

## TEORIJA SISTEMA

### Uvod

#### 1.1. Istorijski pregled

Čovječanstvo je kroz istoriju pokušavalo da upravlja svijetom u kome živi. Od najranijih dana čovjek je spoznao da njegova snaga nije velika u odnosu na svijet oko njega. Mogao je da preživi samo uz mudrost i lukavstvo. Njegova najveća prednost u odnosu na sva ostala živa bića na Zemlji bila je superiorna inteligencija.

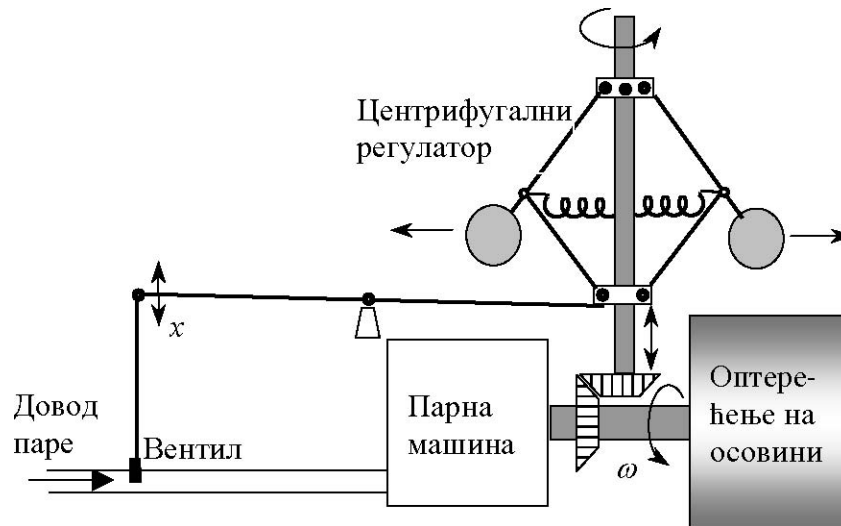
Čovjek kamenog doba je razvio alate i oružja od kremenca, kamena i kostiju. Takođe je otkrio da može naučiti životinje da slušaju njegove naredbe. Tako su nastale najranije forme sistema upravljanja. Veoma davno su zaprege uvedeni da preuzmu različite poslove, uključujući transport. Prošlo je dugo vremena prije nego je čovjek naučio da životinje zamjeni mašinama. Najvažniji globalni zahtjevi za opstanak i napredak čovječanstva su usmjereni na:

- obezbjeđivanje čistog vazduha, vode i hrane
- odlaganje svih vrsta otpadaka na efikasan način i da se što je moguće više spriječi zagađivanje okoline
- adekvatno obrazovanje i uvođenje tehnoloških inovacija, koje kroz različite forme sistema upravljanja doprinose manjem utrošku energije.

Fundamentalno je za svaki sistem upravljanja da postoji mogućnost da se mjeri njegov izlaz i preduzmu upravljačka djelovanja ako vrijednost izlaza odstupa od njene željene vrijednosti. Ovo nameće nužnost upotrebe mjernih elemenata. Čovjek ima mnogo «ugrađenih» senzora koje je na samom početku koristio za upravljanje vlastitih aktivnosti (pokreta), aktivnosti drugih i mnogo kasnije upravlja radom mašina. Naprimjer, pri upravljanju vozilom, najvažniji senzor je čulo vida, ali takođe čulo sluha i mirisa mogu doprinijeti postupcima (aktivnostima) vozača.

Prvi veliki korak u uvođenju mašina, koji je najavio industrijsku revoluciju, bio je razvoj parne mašine. Problem sa kojim su se suočili rukovaoци mašina toga vremena bio je kako upravljati brzinom obrtanja mašine bez stalnih intervencija čovjeka. Najuspješniji postupak, među mnogobrojnim drugim pokušajima, bilo je korišćenje kupastog klatna, čiji je ugao naginjanja bio funkcija (ali ne linearna) od ugaone brzine osovine. Ovaj princip je iskoristio Džems Vat (*James Watt*) 1769 godine u konstruisanju centrifugalnog regulatora brzine. Ovo se smatra prvim sistemom za automatsko upravljanje mašinom.

Princip rada Vatovog regulatora je skiciran na Sl. 1.1. Promjena brzine okretanja osovine ima za posljedicu promjenu ugla nagiba rotirajućih kugli. Ovo dalje prouzrokuje linearno kretanje rukavca koji, preko ventila, podešava protok pare u mašinu. Vat je bio praktičar i nije posvetio mnogo vremena teorijskoj analizi. Ipak, uočio je da pod određenim uslovima mašina počinje da se ponaša neprihvatljivo, jer brzina osovine osciluje oko njene željene vrijednosti. Eliminacija oscilacija, ili kako je mnogo šire poznato, nestabilnosti, je vrlo važan aspekt kod projektovanja svih sistema upravljanja.



slika 1.1

Maksvel (Maxwell) je, u radu objavljenom 1868, pomoću diferencijalnih jednačina opisao ponašanje centrifugalnog regulatora, linearizovao ovaj model u okolini ravnotežnog stanja i pokazao da stabilnost sistema zavisi od toga da li korijeni karakteristične jednačine imaju negativne realne dijelove. Problemom određivanja kriterija stabilnosti linearnih sistema bavili su se Hurvic (Hurwitz) (1875) i Rausa (Routh) (1905). Ruski matematičar Ljapunov (Лъапунѳ) (1893), je problem stabilnosti proširio na razmatranje stabilnosti nelinearnih sistema. Osnovni matematički okvir za teorijsku analizu razvili su Laplas (Laplace) (1749-1827) i Furije (Fourier) (1758-1830).

Rad u Belovim (Bell) laboratorijama (tridesetih godina dvadesetog vijeka) na pojačavačima sa povratnom spregom, zasnovan je na konceptu frekvencijskog odziva i sveden na matematički problem funkcija kompleksnih promjenljivih. Problem je razmatrao Nikvist (Nyquist) (1932) u radu «*Regeneration Theory*», u kome se objašnjava kako se može odrediti stabilnost sistema korištenjem metoda u frekvencijskoj oblasti. Analizu su proširivali Bode (Bode) (1945) i Nikols (Nichols) kroz narednih 15 godina i postavili temelje postupaka za projektovanje sistema upravljanja, koji se i danas vrlo široko koriste.

Drugi važan pristup projektovanju sistema upravljanja razvio je Ivens (Evans) (1948). Na osnovu radova Maksvela i Rausa, u metodi geometrijskog mjesta korijena (*root locus method*) Ivens je definisao pravila i tehnike koje omogućavaju da se promjena korijena karakteristične jednačine u zavisnosti od nekog parametra predstave grafički.

## 1.2 Osnove sistema upravljanja

### 1.2.1 Ilustracije sistema kroz primjere

Prije definisanja strukture sistema upravljanja neophodno je definisati šta se podrazumijeva pod pojmom sistem. Sistem ima različita značenja za različite ljude i može podrazumijevati isključivo fizičke sisteme kao što je mehanizovani sto računarski upravljanih (*Computer Numerically Controlled – CNC*) alatnih mašina ili alternativno, postupci neophodni za kupovinu sirovine zajedno sa upravljanjem njihovim inventarisanjem u sistemu za planiranje potražnje materijala.

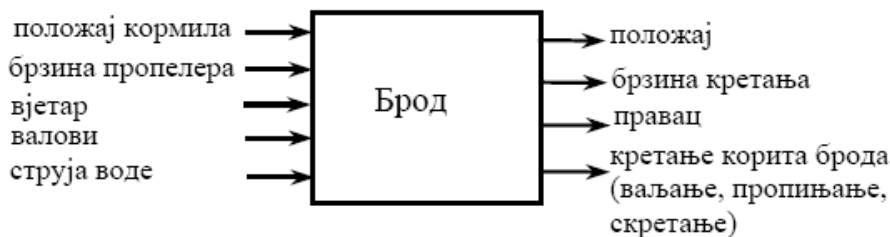
Međutim, svi sistemi imaju neka zajednička svojstva. Naprimjer, potrebna je specifikacija ulaza i izlaza za svaki sistem. U slučaju mehanizovanog stola CNC alatne mašine, ulaz može biti snaga motora za pokretanje, a izlazi mogu biti pozicija, brzina i ubrzanje stola. Za sistem planiranja nabavke materijala ulazi treba da uključuju narudžbe za prodaju i predikciju prodaje (ugrađene u glavni plan proizvodnje), evidenciju materijala, dijelova, komponenata i poluproizvoda, popis inventara i informacije koje se odnose na potrebne kapacitete u skladu sa planom. Sistemi planiranja nabavke materijala generišu različite izlazne izvještaje koji se koriste u planiranju i upravljanju radom fabrike. Oni uključuju izdavanje narudžbi, status inventara, narudžbe sa prekoračenjem roka i predviđanje zaliha. Neophodno je precizno definisati ograničenja sistema, zajedno sa ulazima i izlazima tako da se ostane unutar tih ograničenja. Načelno, sistem se može definisati kao skup materije, dijelova, komponenata ili postupaka koji su uključeni unutar nekih specificiranih ograničenja kao što je prikazano na Sl.1.2. Sistem može imati bilo koji broj ulaza i izlaza.

U teoriji upravljanja, veoma je bitan način na koji izlazi sistema reaguju na promjene ulaza sistema (to jest odziv sistema). Inžinjer koji projektuje sistem upravljanja treba pokušati da obezbijedi odgovarajući odziv sistema preko specifikacije matematičkog modela sistema. Poznavanje ulaza sistema, zajedno sa njegovim matematičkim modelom omogućava da se izračunaju izlazi sistema.



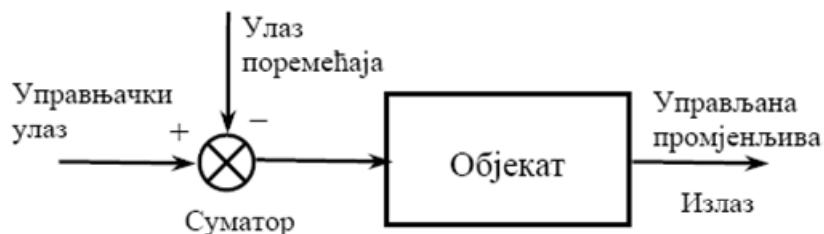
slika 1.2

Uobičajeno je da se upravljanje sistemom odnosi na upravljanje objektom, koji se kao i drugi elementi predstavlja blok dijagramom. Nekim ulazima se može direktno upravljati i mogu se koristiti za upravljanje izlazima objekta. Oni su poznati kao upravljački ulazi. Postoje drugi ulazi kojima se ne može upravljati i oni utiču da izlazi objekta odstupaju od njihovih željenih vrijednosti. Ovakvi ulazi se nazivaju poremećajima.



Šlika 1.3

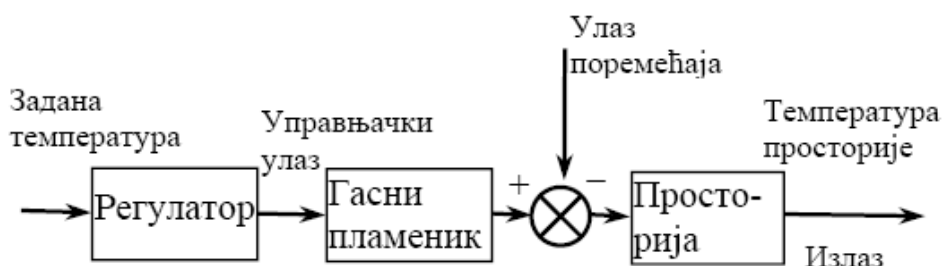
U slučaju broda prikazanog na Sl.1.3, položaj kormila i brzina propelera su upravljački ulazi, čije se vrijednosti mogu podešavati za postizanje određenih vrijednosti izlaza, na primjer, pravca i brzine kretanja naprijed. Takođe, poremećaji (kao što su vjetar i valovi u ovom primjeru) će prouzrokovati dodatno kretanje broda (valjanje, propinjanje i skretanja) koje nije poželjno. Uopšteno, zavisnost između upravljačkog ulaza, ulaznih poremećaja, objekta i upravljane promjenljive je ilustrovana na Sl. 1.4.



*Slika 1.4.*

### 1.2.1.1. Sistem upravljanja temperaturom prostorije

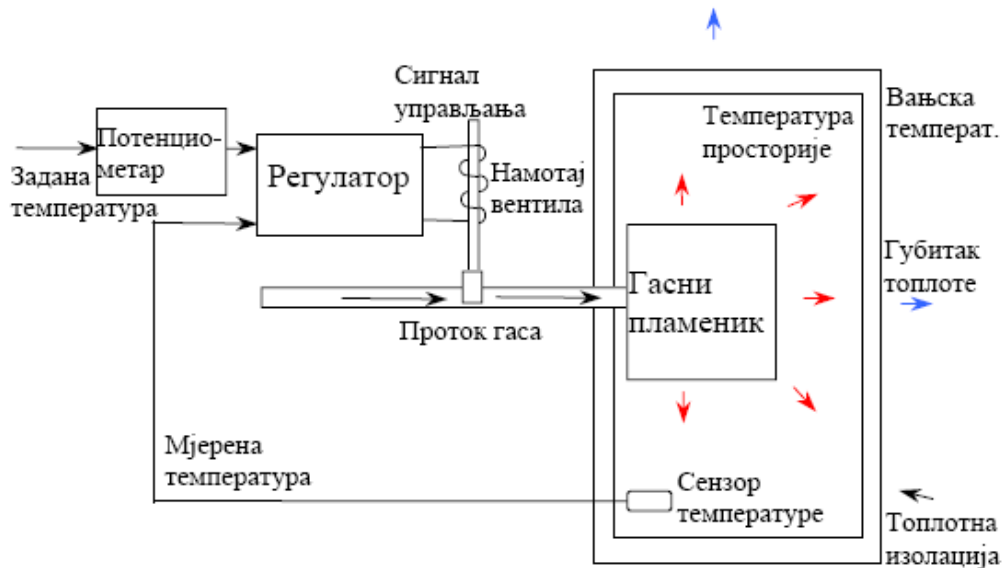
Treba primjetiti da struktura na Sl.1.4. ima opšti karakter i da se može koristiti za predstavljanje objekata različite prirode. Za ilustraciju se može uzeti prostorija u kojoj je potrebno održavati zadatu temperaturu pomoću gasnog grijača. U tom slučaju je protok gasa plamenika upravljački ulaz, a izlazna veličina (upravljana promjenljiva) je temperatura prostorije. Ulazni poremećaj je gubitak toplote.



*Slika 1.5.*

Automatsko upravljanje temperaturom prostorije bi se moglo realizovati kao jednostavan sistem predstavljen na Sl.1.5. Ovakva struktura predstavlja realizaciju sistema u otvorenoj sprezi. Temperatura prostorije se zadaje regulatoru. Regulator treba automatski mijenjati upravljački signal tako da temperatura prostorije bude jednaka ili vrlo bliska zadanoj. Intuitivno je jasno da će zahtjev biti ispunjen ako je ponašanje regulatora prilagođeno dinamici gorionika i prostorije. Biće pokazano da postoje opšti principi u projektovanju takvog regulatora. Ipak, bez obzira na ovu činjenicu, struktura Sl.1.5 ima jedan veoma bitan nedostatak. Osnovni problem upravljanja u otvorenoj sprezi je osjetljivost izlaza sistema (upravljane promjenljive) na promjene ulaznih poremećaja. Za ilustraciju uzmimo da je potrebno održavati temperaturu prostorije na  $20^{\circ}\text{C}$ . Ako je temperatura prostorije  $20^{\circ}\text{C}$  regulator treba da daje takvu vrijednost upravljačkog signala za koju je oslobođena toplota iz gasnog grijača jednaka gubitku toplote. Gubitak toplote je ulaz poremećaja i on će mijenjati temperaturu prostorije. Svaka promjena gubitka toplote će uticati na promjenu temperature

prostorije, a regulator se neće suprotstaviti takvoj promjeni. Da bi temperatura ostala konstantna potrebno je postići da se oslobođena toplota iz gasnog grijača mijenja automatski sa djelovanjem poremećaja. Rješenje da regulator ima podatke o djelovanju svih poremećaja tako što se ove veličine mjere tehnički nije opravdano, čak ni izvodljivo (ako se uzme u obzir veoma veliki broj poremećaja različite prirode). Da bi temperatura prostorije ostala konstantna prvi zahtjev je da se detektuju ili izmjere promjene temperature prostorije. Drugi zahtjev jeste da se upravlja ili mijenja oslobođena energija iz gasnog plamenika, ako je detektovana temperatura prostorije drugačija od željene temperature.



Slika 1.6.

Fizička realizacija sistema za upravljanje temperaturom prostorije prikazana je na Sl. 1.6. Izlazni signal senzora temperature, (kao što su termopar ili termootpornik) poredi se sa željenom temperaturom. Svaka razlika, ili greška, ima za posljedicu da regulator šalje upravljački signal namotaju ventila za gas koji prouzrokuje linearno kretanje osovine ventila i time podešava protok gasa u gorionik gasnog plamenika. Željena temperature se obično dobija ručnim podešavanjem potenciometra. Detaljniji blok dijagram je prikazan na Sl. 1.7. Mjerne jedinice signala u upravljačkoj petlji su navedeni u zagradama.



Slika 1.7.

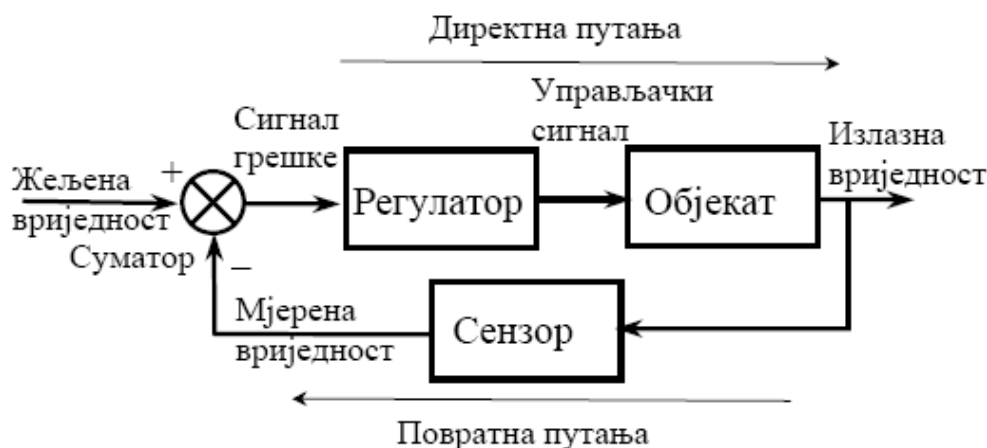
Stacionarno stanje će biti uspostavljeno kada su izjednačena stvarna i željena temperatura i kada ulazna toplotna energija tačno pokriva gubitak toplote kroz zidove prostorije.

Sistem može raditi na dva načina:

(a) Proporcionalno upravljanje: Tada je linearno pomjeranje zasuna ventila proporcionalno greški. Na taj način se postiže kontinualna modulacija toplote dovedene u prostoriju čime se može postići veoma precizno upravljanje temperaturom. Ovakvo upravljanje se koristi kada je tačnost važnija od cijene, recimo potrebna tačnost temperature bolja od  $1^{\circ}C$  (naprimjer operacione sale u bolnicama, industrijske prostorije za preciznija mjerenja i tome slično).

(b) Uključeno-isključeno (eng. on-off) upravljanje: Takođe se naziva termostatičko (eng. *bang-bang*) upravljanje, kada je gasni ventil potpuno otvoren ili potpuno zatvoren, to jest grijač je uključen ili isključen. Ovakav način upravljanja stvara oscilacije stvarne temperature od približno  $2^{\circ}C$  ili  $3^{\circ}C$  oko željene temperature, ali je jeftiniji za implementaciju i koristi se za jednostavnije primjene (naprimjer, sistemi grijanja u domaćinstvima).

U primjeru sistema upravljanja temperaturom prostorije dati su principi koji imaju opšti karakter. Uopšteno, sistem koji je projektovan da upravlja izlazom objekta mora da sadrži najmanje jedan senzor i regulator, kao što je prikazano na Sl.1.8.



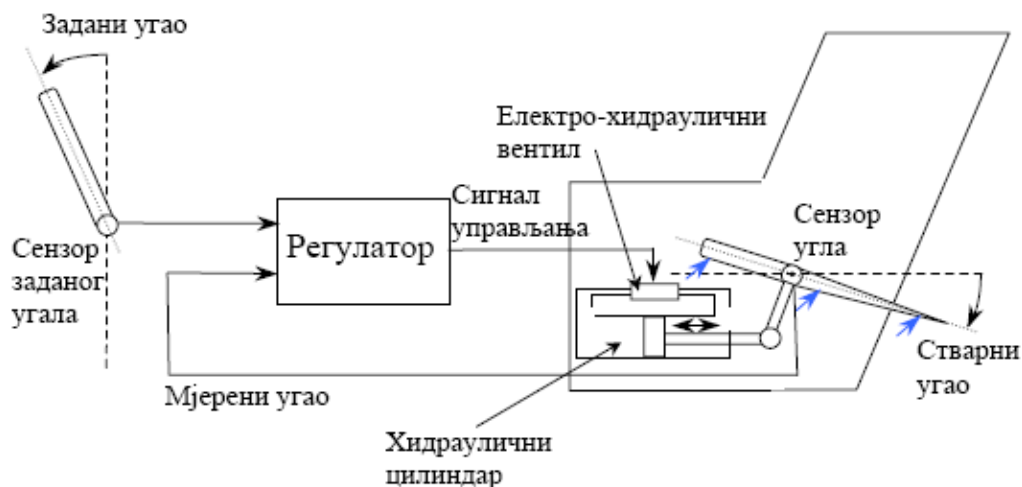
**Slika 1.8.**

Sl. 1.8 prikazuje opšti blok dijagram za sistem u zatvorenoj sprezi, ili sistem upravljanja u zatvorenoj sprezi (eng. *feedback control system*). Regulator i objekat se nalaze u direktnoj putanji toka informacija (signala), a senzor je u povratnoj putanji (vezi). Izmjerena vrijednost izlaza objekta se poredi u tački sumiranja sa željenom vrijednošću. Razlika, ili greška, se vodi u regulator koji generiše upravljački signal koji djeluje na objekat dok se njegov izlaz ne izjednači sa željenom vrijednošću. Ovakav pristup se nekada naziva sistem upravljanja po grešci.

### 1.2.1.2 Upravljanje krilcima aviona

U cilju ilustracije da je struktura sa Sl.1.8 opšta, razmotrimo primjer sistema upravljanje krilcima aviona. U ranoj fazi aeronautike, upravljačke površine aviona su bile pokretane užadima koja su povezivala upravljačku palicu i krilca aviona. Moderni avioni velikih brzina i gabarita trebaju uređaje povećane snage, ili servomehanizme koji će obezbediti velike sile neophodne za pokretanje upravljačkih površina.

Sl. 1.9 ilustruje sistem upravljanja krilcem za mlazne avione velikih brzina.

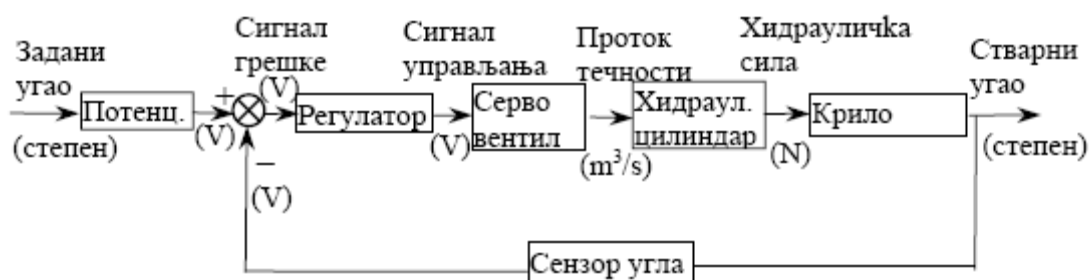


Slika 1.9.

Kretanje upravljačke palice daje signal sa ulaznog ugaonog davača koji se poredi sa izmjerenim uglom krilca u regulatoru koji generiše signal proporcionalan grešci. Ovaj signal napaja elektrohidraulički servoventil koji generiše kretanje zasuna namotaja proporcionalno upravljačkom signalu, čime je omogućeno da tečnost pod visokim pritiskom ulazi u hidraulički cilindar. Razlika pritisaka tečnosti u cilindru s jedne i druge strane klipa generiše pogonsku silu za pokretanje krilca.

Hidraulički servomehanizmi imaju dobar odnos snaga/težina i pogodni su za primjene koje zahtijevaju da se velike sile realizuju malim i laganim uređajima.

U praksi, «simulator osjećaja» se dodaje na upravljačku palicu da omogući pilotu da osjeti intenzitet aerodinamičke sile koja djeluje na upravljačku površinu, tako da se može spriječiti neuobičajeno veliko opterećenje krila i površine repa. Blok dijagram sistema upravljanja zakrilcima je prikazan na Sl. 1.10.

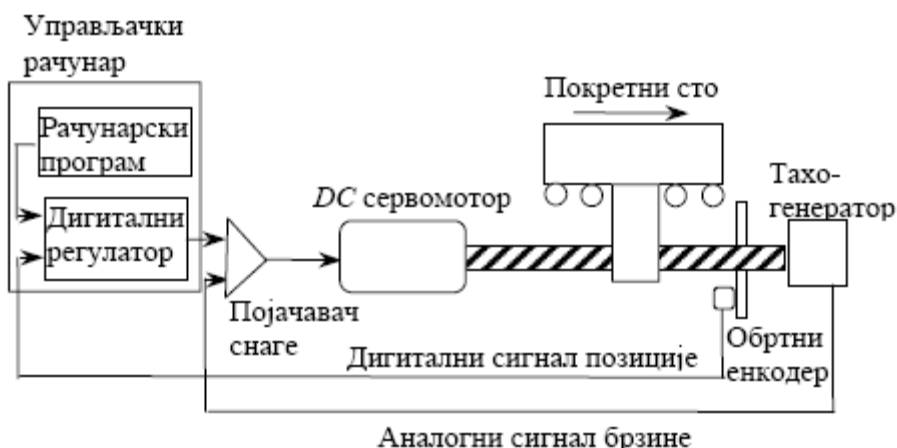


Slika 1.10.

### 1.2.1.3 Računarski upravljana (eng. Computer Numerically Controlled – CNC) alatna mašina

Mnogi sistemi su računarski upravljani, a na Sl. 1.11 je prikazan primjer sistema za upravljanje CNC alatnom mašinom. Informacije koje se odnose na oblik radnog komada i u skladu sa tim potrebno kretanje mehanizovanog stola su smještene u memoriju u obliku računarskog programa. Zahtijevane pozicije kretanja su u odgovarajućoj digitalnoj formi, u sekvencijalnom obliku, pa se u regulatoru sistema u zatvorenoj sprezi ovi signali porede sa

digitalnim povratnim signalom sa obrtnog enkodera. Tako se dobija signal greške u digitalnoj formi. Ovaj signal se konvertuje u analogni upravljački signal koji, kada se pojača, pokreće istosmjerni servomotor. Na izlaznu osovinu servomotora je (u nekim slučajevima preko reduktora) povezano svrdlasto vratilo na koje je pričvršćen mehanizovani sto, obrtni enkoder i tahogenerator. Namjena poslednjeg pomenutog elementa, koji daje analogni signal proporcionalan brzini, je da formira unutrašnju ili lokalnu upravljačku petlju sa ciljem da priguši ili stabilizuje odziv sistema. Blok dijagram sistema upravljanja CNC alatnom mašinom je prikazan na Sl. 1.12.



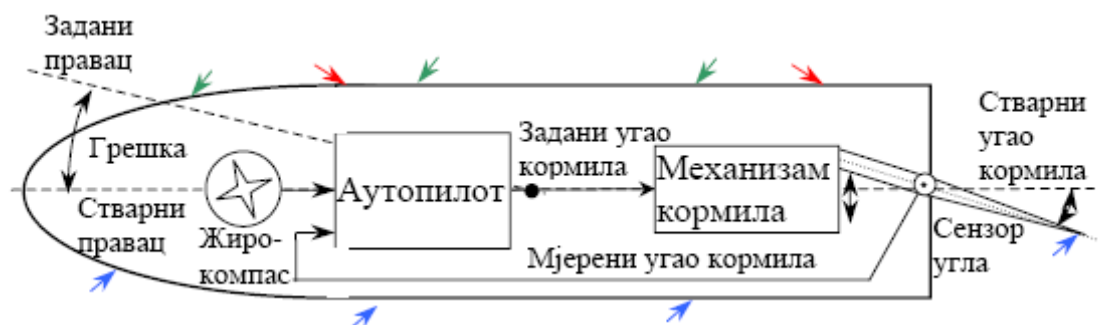
Slika 1.11.



Slika 1.12.

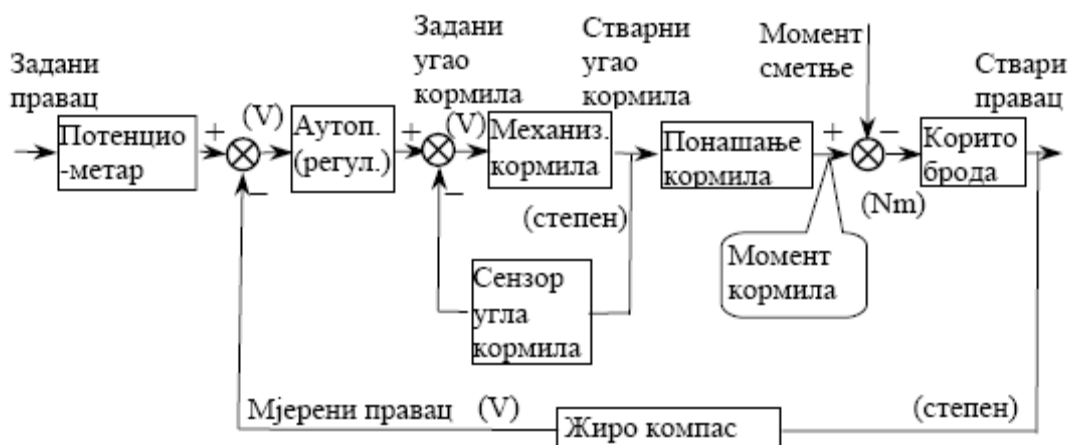
### 1.2.1.3 Sistem automatskog upravljanja brodom

Namjena autopilota broda je da održava brod na zadatom kursu kada na njega djeluje niz poremećaja kao što su vjetar, valovi i struja vode, kao što je prikazano na Sl. 1.3. Ovaj metod upravljanja je poznat kao održavanje kursa. Autopilot takođe može biti iskorišćen prilikom promjene kursa na novi pravac, što je poznato kao promjena kursa. Osnovni elementi autopilotskog sistema su prikazani na Sl. 1.13.



Slika 1.13.

Стварни правац се мјери žиро-компасом (или magnetski компас на мањим пловним објектима) и пореди са жељеним правцем, који autopilotу уноси «кормилар» брода. Autopilot, или регулатор, рачуна потребни угао кормила и шаље управљачки сигнал на мекханизам кормила. Угао актуатора кормила се прати помоћу сензора угла закрета кормила и пореди са жељеним углом кормила, тако да формира петљу управљања која се не разликује од система управљања кривцима приказаног на Сл. 1.9. Кормило даје управљачки момент на труп брода тако да усмјерава стварни правац брода у складу са жељеним курсом док вјетар, валови и струја дају моменте који могу помоћи или спрјечавати такво дјеловање. Блок дијаграм система је представљен на Сл. 1.14.



Slika 1.14.

### 1.3 Опште теоретске основе система automatskog управљања

Имајући у виду заједничке карактеристике својствене свим разматраним системима проблем управљања се формално може дефинисати на слједећи начин.

*Дефиниција Centralni problem u управљању је да се пронађе технички остварљив начин како да се дјелује на дати процес тако да његово понашање буде што је могуће ближе неком жељеном. Осим тога, ово апроксимативно понашање треба да се постигне у присуству неких неодређености процеса и неконтролабилних ванјских поремећаја који дјелују на процес.*

Пokuшajмо рјешенје у смислу горње дефиниције добити помоћу инверзије. Да би описали рјешенје проблема управљања преко инверзије претпоставићемо слједеће:

- Da znamo željeno ponašanje izlaza.
- Da znamo kakav efekat na izlazu izaziva neko djelovanje na ulazu sistema.

Izrazimo pretpostavke odgovarajućim signalima i relacijama između tih signala. Neka je zahtijevano ponašanje specificirano pomoću skalarnog referentnog signala  $r(t)$  koji se odnosi na poseban izlaz procesa  $y(t)$ . Recimo da takođe imamo na raspolaganju jednu manipulativnu promjenljivu  $u(t)$ . Označićemo sa  $y$  funkciju vremena tj.  $y = \{y(t): t \in R\}$ . Takođe ćemo sa  $f \bullet u$  označiti nelinearno preslikavanje od  $u$  na  $y$ . Neka je relacija između ulaza i izlaza poznata i data sa

$$y = f \bullet u$$

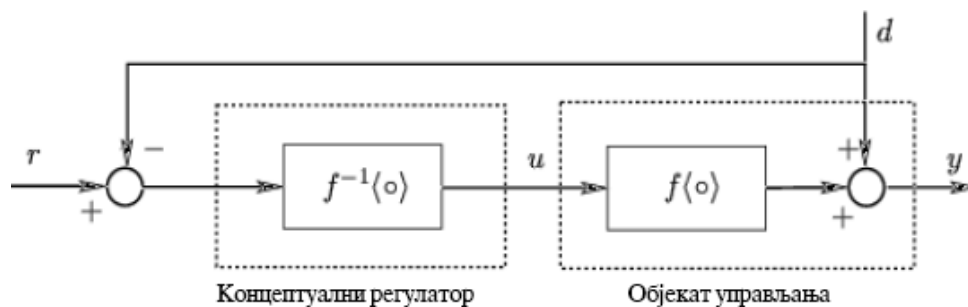
gdje  $f$  označava ulazno-izlaznu transformaciju objekta upravljanja. Ovom relacijom je ustvari dat model OU. Problem upravljanja je da se pronađe način kako da se generiše  $u$  da bi se postiglo da je  $y=r$ .

Tada jednostavno treba odrediti inverziju relacije između ulaza i izlaza sistema kako bi znali koje ulazno djelovanje izaziva željeno ponašanje na izlazu. U duhu inverzije, direktno rješenje se dobija iz uslova

$$y = r = f \bullet u$$

iz kojeg se dobija zakon upravljanja kao rješenje za  $u(t)$ , to jest  $u = f^{-1} \bullet r$

Ova ideja je ilustrovana na Sl. 1. 15, gdje se takođe pretpostavlja mjerenje efekta poremećaja na izlazu.



**Slika 1.15.**

Rješenje je jednostavno, ali ono pretpostavlja stroga ograničenja kao što su

- O1** Potrebno je da transformacija  $f$  opisuje objekt upravljanja (OU) egzaktno.
- O2** Potrebno je da transformacija  $f$  bude dobro definisana u smislu da ograničen ulaz proizvodi ograničen izlaz, to jest da je transformacija stabilna.
- O3** Inverzna transformacija  $f^{-1}$  takođe treba da zadovoljava O2.
- O4** Nikakvi poremećaji na OU nisu dozvoljeni
- O5** Rezultujuće djelovanje  $u$  treba biti ostvarljivo i pri tome se ne smiju narušiti nikakva ograničenja.

Pojasnimo navedena ograničenja. Mnogi procesi su kompleksni (fizički distribuiran, vremenski promjenljiv, jako nelinearan, multivarijabilan i sl.) i teško je dobiti njihove tačne modele. Znači da je teško zadovoljiti O1. O2 nije zadovoljeno u svim slučajevima kada OU ima komponentu integracije. Ako u prenosu signala od regulatora do izlaza posto transportno kašnjenje O3 nije ispunjeno pošto se inverzija kašnjenja ne može fizički realizovati. U svim do sada navedenim primjerima su postojali poremećaji na OU pa O4 u svim takvim slučajevima nije zadovoljeno. Naravno da su ovo vrlo zahtijevna ograničenja. Dakle, jedini

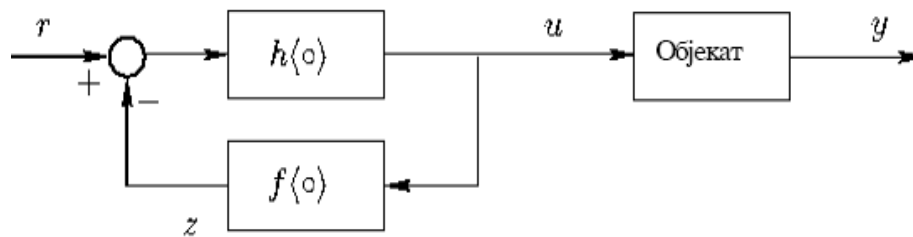
razumljiv pristup je da se prihvati da ona postoje i da se traže rješenja unutar takvih ograničenja. Teorija automatskog upravljanja se upravo bavi time kako da se promijeni arhitektura upravljanja tako da se inverzija postigne na robustniji način i da se naprijed navedena ograničenja mogu ublažiti. U tom cilju modifikujmo zahtjeve na sistem sa strogo matematičkih na »tehničke« (u duhu navedene definicije) :

**Z1** Da se ograniči pažnja na one probleme gdje zahtijevano ponašanje (referentni signali) pripadaju određenim klasama i gdje se željeno ponašanje postiže samo aproksimativno.

**Z2** Da se traže aproksimativne inverzije.

Važna osobina korišćenja povratne sprege je da se pomoću nje može postići aproksimativna inverzija dinamičke transformacije bez potrebe za eksplicitnom inverzijom.

Pretpostavimo da se konceptualni regulator sa Sl.1.15 realizuje kao na Sl.1.16.  $f$  predstavlja model procesa.



Slika 1.16.

Iz dijagrama se vidi da vrijedi

$$u = h \bullet (r - z) = h \bullet (r - f \bullet u)$$

Dakle

$$h^{-1} \bullet u = r - f \bullet u$$

iz čega dobijamo

$$u = f^{-1} \bullet (r - h^{-1} \bullet u)$$

Ova relacija pokazuje da se pomoću povratne sprege (petlje) na Sl.1.16 implementira aproksimativna inverzija od  $f$  ukoliko je ispunjeno

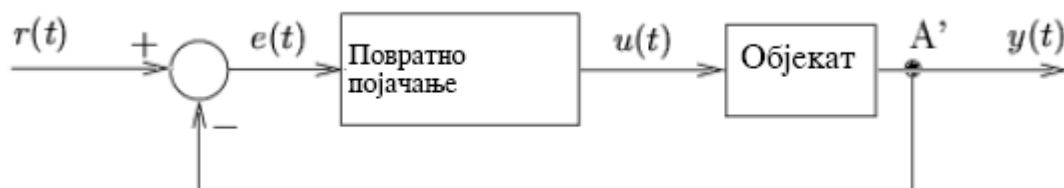
$$r - h^{-1} \bullet u \approx r$$

Iz ovoga se vidi da ukoliko je  $h^{-1}$  malo, to jest ako  $h$  ima veliko pojačanje tada će se pomoću regulatora na Sl.1.16 dobiti odgovarajuća aprkosimativna inverzija modela procesa bez potrebe da se inverzija od  $f$  realizuje eksplicitno.

Iako je regulator u arhitekturi na Sl. 1.16 realizovan kao sistem sa povratnom spregom, upravljanje se na OU primjenjuje u arhitekturi u otvorenoj sprezi. Ustvari, vidimo da je upravljanje  $u(t)$  nezavisno od toga šta se stvarno događa na izlazu OU. Ovo je ozbiljan nedostatak pošto se neće dobiti zadovoljavajuće rješenje osim ako su ispunjeni uslovi:

- model na kome je zasnovan regulator je vrlo tačna reprezentacija OU
- model i njegova inverzija su stabilni
- poremećaji i početni uslovi su zanemarljivi

Znači da trebamo tražiti drugo rješenje za problem koje će zadržati ključne osobine od ovoga, ali bez navedenih nedostataka. Ovo se može postići time što se povratna sprega postavlja da obuhvati sam OU, a ne njegov model kao na Sl. 1.16. Ako za momenat pretpostavimo da je model perfektan, tada dobijamo ekvivalentni blok dijagram kao na Sl. 1.17. Ova arhitektura, koja je izvedena polazeći od upravljanja u otvorenoj sprezi, je osnova za upravljanje u zatvorenoj povratnoj sprezi. Ključna stvar je u tome da izlaz regulatora ne zavisi od apriornih podataka o modelu procesa već o tome šta se stvarno događa na izlazu OU u svakom trenutku. Poželjno je za početak uočiti sljedeće sličnosti i razlike između arhitektura na Sl.1. 16 i Sl.1. 17:



*Slika 1.17.*

- Pod uslovom da je model OU tačan, i da su svi signali ograničeni, tada su obe arhitekture ekvivalentne u smislu relacije između  $r(t)$  i  $y(t)$ . Ključne razlike su posljedica poremećaja i različitih početnih uslova.

- U arhitekturi na Sl.1.16 u regulatoru je interno ugrađena povratna sprega, dok se u onoj na Sl.1.17 signal sa izlaza OU koristi za povratnu spregu. Dakle, u prvom slučaju sve se događa unutar regulatora, to jest unutar, naprimjer, računara pomoću koga je realizovan, dok se u drugom slučaju koristi signal sa izlaza procesa, to jest mjernog uređaja, da se odredi šta se stvarno događa na izlazu OU.

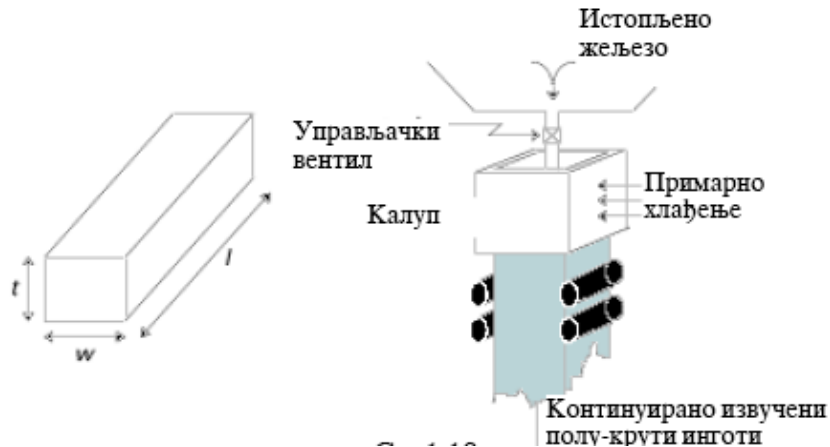
Glavne komponente koje se pojavljuju u sistemu u zatvorenoj sprezi (petlji) su prikazane na Sl. 1.18. Treba primjetiti da je struktura sistema funkcionalno ekvivalentna strukturi sa Sl.1.8, ali je mnogo bliža inžinjerskoj stvarnosti.



*Slika 1.18.*

Preliminarni zaključak iz prethodnog je da bi samo trebalo izabrati regulator unutar zatvorene sprege koji ima veliko pojačanje. Da bi se bolje sagledao problem izbora pojačanja potrebno je detaljnije analizirati rad nekog procesa. Navodimo primjer iz industrije čelika jer je

aproksimativni model objekta upravljanja jednostavno matematički opisati. Jedan od proizvoda industrije čelika su gredice koje se dobijaju u procesu kontinualnog izvlačenja. Glavne komponente takvog sistema, a koje su relevantne za dalju diskusiju su ilustrovane na Sl. 1.19



*Slika 1.19.*

Управљачки вентил регулише брзину протока жељеза у течном стању према калупу монтираном испод пећи. Калуп, чији је пресјек једнак попречном пресјеку извучених гредика, је отворен и са горње и са доње стране. Захваљујући интензивном хлађењу, жељезо у калупу се охлади до полуцврстог стања. У овом стању оно је довољно чврсто да се може континуално извлачити из калупа помоћу валјака. Извучене гредике се nadalje hlade i на крају сijekу на захтијеваној дужини.

Да би се боље сaгледало понашање система потребно је боље сaгледавaње рaдa процесa. Овај увид се добија математичким моделовањем процесa да се опише његово усталјено стање и динамичко понашање. Да би се добио такaв модел најприје се дефинишу релевантне промјенљиве процесa. У разматраном примјеру то су:

- $h^*$ : задати ниво жељеза у калупу
- $h(t)$ : стварни ниво жељеза у калупу
- $v(t)$ : позиција вентила
- $\sigma(t)$ : брзина извучења
- $q_{ul}(t)$ : улазни проток материје у калуп
- $q_{iz}(t)$ : излазни проток материје из калупа

На основу закона о одржању материје имaмо:

$$h(t) = A^{-1} \int_{-\infty}^t (q_{ul}(\tau) - q_{iz}(\tau)) d\tau$$

гдје је  $A$  попречни пресјек калупа. Далје ћемо такође претпоставити да су мјерења позиције  $v(t)$  и брзине извучења  $\sigma(t)$  тако калибрисана да вриједи

$$v(t) = q_{ul}(t)$$

$$\sigma(t) = q_{iz}(t)$$

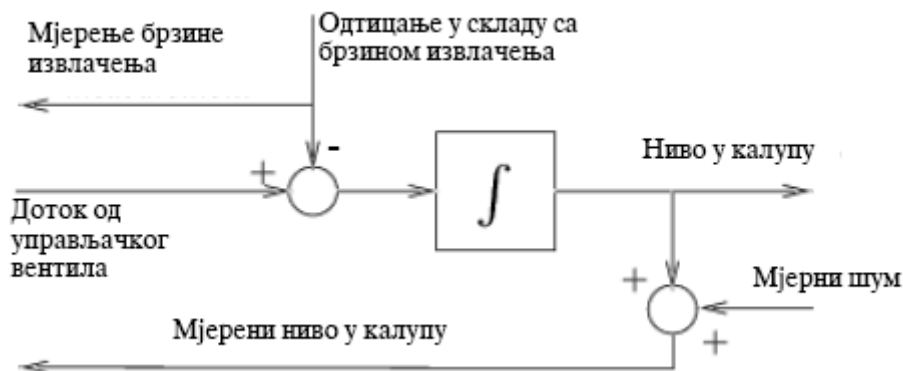
Dakle, uz jedinični presjek  $A=1$ , model procesa postaje

$$h(t) = \int_{-\infty}^t (v(\tau) - \sigma(\tau)) d\tau$$

Brzina izvlačenja se može mjeriti tačno, međutim to nije slučaj sa sensorima nivoa kod kojih mjerni signal sadrži visoko-frekventnu smetnju, koja se uzima u obzir preko

$$h_m(t) = h(t) + n(t)$$

gdje je  $h_m(t)$  mjerenje od  $h(t)$  sa aditivnom smetnjom  $n(t)$ . Blok dijagram procesa sa mjerenjem je prikazan na Sl.1.20. Ovo je vrlo jednostavan model koji obuhvata suštinu procesa.



Slika 1.20.

U kontekstu upravljanja nivoom željeza u kalupu, najjednostavniji regulator u zatvorenoj sprezi je pojačavač pojačanja  $K$ , koji pokreće ventil na takav način da mu je pozicija proporcionalna razlici (grešci) između zadatog i mjerenog nivoa

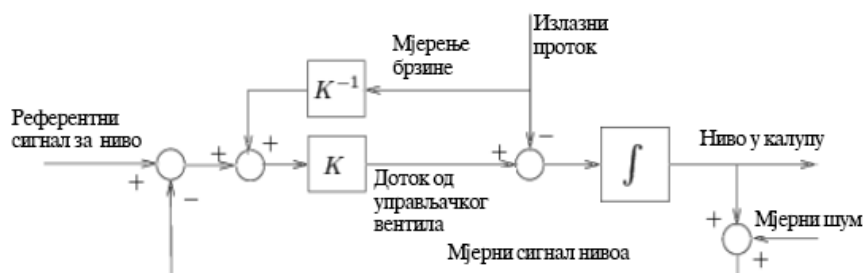
$$v(t) = K (h^* - h_m(t))$$

Potrebno je primijetiti da u ovom slučaju najprije treba da dođe do pojave greške da bi regulator reagovao. Mi takođe znamo da promjena u brzini izvlačenja zahtijeva da se promijeni radna tačka za ventil. Dakle dobićemo bolje upravljanje ukoliko se promjena u brzini unaprijed uzme kod postavljanja ventila u odgovarajuću poziciju. Ovo je komponenta upravljanja u otvorenoj sprezi. Konačno, regulator je dat sa

$$v(t) = K((h^* - h_m(t)) + \frac{1}{K} \sigma(t))$$

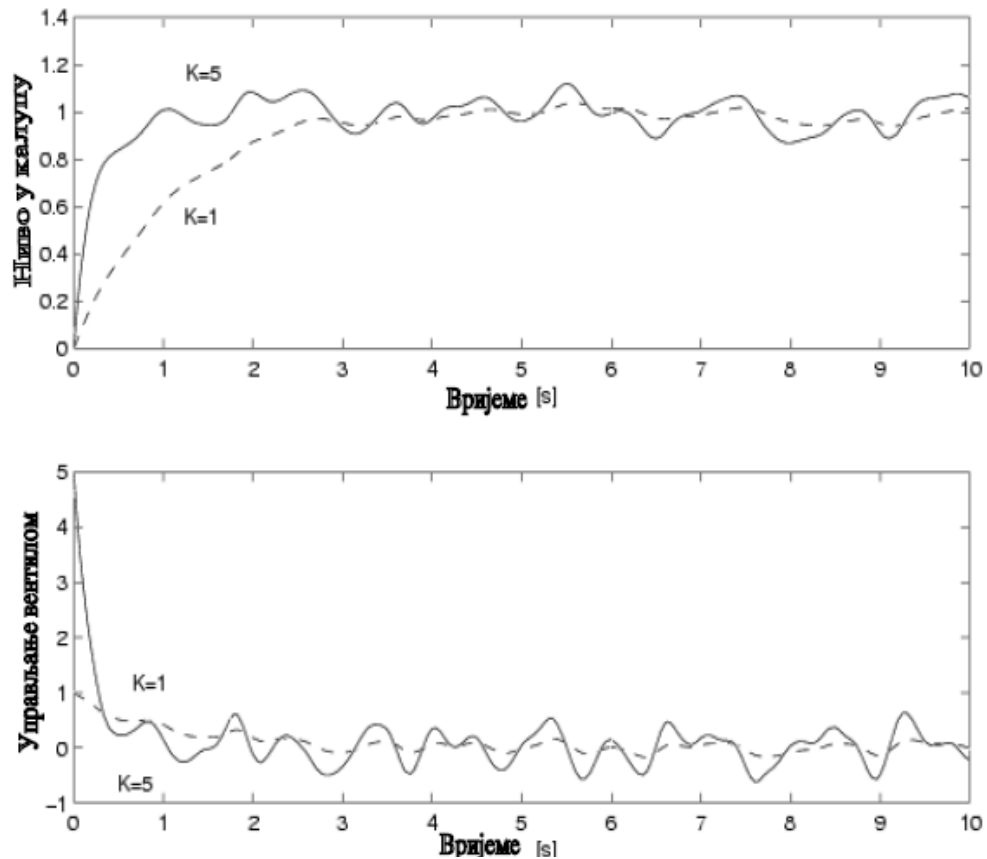
Dakle, ovaj regulator posjeduje (ima) i neku prediktivnu komponentu (drugi član) potrebnu da se kompenzuje promjena brzine izvlačenja, dok je prva komponenta namijenjena za kompenzaciju preostale greške u nivou.

Blok dijagram SU je prikazan na Sl.1.21.



Slika 1.21.

Vršeći simulacije sistema sa Sl. 1.21 za različite vrijednosti pojačanja  $K$  kao naprimjer, za  $K=1$  i  $K=5$  kao što je prikazano na Sl.1.22 pokazuje da se sa manjim pojačanjem dobija sporiji odziv. S druge strane, veće pojačanje regulatora  $K=5$  ima za rezultat brži odziv ali se povećava i efekat smetnji mjerenja ali i mnogo agresivnije pokretanje ventila. Dakle, zahtjevi u pogledu performanse su konfliktni. Bez sistematskog znanja teško je odgovoriti na pitanja: Koliko truda treba uložiti da se pronađe prava vrijednost za  $K$ ? Da li treba izabrati kompleksniji regulator? Da li treba pokušati da se pronađe tačniji model za sam proces?



*Slika 1.21.*

Razmatrani primjer je ilustrativan jer na očigledan način ukazuje na potrebu za kompromisom u izboru pojačanja, koji je nužan kod projektovanja svih sistema. Naprimjer, ako poremećaji na izlazu proizvedu nenultu grešku  $e(t)$  sistema u zatvorenoj sprezi tada će veliko pojačanje regulatora rezultovati u veliko upravljačko djelovanje  $u(t)$ , koje može biti izvan raspoloživog opsega i na taj način rješenje postaje neprihvatljivo. Drugi potencijalni problem sa velikim pojačanjem je nestabilnost, koja se karakteriše uspostavljanjem samooscilacija ili prekomjernim porastom pojedinih promjenljivih u sistemu. Iz ovoga vidimo da se moraju praviti kompromisi kod izbora pojačanja regulatora. S jedne strane, veliko pojačanje u zatvorenoj sprezi obezbjeđuje postizanje aproksimativne inverzije što je suština upravljanja. S druge strane, izbor pojačanja u praksi je dio kompleksne mreže kompromisa kod projektovanja. Razumijevanje i balansiranje kod ovih kompromisa je suština u projektovanju sistema AU.

### 1.5. Sažetak

Da bi se projektovao i implementirao sistem upravljanja potrebni su sljedeći osnovni elementi:

- Poznavanje željene vrijednosti: Neophodno je poznavati šta je potrebno upravljati, sa kojom tačnošću i u kom opsegu vrijednosti. Ovo mora biti izraženo u obliku specifikacije performansi. U fizičkim sistemima ova informacija mora biti konvertovana u pogodnu formu tako da se može dalje obrađivati u regulatoru (analogni ili digitalni signal).
- Poznavanje izlaza ili stvarne vrijednosti: Ova vrijednost mora biti mjerena senzorom u povratnoj vezi, i takođe mora biti u takvoj formi koju prihvata regulator. Dodatno, senzor mora imati potrebnu rezoluciju i dinamički odziv tako da izmjerena vrijednost ima tačnost zahtijevanu u specifikaciji performansi.
- Poznavanje upravljačkog uređaja: Regulator mora biti takav da prihvati mjerenja željene i stvarne vrijednosti i da generiše upravljački signal u odgovarajućem obliku za pokretanje izvršnog elementa (aktuatora). Regulatori mogu biti različite prirode, uključujući mehaničke poluge, pneumatske elemente, analogna ili digitalna električna kola ili mikrokontrolere.
- Poznavanje aktuatora (izvršnog elementa): Ovaj element pojačava upravljački signal i obezbeđuje da se sa potrebnom snagom djeluje na promjenu toka signala, energije ili materije u objekat upravljanja kako bi se postigla promjena izlaza objekta prema željenoj vrijednosti. U slučaju sistema za upravljanje temperaturom prostorije, aktuator je gasni elektro-ventil i gorionik, «djelovanje» predstavlja oslobođena toplota ( $W$ ). Za sistem autopilota broda aktuator je kormilo, «djelovanje» je zakretni moment ( $Nm$ ).
- Poznavanje objekta: Većina upravljačkih strategija zahtijeva neka znanja statičkih i dinamičkih karakteristika objekta. Ona se mogu dobiti na osnovu mjerenja ili na osnovu korištenja osnovnih fizikalnih i drugih zakona, ili kombinacijom oba ova postupka.

#### 1.5.1 Projektovanje sistema upravljanja

Sa svim navedenim znanjima i informacijama za projektanta sistema upravljanja ostaje samo da projektuje sistem. Prvi problem sa kojim se susreće je da znanja o sistemu nisu potpuno tačna i kompletna. Posebno, dinamičke karakteristike sistema mogu se mijenjati s vremenom (vremenski promjenljivi) tako da fiksna strategija upravljanja neće biti zadovoljavajuća. Naprimjer, zbog potrošnje goriva masa aviona nakon dugog leta može biti skoro polovina vrijednosti koju je imao u trenutku polijetanja.

Mjerenja upravljanih promjenljivik sadrže električne smetnje i efekte poremećaja. Neki senzori će dati tačne i pouzdane podatke, a drugi, zbog poteškoća u mjerenju izlazne veličine mogu dati više slučajnu i skoro neupotrebljivu informaciju.

Ipak, postoji standardna metodologija koja se može koristiti u projektovanju većine sistema upravljanja. Ovi standardni koraci su prikazani na Sl. 1.23.

Projektovanje sistema upravljanja je kombinacija tehnike i iskustva. Knjiga objašnjava neke pokušane i testirane tehnike i metode koje stoje na raspolaganju projektantu sistema upravljanja. Iskustvo, međutim, dolazi samo s vremenom.



Slika 1.22