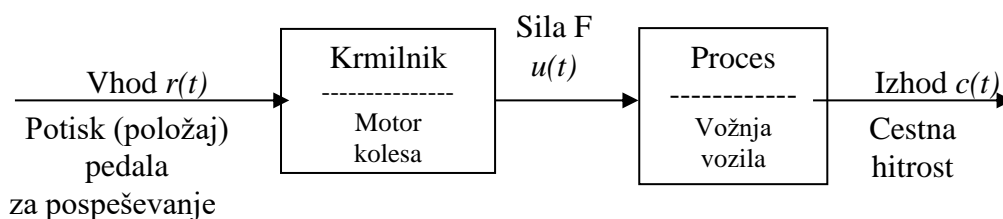
## 2.4.2 PROMETNI REGULACIJSKI SISTEMI

**Voznik v osebni avtomobilu:** Na sliki 2.17 je prikazana preprosta shema sistema voznika v osebni avtomobilu, ki vozi v smeri 'x' po cesti na kateri hitrostna omejitev (npr. 60 km/h) predstavlja eno od ovir sistema. V danem trenutku pelje mimo prometnega znaka, ki narekuje, da je v nadaljnjem odseku ceste omejitev hitrosti povečana na 70 km/h. Voznik prične na mestu, kjer je opazil znak, spreminjati hitrost avtomobila ustrezno dopuščeni vrednosti.



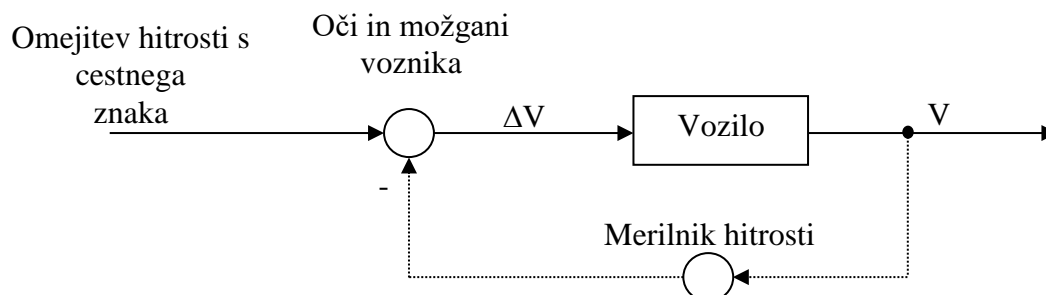
Slika 2.17: Voznik v osebni avtomobilu

S stališča voznika je avtomobil odprto-zančni sistem, ki reagira na položaj svoje noge na pedalu za pospeševanje (slika 2.18). Če je voznik dovolj spreten (in potrpežljiv), trenutno prilagoditev hitrosti lahko izvede zgolj z enkratnim potiskom noge na pedal za plin.



Slika 2.18: Odprto-zančni bločni diagram voznika v osebnem avtomobilu

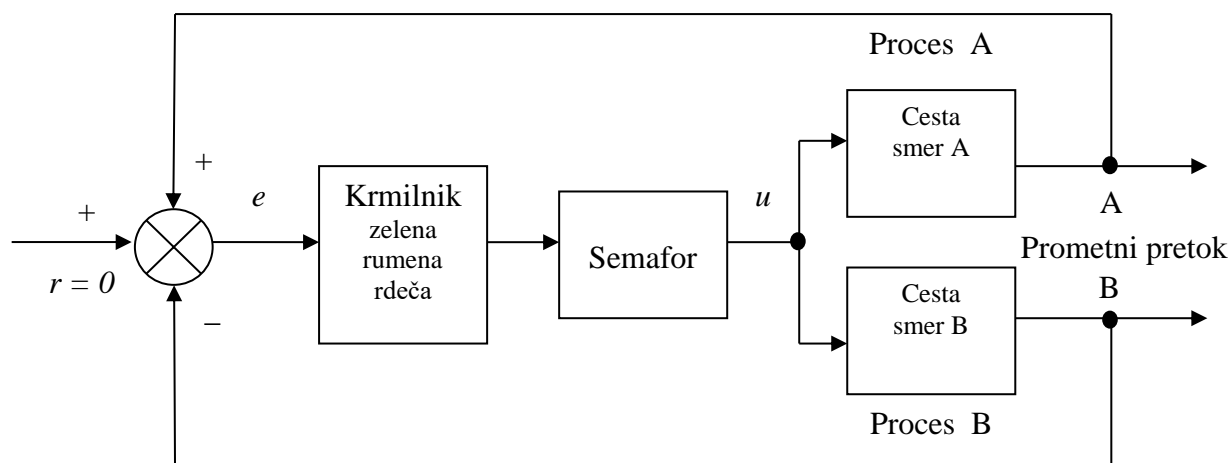
Neizkušen voznik bo po vsej verjetnosti pritisnil na plin malo preveč ali premalo in bo kmalu spoznal svojo 'napako' ter naknadno prilagodil položaj pedala za doseg želene hitrosti. Način s katerim voznik pride do spoznanja, da ni prav dobro 'pritisnil' na pedal, mora temeljiti na osnovi nekega merjenja 'izhoda' sistema (dejanske hitrosti avtomobila) in možnosti komunikacije krmilniku. V tem primeru brzinomer preskrbi indikacijo hitrosti, oči in možgani voznika pa interpretirajo informacijo, ki se v končni fazi prenese na nogo. Ta prenos informacije o 'kontrolirani' veličini (v tem primeru hitrosti vozila) krmilniku (v tem primeru vozniku) predstavlja povratno povezavo. Na sliki 2.19 je prikazan ustrezní bločni diagram. Informacija, ki jo dobi voznik, se sestoji iz zelene hitrosti, ki jo veva prometni znak, in iz dejanske hitrosti, ki jo kaže brzinomer. Razlika med tema dvema je 'pogrešek' (napaka), ki jo voznik skuša minimizirati. V bločni shemi se to prikaže v obliki primerjalnega elementa (komparator, sumacijska točka). Na ta način položaj pedala za pospeševanje postane odvisen od pogreška hitrosti.



Slika 2.19: Zaprto-zančni bločni diagram voznika v osebnem avtomobilu

Če bi se lotili načrtovanja avtomatskega vodenja avtomobila, bi voznika nadomestili z napravo, ki bi pretvarjala pogrešek hitrosti v pomik pedala za pospeševanje. Tak sistem bi lahko sledil več zakonitostim, najenostavnejša med njimi je proporcionalna kontrola s katero je povečanje ali pomanjšanje navora motorja proporcionalno pogrešku med zeleno in dejansko hitrostjo.

**Inteligentni semafor:** Na sliki 2.20 je prikazana bločna shema sistema inteligentnega semaforja. Proces predstavlja odvijanje prometa na cestišču v smeri A in B. Sistem ima dva izhoda, prometni tok skozi križišče v eno smer (A smer) in prometni tok skozi križišče v drugi (B) smeri. Vhod je komanda za enaka prometna volumna v obeh smereh, tj., vhod je vrednost razlike prometnih volumnov enaka nič. Naprava, ki izračuna ustrezne rdeče/zeleno časovne intervale in semaforske luči, predstavljajo regulator.



Slika 2.20: Bločni diagram inteligentnega semaforja

Sodobnejši sistemi pa na nekem področju stalno merijo gostoto prometa ter informacijo posredujejo centralnemu računalniku, ki potem ustrezno koordinira delovanje večjega števila semaforjev. To je že primer sestavljenega in koordiniranega vodenega sistema. Proces, ki se v tem primeru regulira, je silno kompleksen, saj gostota prometa zavisi tudi od dnevne ure, dneva ter od raznih drugih faktorjev. V splošnem je za njih bistveno, da se minimizirajo zastoji oz. povprečni časi čakanja.

**ABS sistem proti blokiranju koles:** Pri močnem zaviranju naj bi bila zavorna razdalja čim krajša, ne da bi to vplivalo na spremembo smeri gibanja vozila in njegovo stabilnost. Vendar obstaja nevarnost, da, glede na stanje cestišča, vremenske pogoje in reakcije voznika, kolesa ob zaviranju izgubijo stik s cesto. Sistem proti blokiranju koles ABS (*Anti Blocking System*) ima nalogo, da se tej nevarnosti izogne. *Opomba: Glej Del III, Aneks 1!*

Princip delovanja je naslednji. Če ima kolo prenizko obodno hitrost glede na hitrost vozila in obstaja nevarnost, da bo blokiralo, se zmanjša zavorni tlak za to kolo, vozilo pa ostane stabilno dokler je to le mogoče. Običajno se pri prednjih kolesih zavorni tlak uravnava posamično, medtem ko je zavorni tlak za kolesa na zadnji osi enak.

**Vodenje radarske antene:** Ko se na katodnem zaslonu radarske naprave pojavi odboj nekega predmeta, ki se giblje, je radarsko anteno potrebno sukati tako, da se gibanje predmeta čim točneje sledi. Pri tem je antena vodeni objekt, položaj predmeta, ki se ga sledi, pa referenčna (želena) veličina, ki jo uporabnik, z opazovanjem na katodnem zaslonu, vnaša v sistem s pomočjo ustreznega potenciometra.

**Servo-sistemi:** Se povratno-zančni regulacijski sistem v katerem je regulirana veličina pozicija, hitrost ali pospešek mehanskega dela. Zato sta izraza servosistem in pozicijski (ali hitrostni ali pospeškovni) regulacijski sistem identična. Servosistemi se veliko uporabljajo v industriji, zlasti v robotiki in numerično (CNC) krmiljenih obdelovalnih strojih.

**Ostali primeri:** Regulacija notranje temperature v avtomobilu, regulacija osvetljevanja predorov, avtomatsko vodenje prometa skozi predore v primerih velike koncentracije izpušnih plinov ipd.

### 2.4.3 EKONOMSKI REGULACIJSKI SISTEMI

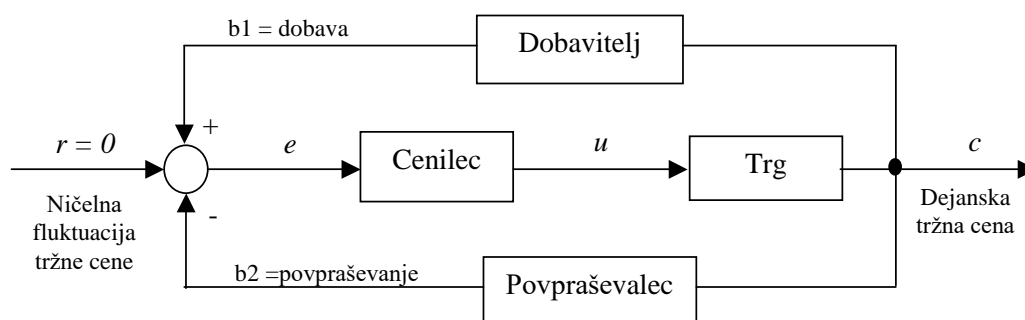
**Sistem vodenja zalog:** Velikost zalog bistveno vpliva na dobiček nekega podjetja. Zato je pomembno, da se velikost zalog primerja z zeleno količino zalog. Ta je specifična za vsak produkt posebej in odvisna od vrste drugih dejavnikov. Če obstaja razlika med zelenimi in dejanskimi zalogami, je potrebno spremeniti proizvodnjo tako, da se bo pogrešek izničil.

**Sistem vodenja cene dobrine na trgu:** Klasični ekonomski koncept, znan kot Zakon ponudbe in povpraševanja (*Law of supply and demand*) se tudi lahko interpretira kot povratno-zančni regulacijski sistem (slika 2.21). V tem primeru se tržno ceno nekega izdelka izbere kot izhodno veličino in predpostavi, da je namen sistema ohranjanje stabilne cene.

Zakon se lahko interpretira drugače. Povpraševanje (*demand*) trga po izdelku se zmanjšuje, če njegova cena narašča. Ponudba (*supply*) se poveča, če cena izdelka narašča. Zakon ponudbe in povpraševanja pravi, da se stabilno ceno doseže samo, če je povpraševanje enako ponudbi.

Način, kako ceno regulira ponudba in povpraševanje se lahko pojasni s koncepti povratno-zančnega vodenja sistema. Za sistem izberemo štiri osnovne elemente; dobavitelja S, povpraševalca D, cenilec C in trg T, kjer se izdelek kupuje in prodaja. (Dejansko, navedeni elementi so interni in v splošnem zelo komplicirani procesi). Vhod v naš idealiziran ekonomski sistem je stabilnost zelenega izhoda, tj., tržne cene. Boljši opis za vhod je ničelna fluktuacija tržne cene (*zero price fluctuation*). Izhod je dejanska tržna cena (*actual market price*).

Sistem deluje na naslednji način: Cenilec dobi komando (nič) za stabilnost cene. Ta oceni ceno za tržne transakcije na osnovi informacij shranjenih podatkov o preteklih transakcijah. Ta cena stimulira proizvajalca (dobavitelja), da proizvede (in ponudi) določeno število proizvodov in povpraševalca, da zahteva določeno število proizvodov. Razlika med ponudbo in povpraševanjem predstavlja kontrolni signal za ta sistem. Če kontrolni signal ni enak nič, tj., če ponudba ni enaka povpraševanju, cenilec prične s spreminjanjem tržne cene v smeri, ki izenačuje povpraševanje in ponudbo. Torej oba, dobavitelj in povpraševalec, se lahko vzame kot tvorca povratne zveze, ker oba določata kontrolni signal.



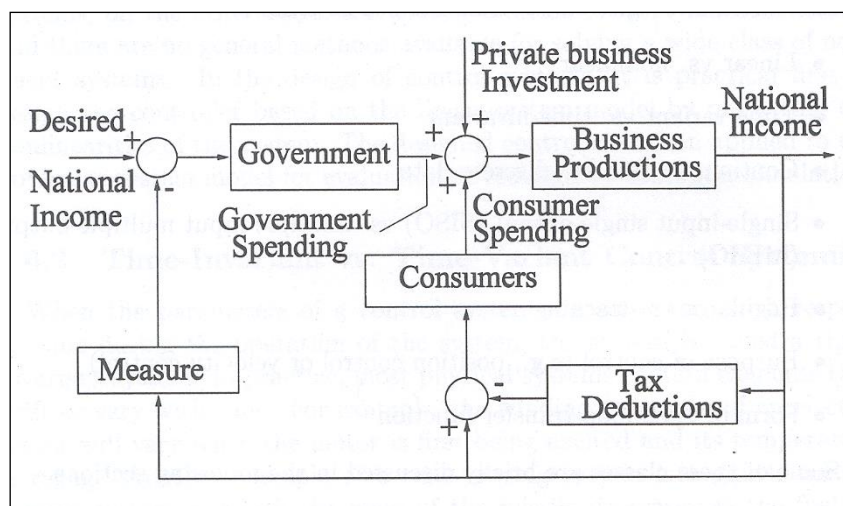
Slika 2.21: Sistem ponudbe in povpraševanja

### 2.2.4. DRUŽBENO-EKONOMSKI IN POLITIČNI REGULACIJSKI SISTEMI

Principi povratno-zančnih sistemov vodenja niso omejeni zgolj na tehniške (inženirske) in biološke sisteme. Obstaja tudi veliko uporabnih možnosti in dejanskih aplikacij v družbeno-

ekonomski-politični areni. Družba je sestavljena iz večjega števila povratno-zančnih sistemov in regulativnih teles, ki regulirajo in izvajajo ustrezne ukrepe, da se obdrži želen končni nivo (izhod).

Na sliki 2.22 je prikazan poenostavljen model povratno-zančnega sistema vodenja nacionalnega dohodka. Primer ponuja razumevanje vladne kontrole prihodkov in izdatkov. Čeprav družbeno-ekonomski-politični povratno-zančni sistemi niso zelo rigorozni, ponujajo uporabne informacije in razumevanje delovanja sistema.



Slika 2.22: Poenostavljen model povratno-zančnega sistema vodenja nacionalnega dohodka

### 3. MODELIRANJE DINAMIČNIH SISTEMOV

Poglavje obravnava dinamične sisteme, tj., sisteme katerih spremenljivke se časovno spreminjajo. V večini primerov se s časom ne spreminjajo samo vhodni (vzbujevalni) signali in izhodni (odzivi) ampak, v kateremkoli trenutku so tudi odvodi ene ali več spremenljivk odvisni od vrednosti spremenljivk sistema v danem trenutku. Osnova za konstrukcijo fizikalno-matematičnega modela nekega sistema so fizikalni zakoni kot npr. zakon o ohranitvi energije, Newton-ovi zakoni gibanja, Kirchhoff-ovi zakoni, ipd. To so zakoni, ki jim posamezne komponente sistema in povezave sledijo. Model sistema se tako popiše z eno ali več diferencialnih enačb.

Diferencialne enačbe predstavljajo temeljno orodje za predstavitev oz. zapis linearnih in nelinearnih dinamičnih sistemov. Do njih pridemo s postopki eksperimentalnega ali teoretičnega modeliranja. Direktno reševanje diferencialnih enačb (z integracijo v časovnem prostoru), je zelo kompleksno. Kompletna rešitev se sestoji iz splošne rešitve in partikularnih rešitev.

#### 3.1 MODELIRANJE IN SIMULACIJA

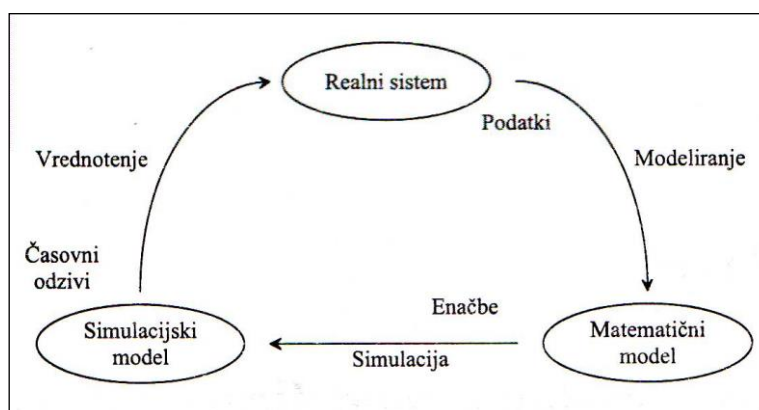
Kot že uvodoma povedano realni sistem predstavlja kombinacijo elementov (komponent), ki so medsebojno povezani v celoto in delujejo v smislu doseganja nekega cilja. Za preučevanje sistemov rabimo njihove podatke in povezave z njihovo okolico preko vhodov in izhodov.

Vhodi izvirajo iz okolice in niso direktno povezani z dogajanjem v sistemu, medtem ko so izhodi nekakšen produkt sistema, ko le-ta sodeluje z okolico.

Model sistema je lahko karkoli na čemer lahko eksperimentiramo z namenom odgovoriti na ustrezna vprašanja o sistemu.

Modeliranje in simulacija sta dva neločljiva postopka, ki vsebujeta kompleksne aktivnosti v zvezi s konstrukcijo modelov, ki predstavljajo realne sisteme (objekte, procese) in eksperimentiranje z modeli v smislu pridobivanja podatkov o obnašanju modeliranega sistema (procesa, objekta).

Modeliranje je vezano predvsem na relacije med realnim sistemom (procesom) in njegovimi (matematičnimi) modeli, medtem ko se simulacija ukvarja s povezavo med matematičnim modelom in simulacijskim modelom. Slednji tvori kot svoj izhod časovne odzive, ki se jih vrednoti glede na obravnavani sistem (proces), kar nekako zaključí krog. Odnosi med sistemom, modeliranjem in simulacijo so prikazani na slika 3.1.



Slika 3.1: Odnosi med sistemom in modeliranjem ter simulacijo

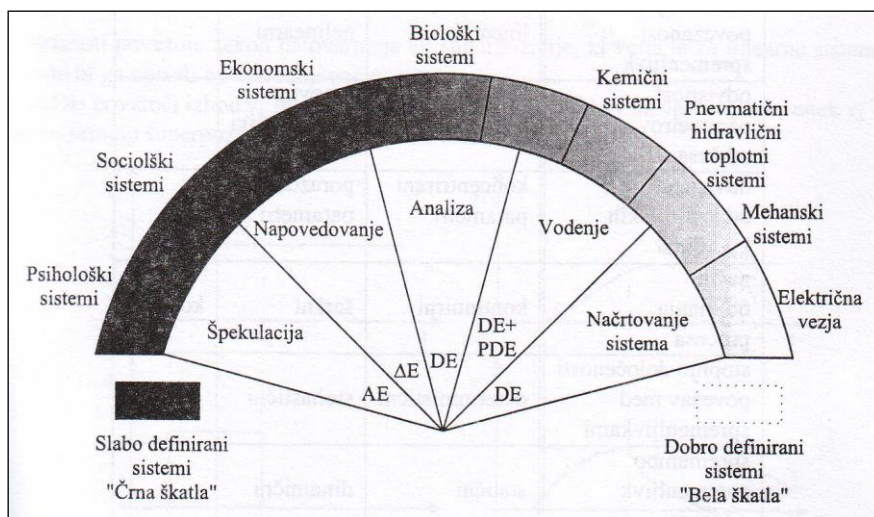
Namen študija sistemov vodenja (upravljanja) s pomočjo modeliranja in simulacije je doseganje različnih ciljev (opis in razlaga obnašanja sistema) ne da bi eksperimentirali na realnem sistemu (procesu, objektu).

Cilji študij sistemov vodenja:

- poboljšati poznavanje in razumevanje nekaterih mehanizmov delovanja obravnavanega sistema;
- napovedati obnašanje sistema v različnih situacijah (kjer kakršenkoli nivo predikcije predstavlja koristno informacijo);
- omogočiti načrtovanje sistemov vodenja in njih vrednotenje;
- oceniti parametre procesa, ki niso direktno merljivi;
- preizkušati občutljivost sistemskih parametrov;
- optimirati obnašanje sistema;
- omogočiti učinkovito odkrivanje napak;
- omogočiti raziskavo primerov, ki bi bili v realnem svetu dragi, tvegani ali problematični, kar je pomembno pri simulatorjih za učenje operaterjev.

Na sliki 3.2 je prikazan spekter področij uporabe, namenov in metodologij pri fizikalno-matematičnem modeliranju in simulaciji. Področja uporabe se spreminjajo od dobro (bela škatla) definiranih sistemov (elektrotehnični, mehanski, hidravlični, kemijski), do srednje (siva škatla) in slabo (črna škatla) definiranih sistemov. Pri slednjih tudi njihov model pomeni le še manjšo ali večjo špekulacijo ('moč' modela od desne proti levi pada!).

Za slabo definirane sisteme ali za sisteme pri katerih so vhodne funkcije slabo definirane, se zadnjih 15-ih letih za izdelavo modela in simulacij s pridom uporablja mehka logika (*fuzzy logic*).

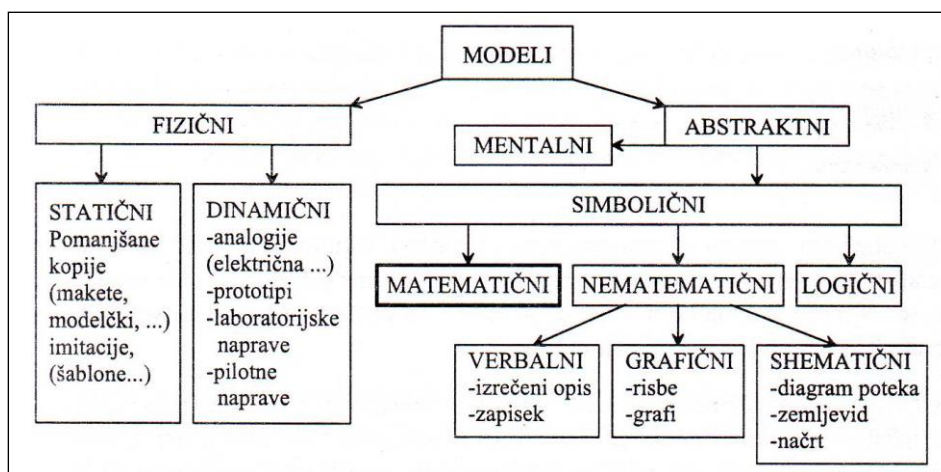


Slika 3.2: Spekter področij uporabe namenov in metodologij pri fizikalno-matematičnem modeliranju in simulaciji

(AE, ΔE, DE in PDE - algebrajske, diferenčne, diferencialne in parcialne diferencialne enačbe)

### 3.2 VRSTE IN KLASIFIKACIJA SISTEMOV IN MODELOV

Regulacijske sisteme je možno razvrstiti glede na različne kriterije. Eden od možnih načinov prikaza vrste modelov je podan na sliki 3.3.



Slika 3.3: Vrste modelov



Klasifikacija fizikalno-matematičnih modelov omogoča vpogled v možnosti, značaj in obliko modelov, na primer:

**Linearni, nelinearni in linearizirani regulacijski sistemi:** Večina regulacijskih sistemov (strogo vzeto) je nelinearnih, kar pomeni, da jih opišemo s sistemi nelinearnih algebrskih in diferencialnih enačb. Primer linearnega (levo) in nelinearnega (desno) sistema predstavljata spodnji enačbi:

$$a y_1 + b y_2 = Q \qquad c y_1^2 + b y_1 y_2 = Q$$

Nelinearne sisteme lahko lineariziramo, če se spremenljivke v okolici delovne točke malo spreminjajo.

Ena od glavnih razlik med linearnimi in nelinearnimi sistemi je v tem, da za linearne sisteme velja ti. princip superpozicije. Ta pravi, da je nek sistem linearen, če ima naslednjo lastnost (pri vseh začetnih pogojih sistema nič):

- a) če je rezultat neke vhodne veličine  $x_1(t)$ , izhod  $y_1(t)$  in
- b) rezultat vhodne veličine  $x_2(t)$ , izhod  $y_2(t)$ , potem
- c) vhod  $c_1 x_1(t) + c_2 x_2(t)$  proizvede izhod  $c_1 y_1(t) + c_2 y_2(t)$  za vse pare vhodov  $x_1(t)$  in  $x_2(t)$  in vse pare konstant  $c_1$  in  $c_2$ .

Nelinearnost ni vedno nezaželen pojav v regulacijskih sistemih. Včasih se jo namensko uporablja za doseg optimalnejšega delovanja. Tipični so stopenjski (ON-OFF) regulatorji, ki se pogosto uporabljajo npr. pri regulaciji temperature.

**Časovno nespremenljivi in časovno spremenljivi regulacijski sistemi:** Za časovno nespremenljive (stacionarne) regulacijske sisteme je značilno, da se njihovi parametri s časom ne spreminjajo. Odziv takega regulacijskega sistema je neodvisen od trenutka nastopa vhodnega signala.

Za časovno spremenljive (ne-stacionarne) regulacijske sisteme je značilno, da se eden ali več parametrov s časom spreminja. Torej je odziv takega sistema odvisen od trenutka nastopa vhodnega signala. Primer je regulacijski sistem z vesoljsko ladjo, ko se njena masa zaradi porabe goriva s časom manjša.

**Zvezni, diskretni in kombinirani (hibridni) regulacijski sistemi:** V zveznih regulacijskih sistemih so vse veličine definirane za vse čase  $t$ . Take sisteme se opiše z diferencialnimi enačbami, ki se jih lahko obravnava z L-transformacijo. Za diskretne regulacijske sisteme je značilno, da so veličine definirane samo v diskretnih časovnih trenutkih. Take sisteme se obravnava z diferenčnimi enačbami in s ti. Z-transformacijo. Če v regulacijskih sistemih nastopajo zvezne in diskretne veličine, jih imenujemo kombinirani (hibridni) regulacijski sistemi. V nadaljevanju se bomo ukvarjali samo z zveznimi sistemi.

**Enovhodni/enoizhodni in večvhodni/večizhodni regulacijski sistem:** Regulacijski sistem ima lahko en vhod in en izhod. Tak sistem imenujemo eno-vhodni/eno-izhodni ali univariabilni sistem [*Single Input-Single Output* (SISO) sistem]. Primer takega sistema je pozicijski servosistem, katerega vhod (referenca) je želeni položaj, izhod (regulirana veličina) pa dejanski položaj. Če ima sistem več vhodov in/ali izhodov, ga imenujemo več-vhodni/več-izhodni ali multivariabilni sistem [*Multi Input-Multi Output* (MIMO) sistem]. Značilno za tak sistem je, da

vhodi lahko vplivajo na različne izhode. Primer MIMO sistema je ročna regulacija pretoka in temperature s pomočjo dvo-ročne mešalne baterije

**Regulacijski sistemi s koncentriranimi in porazdeljenimi parametri:** Regulacijske sisteme, ki jih opišemo z navadnimi diferencialnimi enačbami (*ODE-Ordinary Differential Equation*), imenujemo sisteme s koncentriranimi parametri. Sisteme, ki jih opišemo s parcialnimi enačbami (*PDE-Partial Differential Equation*), pa so regulacijski sistemi s porazdeljenimi parametri. Primera ODE sta npr. Newton-ov in Ohm-ov zakon, primer PDE pa difuzijska enačba

$$\frac{\partial c(x, t)}{\partial x} = k \frac{\partial c(x, t)}{\partial t}$$

v kateri je koncentracija  $c$  odvisna od pozicije in časa.

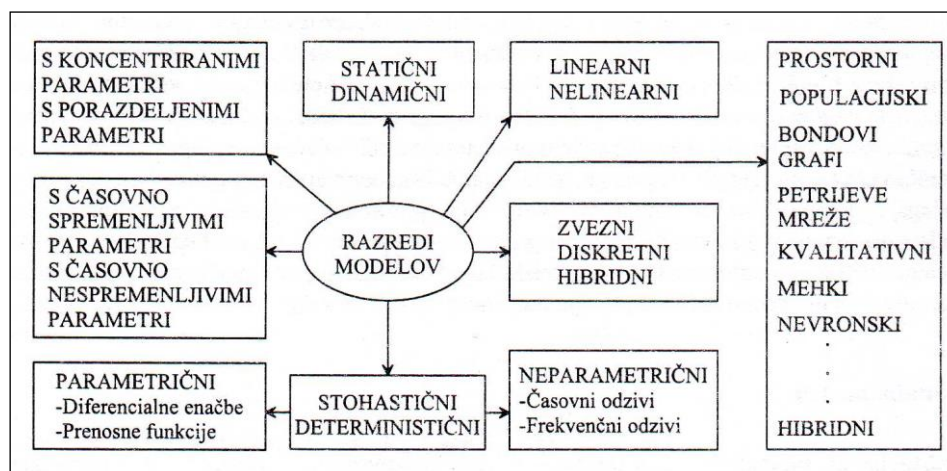
**Deterministični in stohastični regulacijski sistemi:** Regulacijski sistem je determinističen, če je njegov odziv predvidljiv in ponovljiv. V obratnem primeru je regulacijski sistem stohastičen. Pri stohastični regulacijski sistemi vstopajo naključni (stohastični) signali predvsem kot motnje (motilni signali). Za njihovo optimalno delovanje je potrebno načrtati posebne regulatorje, ki upoštevajo statistične parametre stohastičnih signalov. Deterministični regulatorji odpravljajo stohastične motnje samo do neke mere.

**Adaptivni regulacijski sistem:** Dinamične karakteristike večine regulacijskih sistemov niso konstantne. Učinke majhnih sprememb povratna zanka sicer zadovoljivo odpravi. Pri znatnejših spremembah parametrov pa mora imeti sistem sposobnost prilagajanja na te spremembe. Adaptivni (prilagodljivi) regulacijski sistem avtomatsko zazna spremembe v parametrih in v skladu s tem prilagodi regulacijski algoritem. Ti sistemi so torej časovno spremenljivi sistemi.

**Samoučeči regulacijski sistem (*Learning Control System*):** Če skušamo avtomatizirati sisteme vodenja v katerih je povratno-zančni regulator človek-operator pridemo do problemov, ko želimo delovanje operaterja popisati z enačbami. Človek ima namreč sposobnost učenja. Z več izkušnjami postane operater boljši regulator. Avtomatski regulacijski sistemi s podobnimi lastnostmi se imenujejo samoučeči regulacijski sistemi. Taki sistemi računajo iz predhodno zabeleženih podatkov nekaj novega. Predstavljajo eno najsodobnejših področij, ki povezuje umetno inteligenco, ekspertne sisteme in nevronske mreže.

**Procesni regulacijski sistem** je sistem v katerem je regulirana veličina temperatura  $T$ , tlak  $p$ , pretok  $q$ , nivo tekočine  $h$  ali  $pH$  vrednost. Ti sistemi se zlasti uporabljajo v kemijski industriji in v vsakdanjem življenju (regulacija  $T$ ).

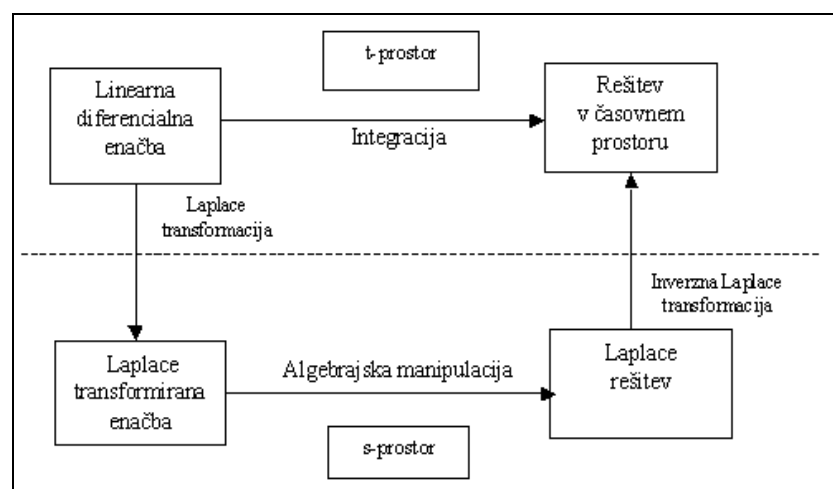
Eden od načinov razdelitve klasifikacije modelov je prikazan na sliki 3.4.



Slika 3.4: Klasifikacija modelov

### 3.3 L-TRANSFORMACIJA

Kot že omenjeno, je direktno reševanje diferencialnih enačb z integracijo v časovnem prostoru zelo kompleksno (slika 3.5). Obstaja pa nekaj tehnik reševanja takih inženirskih problemov osnovanih na zamenjavi funkcij realne spremenljivke (običajno čas ali razdalja) v funkcije kompleksne spremenljivke odvisne od frekvence. Tipičen primer je uporaba Fourier vrst za reševanje določenih električnih problemov. Pri reševanju posebnega tipa diferencialnih enačb (linearne, časovno nespremenljive) obstaja matematični pripomoček, to je L-transformacija, ki predstavlja pomembno orodje pri analizi in načrtovanju sistemov vodenja. Z uporabo L-transformacije je možno prevesti funkcije kot so sinusoida, dušena sinusoida, eksponencialna funkcija, itd. v racionalne funkcije kompleksne spremenljivke  $s$ . Operacije, kot npr. diferenciranje in integriranje, se v kompleksni ravnini  $s (= c + j\omega)$  izražajo kot algebrائية operacije. S pomočjo L-transformacije se tako diferencialne enačbe prevede v algebrajske (slika 3.5). Ob reševanju diferencialne enačbe z L- oz. inverzno  $L^{-1}$ -transformacijo dobimo hkrati ustaljeno stanje in prehodni pojav. Začetni pogoji se avtomatsko vključijo v rešitev.

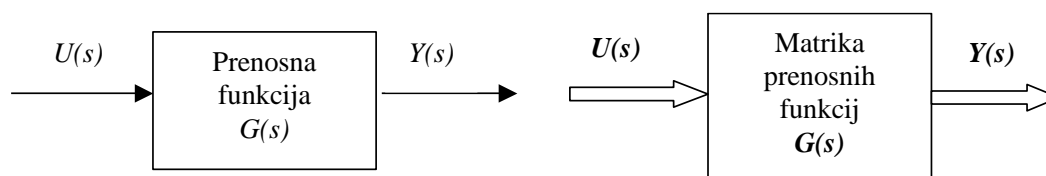


Slika 3.5: Laplace transformacija

Obstaja sicer matematična formulacija pogoja za obstoj L-transforma, ki pa ne sodi v okvir predmeta. Praktično velja, da za signale (gre za časovne funkcije), ki jih je možno fizikalno realizirati, obstaja L-transform. Za najpogosteje uporabljene L-transforme in časovne funkcije se poslužuje ustrezno tabelo.

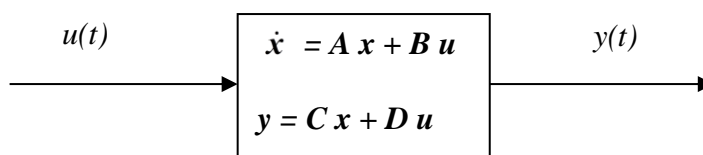
### 3.4 BLOČNI DIAGRAMI

Uvedba L-transformacije oz. Z-transformacije (za diskretne funkcije) vodi do dveh inženirsko uporabnih zapisov sistemov, t.j., prenosnih funkcij in bločnih diagramov. V bločnem diagramu so vse spremenljivke sistema povezane med seboj s funkcionalnimi bloki. Blok je torej temeljni element (simbol), ki ponazarja zvezo med njegovim vhom  $U(s)$  in izhodom  $Y(s)$  (slika 3.5). Često je podan s prenosno funkcijo  $G(s)$ . Puščici na vходу in izhodu določata smer signala. Signal torej poteka le v smeri puščic. Vhodni ali izhodni signal sta lahko enodimenzionalna (SISO sistemi, slika 3.5a) ali večdimenzionalna (MIMO sistemi, slika 3.5b). Poudarjene veličine  $\mathbf{R}(s)$ ,  $\mathbf{G}(s)$  in  $\mathbf{C}(s)$  predstavljajo matrike.

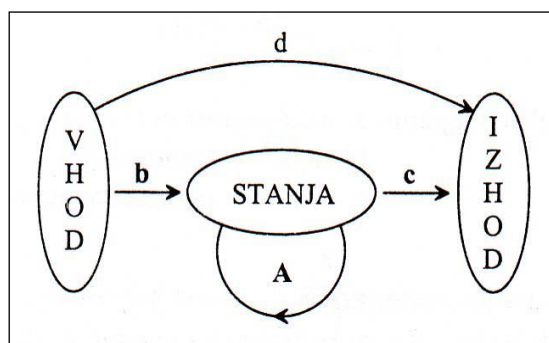


Slika 3.5: Funkcionalni blok; uni-variabilni- (levo), multi-variabilni sistem (desno)

Funkcionalni blok pri linearnih sistemih je lahko prestavljen tudi z drugimi možnimi zapisi, ki jih poznamo iz teorije sistemov in ne le s prenosnimi funkcijami. Ekvivalent bločnemu diagramu je zapis z diagramom poteka signalov. Zapis, na katerem je osnovana večina sodobnih postopkov analize in načrtovanja, je zapis v prostoru stanj (slika 3.6). Prikaz elementov zapisa v prostoru stanj je na sliki 3.7.



Slika 3.6: Funkcionalni blok z zapisom v prostoru stanj



Slika 3.7: Prikaz elementov zapisa v prostoru stanj

Najpogosteje uporabljeni prehodi med zapisi modela so:

1. Povezava med zapisom v prostoru stanj in prenosno funkcijo;
2. Povezava med diferencialno enačbo in prenosno funkcijo ter obratno;
3. Prevedba sistema zapisanega z diferencialno enačbo v prostor stanj in obratno;
4. Povezava diferencialna enačba – bločni diagram in obratno;
5. Povezava prosto stanj – bločni diagram (simulacijska shema) in obratno;
6. Povezava bločni diagram – prenosna funkcija in obratno.

### 3.4.1 SPLOŠNE ZNAČILNOSTI BLOČNIH DIAGRAMOV

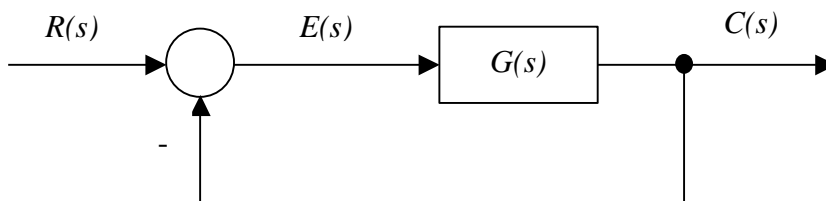
Sistem (vodenja) se lahko sestoji iz številnih komponent in povezav. Za nazorno predstavitev funkcij, ki jih posamezne komponente vnašajo v sistem, se pogosto uporablja bločne diagrame (slika 3.5). To je zlasti ugodno pri linearnih sistemih pri katerih je bločne sheme možno poenostavljati z uporabo ustreznih pravil. S tem pridemo iz kompleksnih shem do povezav, ki jasno kažejo prispevek določenega vhoda na izhod ali prispevek določene komponente bločnega diagrama na celotno vedenje sistema vodenja. Potrebno je poudariti, da bločni diagram vsebuje informacije o dinamičnem obnašanju sistema, ne vsebuje pa nobene informacije o fizikalni (notranji) konstrukciji sistema. Fizikalno zelo različni sistemi imajo lahko enake ali podobne bločne diagrame, kar pomeni, da se z bločnim diagramom sistem ne da popisati enolično. Vsak sistem je namreč možno opisati z več ekvivalentnimi bločnimi diagrami, ki so primerni za različne oblike analize.

### 3.4.2 BLOČNI DIAGRAM ZAPRTO-ZANČNEGA SISTEMA

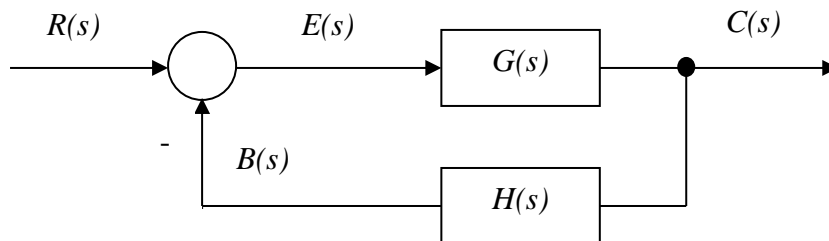
Na sliki 3.8 je prikazan bločni diagram zaprto-zančnega sistema. Pri tem  $G(s)$  predstavlja skupno prenosno funkcijo regulatorja in procesa (prenosno funkcijo direktne veje). Diagram jasno prikazuje, da pogrešek  $E(s)$ , kot razlika med referenčno in regulirano veličino, deluje na sistem  $G(s)$ . Izhod  $C(s)$  dobimo z množenjem prenosne funkcije  $G(s)$  z vhomom  $E(s)$ . Takemu zaprto-zančnemu sistemu, ki v povratni zanki ne vsebuje nobenega elementa, pravimo zaprto-zančni sistem z enotino povratno zanko.

V praksi pa je običajno potrebno regulirano veličino  $C(s)$  pretvoriti v neko drugo veličino, preden jo primerjamo z referenčno veličino (npr. temperaturo  $T$  v napetost). Omenjeno pretvorbo opravi prenosna funkcija  $H(s)$ , slika 3.9.  $H(s)$  predstavlja torej prenosno funkcijo

tipala in merilnega pretvornika ali pa regulator v povratni zanki. Signal, ki se primerja z referenčnim signalom, je torej  $B(s) = H(s) C(s)$ .



Slika 3.8: Bločni diagram zaprto-zančnega sistema z enotino povratno zanko



Slika 3.9: Zaprto-zančni sistem z elementom (merilnim sistemom)  $H(s)$

Glede na sliko 3.9 definiramo zaprto-zančno prenosno funkcijo  $G'(s)$ :

$$G'(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)}$$

S pomočjo zaprto-zančne prenosne funkcije izračunamo regulirano veličino po enačbi

$$C(s) = G'(s)R(s)$$

Odziv je torej odvisen od zaprto-zančne prenosne funkcije  $G'(s)$  in od vhodnega signala  $R(s)$ .

### 3.4.3 POSTOPEK ZA RISANJE IN POENOSTAVLJANJE BLOČNIH DIAGRAMOV

Bločni diagrami predstavljajo grafično upodobitev enačb, ki jih dobimo s postopkom matematično/fizikalnega modeliranja. Sam postopek presega okvir predmeta zato pristopamo k problemu bolj intuitivno. Izhaja se iz enačb v katerih se upošteva fizikalne zakone (Newtonov zakon, enačbe masnega in energijskega ravnotežja, Kirchoff-ove zakone, ...). Pomembna je tudi izbira vhodov in izhodov sistema, tj., kaj so vplivne veličine in kaj hočemo opazovati. Pri preoblikovanju tako dobljenih osnovnih enačb se vedno začne z enačbami, ki opisujejo 'shranjevanje' energije (npr. kondenzator, tuljava, ...). V teh enačbah se na levi strani izrazi tiste veličine, ki imajo ti. vztrajnost (npr. tok skozi tuljavo, napetost na kondenzatorju, ...). Matematično se ta preureditev kaže tako, da na desni strani enačb dobimo operator integriranja. Bločna shema preurejenih enačb vsebuje torej funkcionalne bloke integratorje. Ostale enačbe se preoblikuje sproti, ko se nazorno vidi katere spremenljivke nam bločni diagram že ponuja in katere je potrebno izraziti iz preostalih enačb.

Kompleksne bločne diagrame, ki so sestavljeni iz več povratnih zank, je možno poenostaviti z uporabo pravil algebre bločnih shem do oblike prikazane na sliki 3.5. Pri tem se zveza med vhodi in izhodi ne spremeni.

### 3.5 PRIMER MODELIRANJA

Voznik v osebnem vozilu: Predpostavimo, da je vozilo (slika 2.8) v 4-ti prestavi in da so karakteristike motorja take, da je izhodni vrtilni moment neodvisen od hitrosti v območju relativno majhnih variacij, ki jih postavljajo pogoji v tem primeru. To pomeni, da se naknadni potisk pedala za pospeševanje lahko vzame kot nenadno povečanje navora motorja iz obstoječe vrednosti na novo vrednost. Ta navor deluje na maso  $m$  vozila tako, da mu podeli pospešek in premaguje dodatni upor proti gibanju zaradi povečane hitrosti. Povečana potisna sila motorja zaradi spremembe v pospeševanju se prenese iz motorja na sklopko, menjalnik in diferencial kot vrtilni moment na kolesa, malo pomanjššan zaradi pospeševanja delov motorja, pogonskih gredi in delov v menjalniku. Za naš namen zadostuje, da obravnavamo avto kot maso  $m$ , in navor motorja kot vlečno silo  $F$ , ki deluje na kolo motorja (slika 2.8). S koeficientom  $b$  opišemo zvezo med zračnim plus kotalnim uporom ter hitrostjo  $v$ , ki naj je približno linearna v obsegu hitrosti, ki nas zanimajo. V tem primeru sistem avta opišemo ('modeliramo') z enačbo:

$$m \frac{dx^2}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} = F \quad (0.1)$$

Če nas predvsem zanima hitrost  $v$ , v enačbi (0.1)  $dx/dt$  izrazimo z  $v$  in  $dx^2/dt^2$  z  $dv/dt$  da dobimo:

$$m \frac{dv}{dt} + bv = F \quad (0.2)$$

Nadalje, če enačbo (0.2) delimo z  $b$  in razmerje  $m/b$  izrazimo s  $T$  dobimo:

$$T \dot{v} + v = \frac{F}{b} \quad (0.3)$$

Z L-transformacijo, pri ničelnih začetnih pogojih, tj.  $v(t=0) = 0$ , dobimo

$$(T s + 1) V = \frac{F}{b} \quad (0.4)$$

oziroma prenosno funkcijo

$$G(s) = \frac{V(s)}{F(s)} = \frac{1}{b} \frac{1}{Ts + 1} \quad (0.5)$$

Zapis v obliki prenosne funkcije, enačba (0.5), velja pri predpostavki, da je vozilo na začetku mirovalo.

Predpostavimo, da je v času  $t < 0$  vozilo mirovalo, v času  $t = 0$  pa je voznik 'pohodil' pedal za pospeševanje tako, da na kolesa deluje konstantna sila  $F_0$ . Sprememba 'referenčne' veličine  $F$  je v tem primeru skočna (stopničasta), njen L-transform pa  $F(s) = F_0/s$ , L-transform hitrosti pa

$$V(s) = \frac{F_0}{b} \frac{1}{s(Ts+1)} \quad (0.6)$$

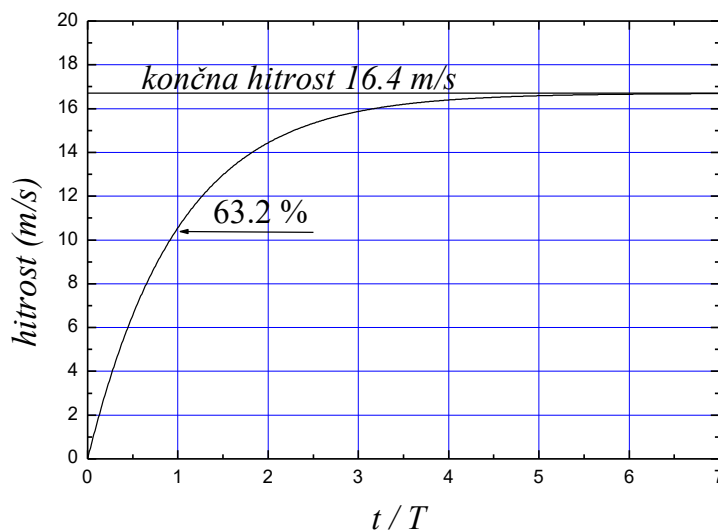
Rešitev gornje enačbe, ki podaja hitrost vozila, ko vozilo pospešuje iz mirovanja in premaguje linearno spremenljivi upor, je

$$v = \frac{F_0}{b} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad (0.7)$$

Izraz v oklepaju predstavlja 'eksponencialno' zaostajanje zato, ker vsebuje člen  $e^{-t/T}$ , ki predstavlja zaostajanje odziva sistema na nenadno spremembo pogojev. Faktor  $F_0 / b$  je dosežena 'končna' hitrost

$$v_{konc} = \frac{F_0}{b}, \quad (0.8)$$

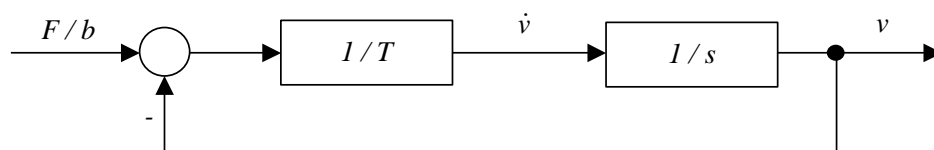
ki jo dobimo, če v enačbo (0.7) vstavimo  $t = \infty$ . Strogo matematično je to 'asimptotska' vrednost, v duhu regulacij pa vrednost hitrosti v 'ustaljenem' stanju. Ustrezni odziv sistema je prikazan na sliki 3.10. Naraščanje hitrosti sledi eksponencialni krivulji in doseže vrednost 63.2 % v času  $t = T$ . Čas  $T$  predstavlja merilo za 'počasnost' sistema za katerega se uporablja termin časovna konstanta.



Slika 3.10: Pospeševanje vozila iz mirovanja pri konstantnem navoru

Sistem, ki se zapiše s prenosno funkcijo oblike podano z enačbo (0.3), predstavlja ti. proporcionalni sistem prvega reda (P1). Razvrstitev sistemov po njihovem karakterju je obravnavana kasneje.

Ustrezna bločna shema tega primera, ki ga opiše enačba (0.3) je podana na sliki 3.11.



Slika 3.11: Bločna shema modela



Enačba (0.6) ne podaja prav natančnega opisa pospeševanja vozila iz mirovanja do maksimalno dosegljivih hitrosti zato, ker se koeficient upora vozila  $b$  spreminja na bolj kompliciran način kot predpostavljeno in zato ker navor motorja ne ostaja konstanten s hitrostjo motorja. Pri tem pa sploh nismo upoštevali poseg uporabe prestav. Vendar, uporaba enačbe (0.6), v omejenem območju hitrosti med 60 do 70 km/h (16.7 do 19.4 m/s) v obravnavanem primeru, je dovolj točna.

Predpostavimo, da je v času  $t < 0$  vozilo s konstantno hitrostjo, npr. 60 km/h, v času  $t = 0$  pa je voznik 'dodal plin' tako, da na kolesa deluje nova konstantna sila pri kateri bo vozilo peljalo s 70 km/h. Začetni pogoj za hitrost je  $v(t=0) = v_{zač} = 60$  km/h. Z L-transformacijo diferencialne enačbe (0.3) pri tem pogojju dobimo

$$(T s + 1)V = \frac{F}{b} + v_{zač} \quad (0.9)$$

Očitno, zapis v obliki prenosne funkcije v tem primeru ni možen. Recimo, da je za vožnjo s 60 km/h potrebna konstantna vlečna sila motorja  $F_0$ , za vzdrževanje hitrosti 70 km/h pa nova konstantna vrednost  $F_0 + \Delta F$ . Sprememba 'referenčne' veličine  $\Delta F$  je stopničasta, njen L-transform pa  $F(s) = \Delta F / s$ , L-transform hitrosti, ob upoštevanju enačbe (0.8), pa

$$V = \frac{F_0 + \Delta F}{b} \frac{1}{s(T s + 1)} \quad (0.10)$$

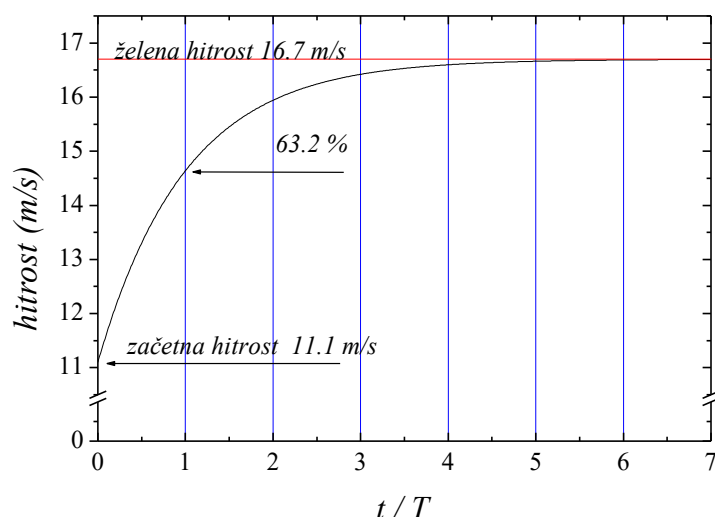
Pri tem je  $F_0 / b = v_{zač}$ . Enačba 0.10 ima isto obliko kot enačba 0.6 za razliko, da je slednji nastopa nova vlečna sila  $F_0 + \Delta F$  namesto  $F_0$ . Rešitev gornje enačbe, ki podaja hitrost vozila, ko vozilo pospešuje iz začetne hitrosti in premaguje linearno spremenljivi upor, je

$$v = \frac{F_0}{b} + \frac{\Delta F}{b} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) = v_{zač} + \Delta v \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad (0.11)$$

V obravnavanem primeru,  $v_{zač} = 16.7$  m/s in  $\Delta v = 2.7$  m/s, enačba (0.7) se glasi

$$v = 16.7 + 2.7 \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad (0.12)$$

Ustrezní odziv sistema je prikazan na sliki 3.12.



Slika 3.12: Pospeševanje vozila pri začetni hitrosti in konstantnem navoru

Če je voznik dovolj spreten (in potrpežljiv), trenutno prilagoditev hitrosti lahko izvede zgolj z enkratnim potiskom noge na pedal za plin. Pri tem bo nova vrednost za  $F$  enaka  $16.7xb$  in potek hitrosti v odvisnosti od časa kot prikazan na sliki 3.12. Vrednosti parametrov  $T$  in  $b$  za večji avtomobil so med 75 in 150 ter 10 in 20 v SI enotah, ustrezno.

Neizkušen voznik bo po vsej verjetnosti pritisnil na plin malo preveč ali premalo in bo kmalu spoznal svojo 'napako' ter naknadno prilagodil položaj pedala za doseg želene hitrosti. Način s katerim voznik pride do spoznanja, da ni prav dobro 'pritisnil' na pedal, temelji na osnovi nekega merjenja hitrosti avtomobila (brzinomer) in komunikaciji (oči, možgani, noga voznika) regulacijskemu podsistemu. Ta prenos informacije o 'kontrolirani' veličini (hitrosti) regulatorju (vozniku) predstavlja povratno povezavo (slika 2.9). Informacija, ki jo dobi voznik se sestoji iz želene hitrosti, ki jo veleva prometni znak, in dejanske hitrosti, ki jo kaže brzinomer. Razliko (pogrešek) med tema dvema voznik skuša minimizirati. Na ta način položaj pedala za pospeševanje postane odvisen od tega pogreška.

### 3.6 DELITEV REGULATORJEV V TEHNIKI

Regulatorje v tehniki delimo po različnih kriterijih. Glede na dinamične značilnosti delimo zvezne regulatorje na:

- proporcionalne (P);
- integrirne (I);
- proporcionalno-integrirne (PI);
- proporcionalno-diferencirne (PD);
- proporcionalno-integrirno-diferencirne (PID).

PID algoritem podaja enačba

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} = K_P \left[ e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right]$$

oz. prenosna funkcija

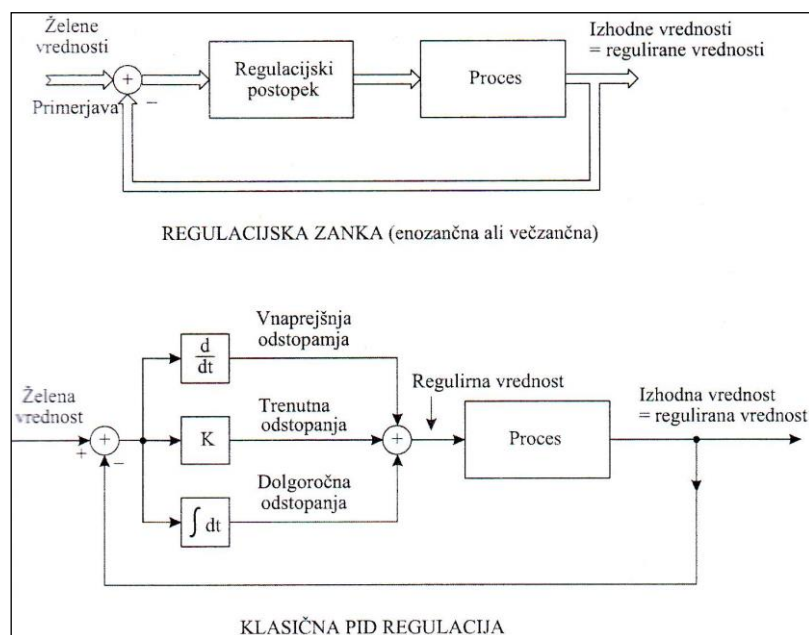
$$G_R = K_P \left( 1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right),$$

kjer je  $T_I = K_P / K_I$  in  $T_D = K_D / K_P$ .

PID regulator se realizira s paralelno kombinacijo P, I in D členov in ga prikažemo z bločno shemo kot na sliki 30. V bloke vpišemo ustrezno prenosno funkcijo ali vrišemo ikono, ki predstavlja odziv posameznih delov regulatorja na enotino stopnico.

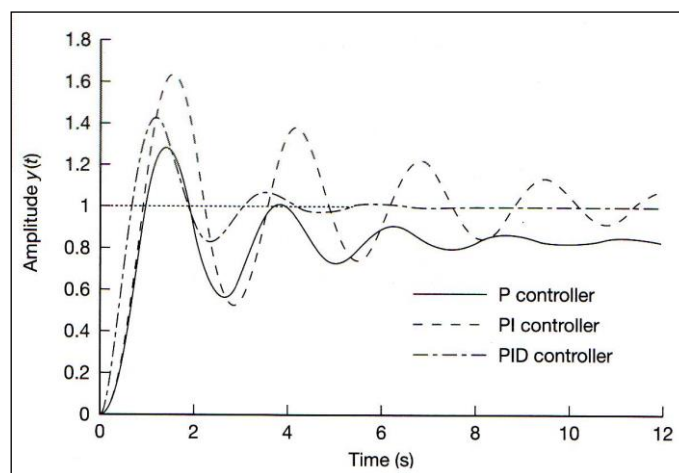
Obravnavani PID regulatorja vsebuje idealni diferenciator (člen D0). Zato ga imenujemo idealn PID regulator. Teh v praksi ni možno realizirati, saj bi pri stopničastem signalu povzročili v trenutku nastopa spremembe neskončno vrednost regulirne veličine. Praktično tak regulator ne bi bil uporaben, ker bi med drugim povzročil nasičenje izvršnih členov. Zato se v praksi uporablja PID regulator, ki vsebuje D1 člen. Prenosna funkcija v tem primeru je

$$G_R = K_P \left( 1 + \frac{1}{T_I s} + \frac{T_D s}{T' s + 1} \right)$$



Slika 4.1: Bločna shema zaprto-zančnega sistema in vloga PID regulatorja v zaprto-zančnem sistemu vodenja

Učinek vseh karakterističnih parametrov PID regulatorja se pokaže s pomočjo odziva regulatorja na stopničasti signal pogreška. Slika 4.2 nazorno prikazuje odzive P regulatorja, PI (če P regulatorju dodamo še I) in PID regulatorja (če PI regulatorju dodamo še D).



Slika 4.3: Odzivi določenega sistema na različne regulatorje