

# 1. OPŠTA RAZMATRANJA

## 1.1 UVODNA RAZMATRANJA

Automatsko upravljanje igra sve veću ulogu u svim fazama modernog života. Počevši od kućnog bojlera, gdje se automatski termostatom reguliše temperatura vode, do sofisticiranih sistema automatskog upravljanja za proizvodnju energije i upravljanja svemirskim brodom, sistemi automatskog upravljanja (SAU) imaju velikog uticaja na svakodnevni život ljudi.

Pojava SAU naznačuje početak druge industrijske revolucije. Prva industrijska revolucija u toku devetnaestog vijeka značila je povećano učešće mehaničke snage u industrijskoj proizvodnji kao zamjena za snagu čovjeka i životinja.

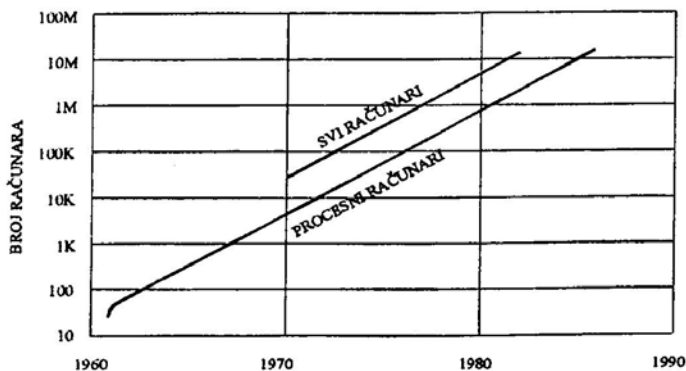
Efikasno korištenje snage predpostavlja mogućnost upravljanja i regulacije te snage. Raspolaganje snagom i mogućnošću njenog upravljanja, mnogi fizički i mentalni radovi mogu biti mehanizovani i izvršavani sa većim stepenom kvaliteta nego ranije.

SAU su fizički sistemi koji se dinamički ponašaju. Proučavanje teorije automatskog upravljanja obezbjeđuje osnovu za opšte razumjevanje dinamičkih sistema.

SAU se sastoji od elemenata i komponenti različitih tipova uključujući: mehaničke, električne, elektornske, hidraulične, pneumatske, itd. i njihove kombinacije. Oni koji rade u oblasti upavljanja moraju poznavati principe rada i karakteristike širokog skupa opreme. Drugim riječima, oblast automastkog upravljanja je interdisciplinarna budući da u sebe uključuje mnogo različitih naučnih disciplina i oblasti tehnike i tehnologije.

Filozofija automatskog upravljanja ima implikacije i na ekonomske, poslovne i društvene sisteme, mada u ovim oblastima još nema značajnih rezultata obzirom na prirodu ovih sistema.

Intenzivnom uvođenju SAU u razne primjene doprinio je i buran razvoj raznih tehnologija, a naročito tehnologije za proizvodnju mikroelektronskih poluprovodničkih komponenti. To je vodilo porastu primjena digitalnih sistema upravljanja u raznim obastima ljudske djelatnosti. Kao ilustracija tog trenda može poslužiti sl. 1.1, gdje se daje porast primjene procesnih računara u upravljanju raznih industrijskih procesa.



Sl. 1.1 Porast broja računara upotrebljenih za procesno upravljanje

Značajan doprinos razvoja SAU i njihovoj primjeni pored razvoja tehnologija, dao je i razvoj teorije automatskog upravljanja.

Vrlo važan događaj u kasnim pedesetim godinama bio je razvoj teorije upravljanja u prostoru stanja. Glavna inspiracija dolazi od matematičara i teorije običnih diferencijalnih jednačina. Glavni doprinos razvoju teorije upravljanja u prostoru stanja dao je Kalman, R.E. On je formulisao mnoge bazične koncepte i riješio mnoge važne probleme. Uveo je pojmove upravljivost i osmotrivost, rješavajući problem dostizanja stacionarnog stanja u konačnom vremenu. Bellman, R. (1957.) i Pontriagin, L.S. (1962.) pokazuju da mnogi problemi sinteze SAU mogu biti formulisani kao problemi optimizacije.

Početakom šezdesetih godina bio je formulisani stohastički varijacioni problem što je vodio razvoju stohastičke teorije upravljanja.

Fundamentalni problem teorije upravljanja linearnih sistema bili su ponovo razmatrani krajem šezdesetih i početkom sedamdesetih godina. Ustanovljene su teorije za rješavanje specifičnih problema upotrebom polinomskih metoda, Rosenbrock, H.H. (1970.), Wonham, W.M. (1974.) itd.

Potreba za efikasnim metodama simulacije javlja se kada inženjeri počinju da se susreću sa primjenom teorije za rješavanje praktičnih problema.

Ova potreba podstakla je mnoga istraživanja u oblasti raznih tehnika za dobivanje modela procesa direktno iz podataka o procesu (objektu). Ti naponi rezultirali su dobrim razumjevanjem problema identifikacije i velikim brojem algoritama identifikacije kao kod Astrom-a i Eykhoff (1971.).

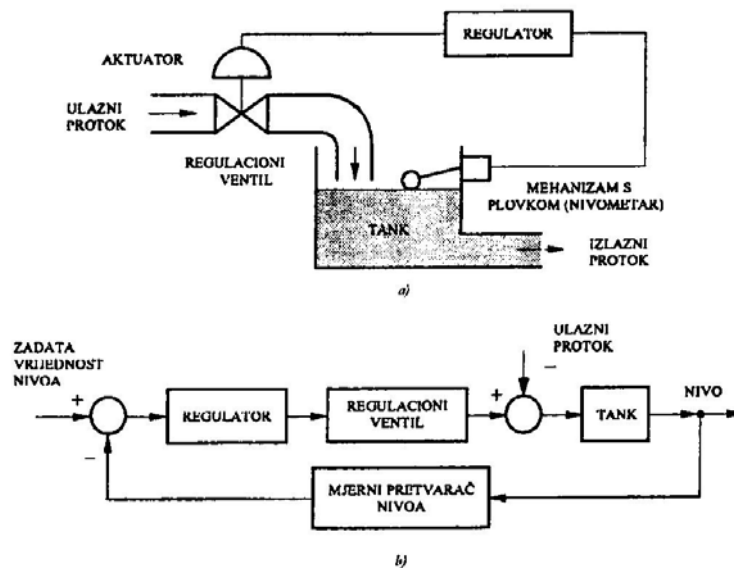
Napredak u razvoju računara i mikroelektronike (mikroprocesora) omogućio je primjenu mnogo komplikovanijih algoritama upravljanja. Ovim je značajno i naglo povećan interes za adaptivno upravljanje. Vidan progres u oblasti adaptivnih sistema upravljanja učinjen je u toku sedamdesetih godina istovremenim razvojem algoritama i teorije adaptivnih sistema upravljanja.

## **1.2 PRIMJERI SISTEMA AUTOMATSKOG UPRAVLJANJA**

U ovom dijelu daje se nekoliko tipičnih sistema upravljanja sa povratnom spregom u cilju regulacije.

### **1.2.1 Sistem za regulaciju nivoa**

Sistem za regulaciju nivoa dat je na slici 1.2. To je primjer SAU sa povratnom spregom korišćenjem analogne opreme (elemenata). Nivo u tanku će, nakon nekog vremena, biti konstantan ako je protok fluida koji ulazi u tank jednak protoku koji izlazi iz tanka. Ako postoji razlika između ova dva protoka, nivo će rasti ili opadati, što zavisi od toga koji je protok veći. Element povratne sprege je mehanizam s plovkom (davač nivoa) koji daje signal proporcionalan nivou. Ova vrijednost upoređuje se sa željenom ili zadatom vrijednošću na osnovu čega se generiše signal greške. Regulator, na osnovu greške koju obrađuje, podešava regulacioni ventil, mijenjajući ulazni protok s ciljem da uspostavi nivo tanka na zadatu vrijednost.



Sl. 1.2 Sistem za regulaciju nivoa; a) fizička predstava, b) strukturni blok dijagram

Mjerni pretvarač nivoa (mehanizam s plovkom), regulator i regulacioni ventil sa odgovarajućim pogonom (aktuator), nazivaju se elementima SAU, a sve skupa upravljački sistem.

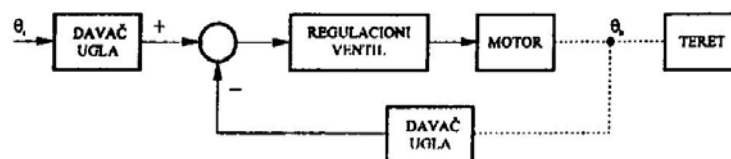
Upravljački sistem (regulacioni sistem) je skup elemenata kojima se ostvaruje upravljanje (regulacija) objekta (procesa).

Sistem na slici 1.2 pripada klasi procesnih sistema upravljanja obzirom da je nivo kao regulisana (upravljana) veličina – procesna veličina.

### 1.2.2 Servosistem (servomehanizam)

Servomehanizam ili servo je sistem upravljanja sa povratnom spregom kod kojeg je upravljana varijabla mehanička pozicija ili kretanje. Osnovna funkcija servomehanizma je da njegov izlaz brzo i precizno prati promjene ulaza. Nekada se naziva i prateći jer mu je samo ime izvedeno iz latinskih riječi *servus* (onaj koji služi ili prati) i *mehanism* (mehanizam).

Slika 1.3 prikazuje blok šemu tipičnog servomehanizma koji sadrži električni servomotor. Upravljana varijabla je mahanički ugao  $\theta_0$ , radi čega se ovaj servo naziva pozicioni. Ugao koji treba slijediti je  $\theta_i$ . Element u povratnoj sprezi (mjerni pretvarač ugla), obezbjeđuje mjerenje izlaznog ugla  $\theta_0$  u formi koja se može porediti sa ulaznom varijablom  $\theta_i$ . Signal koji je razlika između  $\theta_i$  i  $\theta_0$ , dovodi se u pojačavač koji pogoni motor s ciljem da se izlazna pozicija mijenja tako da se greška praćenja ulaznog ugla od strane izlaznog ugla svede na nulu.

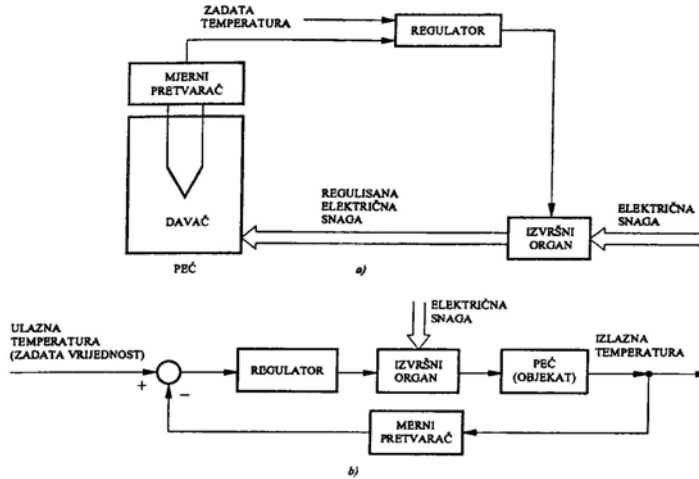


Sl. 1.3 Pozicioni servomehanizam

### 1.2.3 Sistem za regulaciju temperature

Na slici 1.4 dat je sistem za regulaciju temperature u peći sa koncentrisanim grijačem. Temperatura u peći mjeri se davačem na bazi termootpora koji na svom izlazu daje naponski signal reda  $mV$  koji se u mjernom pretvaraču pojačava, zatim vrši kompenzacija hladnog kraja i vodi u regulator gdje se dalje obrađuje.

Upravljački signal iz regulatora djelovanjem na izvršni organ mijenja protok energije kroz upravljani objekat (peć), čime se reguliše temperatura u peći na zadatu vrijednost.

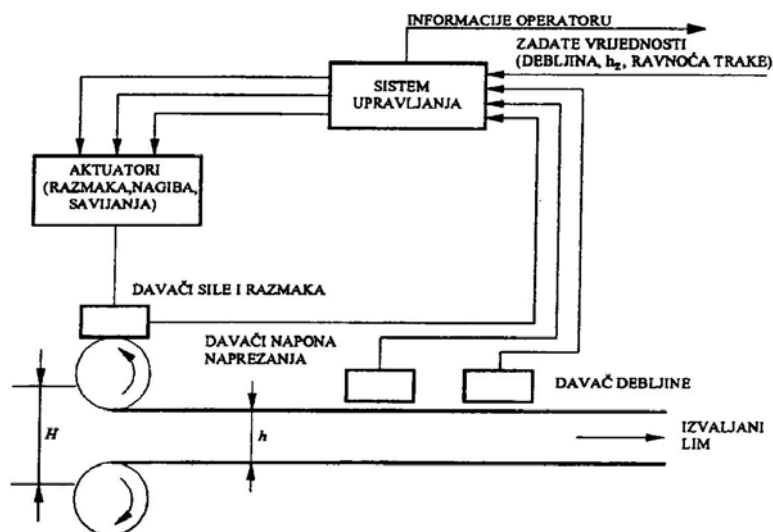


Sl. 1.4 Sistem regulacije temperature; a) fizikalna predstava, b) blok šema SAU

### 1.2.4 Sistem regulacije debljine valjanja lima

Kod proizvodnje se zahtjeva da čelične ili aluminijumske trake budu odgovarajuće debljine i glatkosti.

Materijal debljine  $H$  uvodi se između para valjaka koji su neopterećeni razmaknuti na odstojanju  $q$ . Debljina valjanog lima je  $h$ . za upravljanje debljine, odstojanje  $q$  i sila valjanja  $F$  mjere se odgovarajućim davačima. Aktuator za upravljanje debljine električni je motor koji pokreće gornji valjak vertikalno u cilju da modificira  $q$ , a odatle i debljinu lima  $h$ . funkcionalna šema sistema valjanja lima debljine  $h$  data je na slici 1.5, [2].



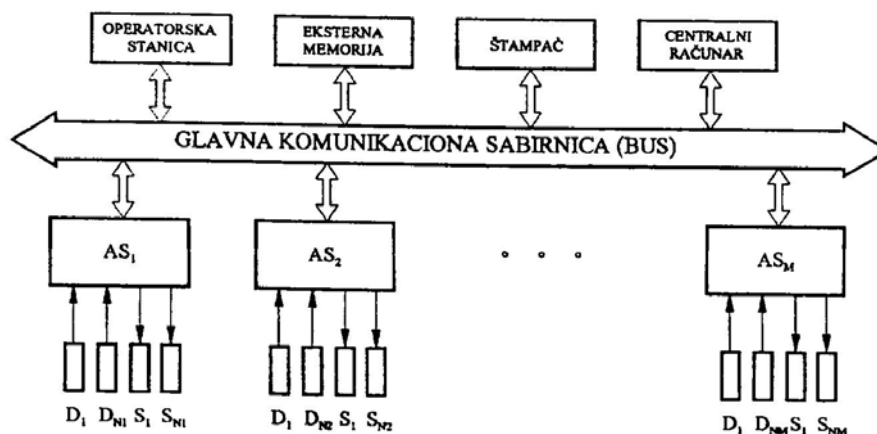
Sl. 1.5 Sistem regulacije debljine lima



## 1.2.5 Distribuirani sistem upravljanja tehnoloških procesa

Postojanje velikih i prostorno razuđenih tehnoloških i proizvodnih procesa dovelo je do pojave koncepta distribuiranog upravljanja, a razvoj mikro – elektronske tehnologije omogućio je realizaciju distribuiranih sistema upravljanja. Drugim riječima, procesi koji su prostorno razučeni, a sa aspekta nivoa upravljanja, zahtijevaju sve funkcije upravljanja: regulaciju, direktno upravljanje, nadgledanje, koordinaciju, optimizaciju, itd., ne mogu više biti upravljani na zadovoljavajući način korištenjem principa centralizovanog upravljanja, jer ono nije dovoljno fleksibilno i pouzdano rješenje.

Jedan uopšteni distribuirani sistem dat je na slici 1.6.



Sl. 1.6 Distribuirani sistem upravljanja

Na slici 1.6 automatska stanica  $AS_M$  sa pripadajućim davačima  $D_1, \dots, D_{NM}$  i pripadajućim izvršnim organima  $S_1, \dots, S_{NM}$  koristi se za automatsko upravljanje dijela procesa koji je zaokružena funkcionalno – tehnološka cjelina. Broj zaokruženih funkcionalno – tehnoloških cjelina je  $M$ , koje mogu biti međusobno i udaljene. Komuniciranje između automatskih stanica  $AS_I, I=1, 2, \dots, M$  vrši se preko komunikacione sabirnice. Unutar  $AS_I$  postoji interni bus koji omogućava razmjenu podataka unutar stanice. Ovaj paralelni bus dozvoljava prenos podataka velikom brzinom što je bitno za potrebe procesiranja (obrada prema raznim algoritmima).

Veza davača i izvršnih organa sa  $AS_I$  ostvaruje se pomoću elemenata procesnog interface-a koji vrši prilagođenja raznih signala iz davača i signala iz  $AS_I$  koji djeluju na izvršne organe. Nekada se ova veza ostvaruje preko procesnog (field) bus-a.

## 1.3 DEFINICIJE TERMINA U OBLASTI SAU

U ovom dijelu definiše se terminologija koja će biti korištena za opisivanje SAU.

### POSTROJENJE

Postrojenje je skup opreme ili mašina koje funkcionišući zajedno, obavljaju neku operaciju. Ovdje će fizički objekat koji treba da bude upravljan npr. termička peć, hemijski reaktor, avion, itd. biti nazivan objekat.

### PROCES

Proces je progresivna neprekidna operacija koja sadrži niz kontrolisanih djelovanja ili kretanja usmjerenih sistematski prema određenom rezultatu ili kraju. Svaka operacija koja treba da bude upravljana biće nazivana procesom. Primjeri za ovo su: hemijski, termički, biološki, tehnološki, itd. procesi. Proces je skup postupaka fizičkog ili hemijskog pretvaranja ili niza

takvih pretvaranja. Transport materijala ili energije, kao i prenos informacija mogu se razmatrati kao proces.

### *SISTEM*

Sistem se skup međusobno zavisnih elemenata obrazovan radi postizanja određenog cilja posredstvom izvršavanja određenih funkcija.

Smatra se da je sistem odvojen od okoline i ostalih spoljnih sistema zamišljenom zatvorenom površinom koja presjeca veze između njih i posmatranog sistema. Preko tih veza na sistem djeluju okolina i spoljni sistemi, ili on sam djeluje na okolinu i spoljne sisteme. Koncept sistema može biti primjenjen na apstraktne, dinamičke fenomene, takve kao što su oni u ekonomici. Riječ "sistem" mogla bi biti interpretirana i kao fizički, biološki, ekonomski, itd. sistem.

### *SMETNJA*

Smetnja je najčešće nepoželjna i nepredviđena promjena neke veličine koja utiče na izlaznu veličinu sistema. Ako je smetnja generisana unutar sistema onda se ona naziva interna smetnja, a ako potiče izvan sistema, onda je ona eksterna.

### *UPRAVLJANJE SA POVRATNOM SPREGOM (U ZATVORENOJ KONTURI)*

Upravljanje sa povratnom spregom je ono upravljanje koje, u prisustvu smetnji, teži da smanji razliku između izlaza sistema i zadatog ulaza (ili proizvoljno mijenjanog, željenog stanja). Pri tome, ovdje se radi samo o nepredvidivim smetnjama budući da je poznate smetnje uvijek moguće kompenzovati.

### *SISTEM UPRAVLJANJA SA POVRATNOM SPREGOM*

To je SAU koji teži da održava zahtjevani odnos između izlaza i zadatog ulaza međusobno ih upoređujući koristeći njihovu razliku za upravljanje. Ovi sistemi nisu ograničeni na inženjersko – tehničke discipline već se protežu i na takve sisteme kao što su ekonomski, biološki, itd. sistemi.

### *SERVOMEHANIZAM*

Servomehanizam je sistem upravljanja sa povratnom spregom čiji je izlaz neka mehanička koordinata kao što je pozicija, brzina, ili ubrzanje. Nekada se umjesto izraza servomehanizam upotrebljavao izraz – pozicioni, brzinski, sistem upravljanja. Danas se servomehanizmi upotrebljavaju u vazduhoplovstvu, mašinama alatljikama, robotici, itd.

### *AUTOMATSKI SISTEM REGULACIJE*

Automatski sistem regulacije je sistem upravljanja s povratnom spregom čiji je zadatak održavanje trenutne vrijednosti izlaza na željenoj vrijednosti ulaza u prisustvu smetnji. Kućni sistem grijanja gdje je termostat i senzor i regulator, primjer je automatskog sistema regulacije. Spoljašnja temperatura je smetnja u ovom sistemu.

### *INSTRUMENTI*

Instrumenti su oprema ili mašine za prikupljanje, procesiranje i upotrebu informacija. Izraz instrument principijelno se odnosi na instrumente za mjerenje.

### *UPRAVLJANJE*

To je dejstvo na sistem ili u sistemu usmjerno na postizanje određenog cilja.

### *RUČNO UPRAVLJANJE*

To je upravljanje koje zahtjeva direktno ili indirektno dejstvo čovjeka na izvršni uređaj.

### *AUTOMATSKO UPRAVLJANJE*

To je upravljanje koje ne zahtjeva direktno ili indirektno dejstvo čovjeka na izvršni uređaj.

### *UPRAVLJANJE BEZ POVRATNE SPREGE*

To je upravljanje koje ne koristi informacije (mjerjenja) o upravljanim veličinama.

### *PRATEĆE UPRAVLJANJE*

To je upravljanje sa povratnom spregom čiji je cilj mjerenje upravljane veličine tako da ona prati zadatu veličinu.

### *PROGRAMSKO UPRAVLJANJE*

To je upravljanje koje se izvršava prema programu koji propisuje dejstva na sistem samo kao funkciju vremena.

### *SEKVENCIJALNO UPRAVLJANJE*

To je upravljanje koje se izvršava prema redosljednom programu koji određuje dejstvo na sistemu po unaprijed određenom redosljedu; pri tome neka dejstva zavise od izvršavanja prethodnih dejstava ili od ispunjavanja određenih uslova.

### *NADZOR, KONTROLA*

To je nadgledanje sistema ili dijela sistema radi utvrđivanja ispravnog rada sistema uz otkrivanje neispravnog rada sistema. Ostvaruje se mjerenjem veličina stanja sistema i upoređivanjem izmjerenih vrijednosti sa posebno određenim vrijednostima tih veličina.

### *VOĐENJE*

Vođenje je skup postupaka upravljanja radom i nadzorom rada sistema uključujući postupke koji obezbjeđuju bezbjednost rada i zaštitu materijalnih dobara i ljudi.

### *PROCESNI SISTEM UPRAVLJANJA*

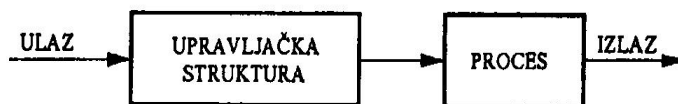
Automatski sistem regulacije čija je izlazna varijabla npr. temperatura, pritisak, protok, nivo tečnosti, *pH* vrijednost, itd., naziva se procesni sistem upravljanja (regulacije). Procesni sistem upravljanja se široko primjenjuje u industriji i upravljanju tehnoloških procesa. Programsko upravljanje često se koristi u ovim sistemima. Pri tome upravljanje može biti sa ili bez povratne sprege.

### *SISTEM UPRAVLJANJA BEZ POVRATNE SPREGE*

To je sistem upravljanja kod kojeg upravljačko dejstvo ne zavisi od izlazne varijable. Kod ovog sistema izlazna varijabla se ne mjeri i ne upoređuje sa ulaznom varijablom.

Praktičan primjer sistema bez povratne sprege je veš – mašina. Natapanje, pranje i cijedenje u veš – mašini vrše se na vremenskoj osnovi. Mašina ne mjeri izlazni signal – čistoću u rublju koje pere.

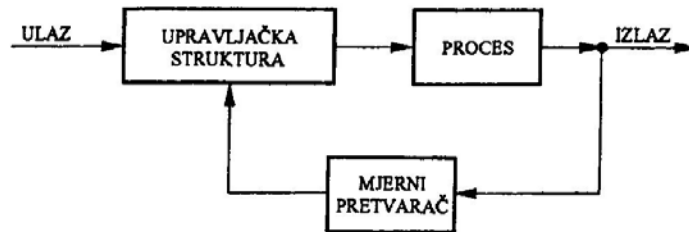
U bilo kom sistemu upravljanja bez povratne sprege, izlazna varijabla ne upoređuje se sa referentnim ulazom, slika 1.7.



*Sl. 1.7 Sistem upravljanja bez povratne sprege*

Svakom referentnom ulazu odgovaraju fiksni radni uslovi. Radi toga, tačnost sistema zavisi od kalibracije. U prisustvu smetnje, ovaj sistem neće izvršiti postavljeni zadatak.

Principijelna šema SAU sa povratnom spregom data je na slici 1.8.



Sl. 1.8 Sistem upravljanja s povratnom spregom

Prednost sistema s povratnom spregom je što ovi sistemi upravljanja koriste povratnu spregu koja omogućava da odziv sistema bude relativno neosjetljiv na eksterne smetnje i u izvjesnoj mjeri, na varijacije parametara sistema. Zbog toga, osim mjernog pretvarača, koji mora biti visoke tačnosti, ostali elementi sistema upravljanja mogu biti relativno manje tačnosti i jeftiniji, da se dobije dovoljno tačan izlaz. Ovo je nemoguće ostvariti korišćenjem sistema upravljanja bez povratne sprege.

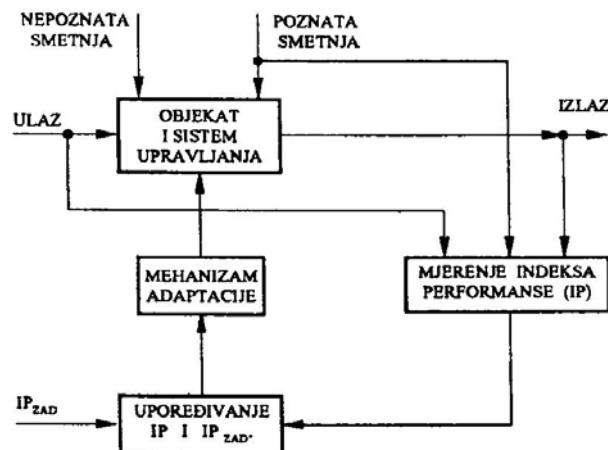
Sa gledišta stabilnosti, sisteme upravljanja bez povratne sprege lakše je sintetizovati jer je kod njih problem stabilnosti manje izražen.

Problem stabilnosti sistema upravljanja sa povratnom spregom mnogo je više izražen; težeći da se smanji greška, može doći do pojave oscilacija konstantne ili promjenljive amplitude.

### ADAPTIVNI SISTEMI UPRAVLJANJA

U literaturi [3], [4], date su mnoge definicije adaptivnih sistema upravljanja. Jedna od najčešće korištenih definicija glasi:

Adaptivni sistem upravljanja određuje (mjeri) indeks performanse, korištenjem ulaza, izlaza i stanja upravljanog sistema i na bazi upoređivanja vrijednosti indeksa performanse sa njegovom zadatom vrijednošću, mijenja parametre podesivog sistema ili generiše na ulazu upravljačke signale s ciljem da indeks performanse održi na zadatoj vrijednosti ili u njenoj okolini.



Sl. 1.9 Adaptivni sistem upravljanja

Dinamičke karakteristike većine sistema upravljanja nisu postojane iz više razloga, kao što je kvar komponenti sistema ili izmjena parametara i ambijentalnih uslova (npr. promjene u masi i atmosferskim uslovima u slučaju vasijske letjelice). Mada su efekti određenih promjena na dinamičke karakteristike sistema upravljanja prigušeni uvođenjem povratne sprege, u slučaju značajnih promjena parametara sistema, da bi sistem zadovoljavao funkcionalno, on mora imati mogućnost adaptacije. Adaptacija sistema upravljanja podrazumjeva mogućnost samopodešavanja i modifikacije u skladu sa nepredvidivim promjenama parametara objekta upravljanja, ambijentalnih uslova ili strukture objekta. Dakle, sistemi upravljanja koji imaju takvu mogućnost adaptacije nazivaju se adaptivni sistemi upravljanja.

U adaptivnom sistemu upravljanja, dinamičke karakteristike upravljanog objekta moraju biti identifikovane u svakom trenutku vremena tako da je moguće podešavanje parametara upravljačke strukture (regulatora) s ciljem održavanja željene performanse. Adaptivni sistem upravljanja, saglasno prethodnoj definiciji, dat je na slici 1.9.

#### *OPTIMALNI SISTEM UPRAVLJANJA*

Optimalni sistem upravljanja je sistem s povratnom spregom koji obezbjeđuje optimizaciju indeksa performanse unutar granica fizičkih ograničenja. Indeks performanse ili kriterij optimalnosti obično je mjera odstupanja od idealnog ponašanja sistema.

Izbor indeksa performanse za dati sistem upravljanja tj. dati problem, veoma je težak zadatak, naročito u složenim sistemima. Kod svemirskog broda indeks performanse može biti minimalna potrošnja goriva, minimalno vrijeme za stizanje do cilja, najkraći put do cilja, itd.

Pored pomenutih sistema upravljanja, postoje još mnogi sistemi upravljanja, kao što su samoobučavajući sistemi, samoorganizujući, itd.

### **1.4 MATEMATIČKI MODEL ELEMENATA I SAU**

Klasične metode formalnog opisa linearnih sistema koje se najčešće koriste su metod funkcije prenosa, metod impulsnog odziva, blok dijagrami, metod teorije grafova, i mnoge druge. Opisivanje ovih sistema vrši se ulazno – izlaznim relacijama. Opisivanjem funkcijama prenosa, zanemaruje se postojanje početnih uslova. No i pored toga funkcije prenosa pogodne su za analizu u frekventnom domenu i za analizu stabilnosti sistema.

Alternativni metod opisivanja linearnih, nelinearnih i nestacionarnih sistema je metod prostora stanja.

#### **1.4.1 Dinamičke i statičke jednačine**

*Definicija 1.*

Varijable stanja sistema definisane su kao skup varijabli  $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$  takav koji sadrži informacije o svakoj varijabli u trenutku  $t_0$ , te informacije o pobudama na ulazu sistema koje su dovoljne da se odredi stanje sistema u bilo kom trenutku  $\forall t > t_0$ .

Varijable stanja moraju zadovoljiti sledeće uslove:

*Uslov 1*

U bilo kom vremenu  $t = t_0$ , varijable stanja  $x_1(t_0), x_2(t_0), \dots, x_n(t_0)$  definišu početno stanje sistema.

*Uslov 2*

Jedanput kada je definisan ulaz u sistem  $\forall t \geq t_0$  i dati početni uslovi iz *Uslova 1.*, stanje sistema se može odrediti u budućnosti  $\forall t \geq t_0$ .

Za sistem koji ima  $m$  ulaza i  $q$  izlaza, i može biti linearan, nelinearan, vremenski promjenljiv ili invarijantan, jednačine stanja mogu se napisati u vidu

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = f_i[x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), r_1(t), r_2(t), \dots, r_m(t)]$$

$$i = 1, 2, \dots, n \quad (1.1)$$

gdje je:  $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$  - varijable stanja,

$r_1(t), r_2(t), \dots, r_m(t)$  - ulazne varijable,

$f_i(\cdot)$  - označava  $i$ -tu funkcionalnu vezu.

Izlazi sistema  $c_k(t)$ ,  $k=1, 2, \dots, q$  su kombinacija ulaza i izlaza i opisani su relacijom

$$c_k(t) = g_k[x_1(t), \dots, x_n(t), r_1(t), \dots, r_m(t)]$$

$$k = 1, 2, \dots, q \quad (1.2)$$

gdje je:  $g_k(\cdot)$  -  $k$  - ta funkcionalna veza.

Jednačine stanja i izlazne jednačine (1.1) i (1.2) zovu se dinamičke jednačine sistema.

Matrična predstava jednačina (1.1) i (1.2) za linearni sistem je

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + Br(t) \text{ - jednačina stanja,} \quad (1.3)$$

$$c(t) = Dx(t) + Er(t) \text{ - jednačina izlaza} \quad (1.4)$$

gdje je:  $A$  - matrica sistema,  $n \times n$ ,

$B$  - upravljačka matrica,  $m \times n$ ,

$D$  - matrica izlaza,  $q \times n$ ,

$E$  - matrica izlaza,  $q \times m$ .

Matrica prenosa je

$$G(s) = D(sI - A)^{-1} B + E, \quad (1.5)$$

Dimenzija  $q \times m$ .

Matrica  $(sI - A)$  je nesingularna, tj.  $\det(sI - A) \neq 0$ .

Jednačina (1.5) može se napisati u obliku

$$G(s) = D \frac{\text{adj}(sI - A)}{\det(sI - A)} B + E \quad (1.6)$$

pri čemu je karakteristična jednačina definisana relacijom

$$\det(sI - A) = 0 \quad (1.7)$$

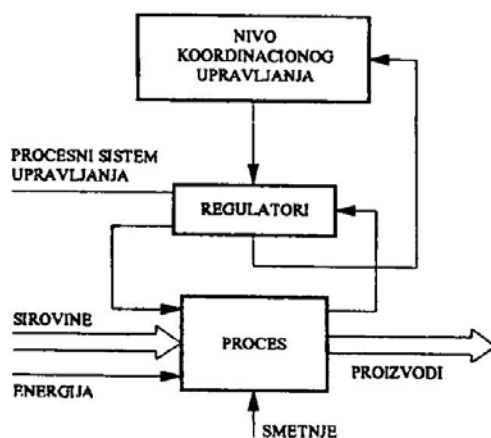
Jednačinama (1.1) – (1.7) moguće je opisati sistem upravljanja ili neki njegov dio bilo da se radi o mjernom pretvaraču, izvršnom organu ili upravljačkoj strukturi.

## 2. KLASIFIKACIJA UREĐAJA I SISTEMA AUTOMATSKOG UPRAVLJANJA

U prethodnom poglavlju uvedene su osnovne definicije termina iz oblasti sistema automatskog upravljanja. Pored ostalog uvedene su definicije osnovnih tipova SAU, a neki od tih sistema predstavljeni su strukturnom šemom. Pri tome, zbog njihove jednostavnosti, blok dijagrami se često upotrebljavaju za predstavljanje svih tipova SAU.

Za klasifikaciju uređaja i sistema automatskog upravljanja koriste se razni kriterijumi. Jedan od najčešće korišćenih kriterijuma je onaj koji kao osnovni za klasifikaciju SAU koristi tip sistema npr. linearni, nelinearni, relejni, itd.; prirodu signala koji se koristi u sistemu kao što je analogni, digitalni, binarni, itd.; prirodu upravljanog objekta (proces) kao što je procesni sistem upravljanja (SAU tehnoloških procesa), sistem upravljanja proizvodnih linija, itd.

### 2.1 PROCESNI SISTEMI UPRAVLJANJA



Sl. 2.1 Sistem upravljanja tehnološkog procesa

Primjer jednog SAU tehnološkog procesa dat je na slici 2.1. prema definiciji datoj u [5] tehnološki proces označava transformaciju sirovina u finalni proizvod koja se odvija u nizu procesnih posuda uz učešće energije i materijala saglasno datim receptima. Pri tome, svaki tehnološki proces sadrži tri etape: priprema sirovina (ulazni materijali), reakcija, i izdvajanje produkata reakcije.

Odvijanje procesa vrši se u različitim procesnim posudama (reaktori, destilacione kolone, izmjenjivači toplote i td.) koje konstituišu sekvencijalne, paralelne ili reciklične strukture.

Sljedeće osobine su karakteristika tehnoloških procesa:

- znatna upotreba sirovina i materijala, i odatle, visok značaj heterogenih reakcija,
- visoka produkcija i kapacitet postrojenja,
- velika potrošnja energije zbog rada na visokim temperaturama i pritiscima,
- visoka korozivnost procesiranih supstanci.

Tehnološki procesi mogu biti kontinualni ili šaržni. Regularno odvijanje kontinualnog tehnološkog procesa može biti podijeljeno u četiri etape:

- startovanje:
  - prelaz iz stanja stajanja u normalno stanje rada,
- normalan rad:

- stacionarno odvijanje procesa pod određenim uslovima,
- zaustavljanje:
  - prelaz iz operativnog stanja rada procesa u stanje stajanja procesa, tj. nefunkcionisanja.

U šaržnim procesima, transformacija energije i materijala odvija se u šaržama povremeno. Svaka šarža sirovina prolazi kroz niz procesnih posuda stupajući u reakcije prema unaprijed datim receptima.

Povezivanje informacija o izlaznim varijablama stanja procesa sa manipulacionim veličinama (ulazima procesa), ostvaruje se pomoću uređaja i sistema automatskog upravljanja čineći zatvoreni sistem upravljanja, koji se u ovom slučaju naziva procesni sistem upravljanja (PSU).

Glavne komponente PSU su:

- tehnološka oprema sa senzorima i aktuatorima,
- lokalni kontroleri (regulatori),
- procesni interface,
- upravljačka struktura (upravljački računar).

Software upravljačkog računara podijeljen je u:

- sistemski software, uključujući operativni sistem u realnom vremenu,
- aplikacioni software za ostvarivanje funkcija PSU.

Baza podataka PSU sadrži:

- dijagrame toka odvijanja procesa (tehnološke šeme),
- stanja procesa i stanja PSU,
- podatke o hardware-u PSU i elementima operatorskog interface-a.

Osnovni elementi hardware-a su: procesna oprema, pumpe, senzori, ventili, analogno-digitalni konvertori, displej itd. Elementi software-a su zadaci i programski moduli, baze podataka, zapisi, fajlovi itd. Podjela na ove elemente nije jedinstvena i ne zavisi od nivoa potrebnih detalja.

PSU ima dvije vrste fizičkih izlaza: materijalni produkt u formi npr. hemikalija, tehnološke pare, itd. i informacioni produkt u formi izvještaja ili poruka o procesu i PSU.

Pri tome izlazi iz PSU moraju da:

- daju količinu proizvoda prethodno definisanog kvaliteta,
- obezbijede više nivoa upravljanja i rukovanja pouzdanim informacijama o stanju procesa i stanju PSU.

Pri tome, prvi cilj može biti proširen zahtjevom da se minimiziraju troškovi ili maksimizira profit, tj. da se optimizira proces u kategoriji ekonomskih ili tehnoloških kriterijuma, obezbjeđujući sigurnost i komfor radnom osoblju, uz striktno data ograničenja na zagađivanje životne sredine.

PSU ima dvije glavne vanjske funkcije:

- nadgledanje i upravljanje procesa upravljanja,
- izvještavanje i vođenje protokola (arhiviranje).

Realizacija ovih vanjskih funkcija PSU bazira na tri tzv. unutarnja zadatka PSU:



- ocjena stanja procesa,
- identifikacija stanja PSU,
- modeliranje procesa za optimizaciju i predviđanje njegovog ponašanja.

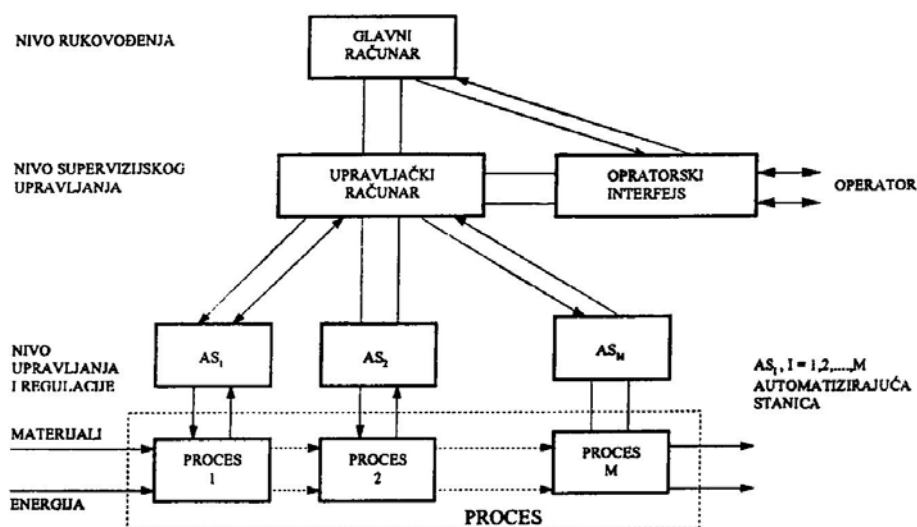
Ovo je posljedica primjene koncepta prostora stanja u saglasnosti s kojim bilo koji upravljački problem uključuje u sebe dva komplementarna podproblema i to:

- ocjena stanja upravljanog procesa, i
- određivanje upravljačkih dejstava kao funkcije stanja procesa, [8].

Na slici 2.2 data je hijerarhijska struktura PSU. Procesno hijerarhijsko upravljanje sadrži:

- koordinaciju podprocesa ili procesne opreme (aparata),
- otkrivanje i zaštitu od havarijskih situacija,
- startovanje i zaustavljanje procesa.

Formalno, problem koordinacije redukovan je na nalaženje skupa željenih stanja procesa  $\Omega_{xd}(z, w) \in \Omega_{xf}$  i skupa izlaza procesa  $\Omega_{yd}(z, w) \in \Omega_{yf}$ , koji odgovaraju tekućem stanju PSU  $z$  i smetnje  $\omega$ , održavajući tekuće stanje procesa  $x(t)$  unutar skupa  $x(t) \in \Omega_{xd}(z, w)$  izmjenom zadatih vrijednosti regulatora. Skupovi  $\Omega_{xf}, \Omega_{yf}$  dopušteni su skupovi stanja procesa  $x(t)$  i izlaza  $y(t)$ .



Sl. 2.2 Hijerarhijski PSU

Koncept sigurnih stanja procesa bazira se na logičkoj relaciji  $x(t) \notin \Omega_{xf}$ . Ovo može biti formulisano kao uslov za nastanak opasnosti u stohastičkom smislu kao  $P\{x(t) \in \Omega_{xf}\} > \varepsilon$ , gdje je  $0 < \varepsilon < 1$ .  $P\{\cdot\}$  znači vjerovatnoću da  $x(t)$  pripada skupu fizičkih stanja procesa.

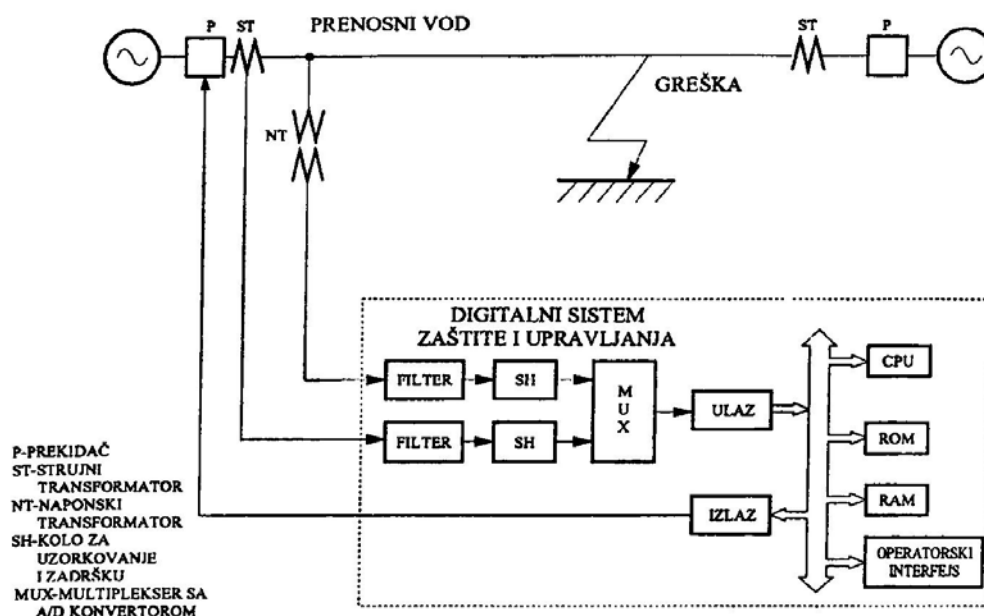
U slučaju upuštanja i zaustavljanja procesa, odvijanje procesa je nestacionarno i sastavljeno je, uslovno od niza šaržnih procesa, koji imaju svoj početak i kraj. U tom slučaju neophodno je držati procesnu varijablu stanja  $x(t) \in \Omega_{xf}^i$ , gdje je  $\Omega_{xf}^i$  skup stanja u kojima je dopušteno da se nađe sistem u procesu upuštanja i zaustavljanja.

## 2.2 SISTEM UPRAVLJANJA I ZAŠTITE ELEKTROENERGETSKOG SISTEMA

Na slici 2.3 data je funkcionalno-blokovska šema relejnog sistema zaštite elektroenergetskog sistema tj. prenosnog voda.

Ulazni davači, strujni transformator-ST, naponski transformator-NT, transformišu ulazni napon i struju na odgovarajuće vrijednosti za elektronske ulazne elemente. Pri tome se mora izvršiti odgovarajuća zaštita od šuma i prenapona.

Signali o naponu i struji u trenutku kvara sadrže harmonijske komponente frekvencija većih od osnovne što često uzrokuje pogrešan rad sistema zaštite. Ako je  $f_1$  frekvencija osnovnog harmonika, a frekvencija odabiranja  $f_s = n f_1$ , komponente signala sa frekvencijama  $(n \pm 1) f_1$  u ulaznim naponima i strujama ne mogu biti razlikovane od komponenti sa frekvencijom  $f_1$  poslije odabiranja. Ovaj proces je poznat kao transpozicija frekvencije. Da se eliminiše ovaj šum i drugi viši harmonici koriste se analogni filtri.



Sl. 2.3 Digitalni sistem zaštite EES

Odabiranje ulaznih signala obavlja se zahtjevanom brzinom što zavisi od konkretne primjene tj. algoritma koji se koristi. Izbor perioda odabiranja jedan je od najvažnijih aspekata digitalnih sistema zaštite i upravljanja EES, jer to ima uticaja kako na performanse tako i na cijenu. Obično se period odabiranja uzima 6 do 12 puta manji od perioda prvog harmonika.

Rezolucija A/D konvertora bira se obično nakon detaljne analize prirode grešaka, ali obično je dovoljna dužina digitalne riječi od 12 bita. U procesirajućem dijelu sistema, na bazi napona i struja, kao i stanja signala iz ostalih eksternih aparata, računa se relejna karakteristika tj. dejstvo na odgovarajući element u sistemu.

Za povezivanje sistema zaštite i upravljanja sa ostalom opremom kao što su prekidači, pomoćni releji, impulzni transformatori, optoizolatori, itd. koristi se odgovarajući interface.

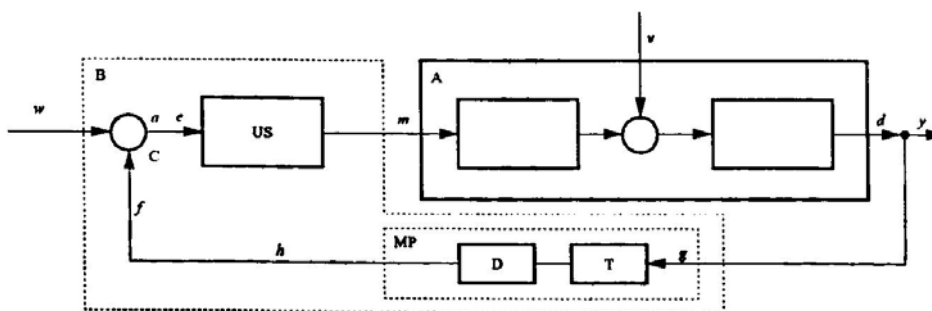
Aplikacioni algoritmi zahtijevaju brzo i tačno procesiranje. Postoje različiti algoritmi za zaštitu prenosnih vodova, transformatora, sabirnica, itd. Tipični primjeri su: algoritam za dobivanje veličina proporcionalnih veličina napona i struje; algoritmi za dobivanje veličina proporcionalnih aktivnoj i reaktivnoj snazi; algoritmi koji koriste putujuće talase; algoritmi za računanje distance i impedanse do mjesta kvara, itd.

Razvoj mikroprocesora imao je značajnog udjela i na razvoj tzv. SCADA sistema (Supervisor Control and Data Acquisition System) za razne primjene.

Jedan od najčešćih kriterijuma za klasifikaciju uređaja i sistema upravljanja je zasnovan na strukturnim dijagramima SAU. Pri tome, strukturna blok šema može biti upotrijebljena da prikaže kompoziciju i međuspojeve u sistemu, ili da zajedno, s prenosnim funkcijama predstavi posljedično-uzročne veze unutar sistema. Ako su poznate matematičke i funkcionalne relacije koje opisuju sve elemente u sistemu, strukturni blok dijagram može biti korišten kao osnova za analitičko ili računarsko razmatranje sistema.

## 2.3 STRUKTURNI BLOK DIJAGRAM UPROŠTENOG SAU

Na slici 2.4 data je strukturna šema uproštenog SAU s povratnom spregom.



Sl. 2.4 Blok šema SAU s povratnom spregom:

*ad - direktna grana, dghb - povratna grana,*

*A - objekat upravljanja,*

*B - upravljački (regulacijski) sistem,*

*C - element za upoređivanje,*

*T - mjerni davač, senzor, transducer,*

*D - adapter mjernog pretvarača, MP - mjerni pretvarač*

*Napomena:* Slovim a, b, d, q, h označeni su krajevi funkcionalnih lanaca.

Nazivi signala:

w - zadata veličina,

y - upravljana (regulisana) veličina,

m - izvršna (upravljačka) veličina, upravljanje,

f - signal povratne sprege,

e - signal odstupanja, greška,

v - smetnja.

### DEFINICIJE

Strukturni blok dijagram na slici 2.4 čine:

1. Funkcionalni blok – to je povezani niz elemenata koji čine funkcionalno samostalni dio sistema upravljanja (regulacije) i koji izvršava određenu funkciju.

Predstavlja se grafičkim simbolom sa odgovarajućim relacijama između ulaznih i izlaznih signala.

2. Funkcionalni lanac (niz) – to je skup funkcionalnih blokova izdvojen iz blok dijagrama presjecanjem samo dvije veze.
  3. Element za upoređivanje – to je funkcionalni blok sa dva ulaza i jednim izlazom kod koga je izlazni signal razlika ulaznih signala.
  4. Direktna grana – to je funkcionalni lanac koji se proteže od izlaza objekta do jednog ulaza odgovarajućeg elementa za upoređivanje.
  5. Grana povratne sprege, povratna sprega – to je funkcionalni lanac koji se proteže od izlaza objekta do jednog ulaza odgovarajućeg elementa za upoređivanje.
- Vrlo često se strukturni blok dijagram sa slike 2.4 naziva i kontura upravljanja, kontura regulacije.
6. Kontura upravljanja – to je skup elemenata koji obuhvata element za upoređivanje, odgovarajuću direktnu granu, i odgovarajuću granu povratne sprege.

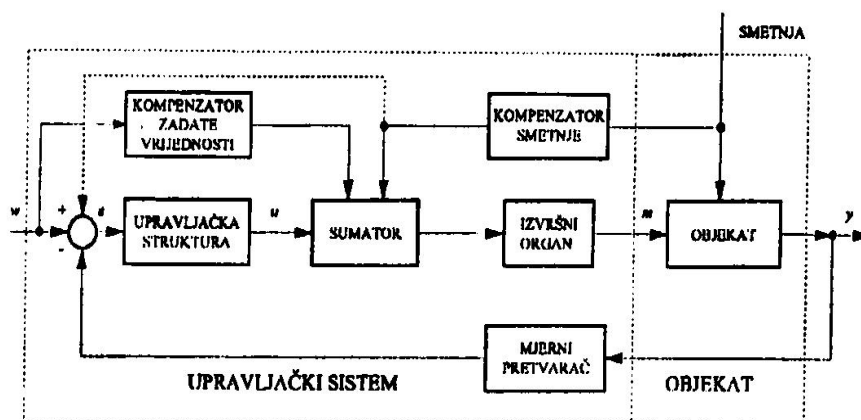
*Napomena:*

*Kontura upravljanja može da obuhvata i druge konture upravljanja i onda se ona naziva glavnom konturom upravljanja; obuhvaćene konture nazivaju se podređene, sporedne, sekundarne, pomoćne, unutrašnje ili lokalne.*

7. Zadana veličina – to je konstantna ili vremenski promjenljiva ulazna veličina sistema upravljanja koju je poželjno da slijedi upravljana (regulisana) veličina. Zadana vrijednost – to je signal koji predstavlja zadatu veličinu.
8. Upravljana (regulisana) veličina – to je izlazna veličina objekta upravljanja (regulisanja) čija se konstantnost ili promjena podržava sistemom upravljanja (regulacije).
9. upravljačka veličina, izvršna veličina – to je izlazna veličina upravljačkog (regulacijskog) sistema koja je takođe upravljačka veličina objekta.

Na slici 2.5 dat je sistem s povratnom spregom i kompenzacijom smetnje i zadate vrijednosti. Upravljanje po smetnji je upravljanje koje koristi informacije koje se odnose na jednu ili više smetnji koje mogu poremetiti upravljane varijablu, a osnovni mu je cilj da uticaje tih smetnji svede na minimum. Obično se upravljanje po smetnji kombinuje sa upravljanjem sa povratnom spregom.

Nekada se zadana veličina formira kao funkcija više veličina pa se ima da je  $w = w(w_1, w_2, \dots, w_n)$ , a izlazna veličina nije direktno dostupna već je npr. u vidu  $z = z(y)$  gdje je  $z$  – izlaz sistema koji se reguliše. Posredna promjenljiva  $z$  susreće se u SAU kada se ona formira kao neka funkcionalna zavisnost od drugih koordinata stanja.



Sl. 2.5 SAU sa povratnom spregom i sa kompenzacijom po zadanoj vrijednosti i smetnji

Na osnovi strukturnih blok šema SAU datih na slici 2.4 i 2.5 daje se sljedeća klasifikacija funkcionalnih elemenata u sistemima upravljanja:

- mjerni pretvarači (uređaji za dobivanje, mjerenje informacija, o upravljanom objektu),
- upravljački uređaji i sistemi (uređaji i sistemi za obradu informacija),
- izvršni uređaji (organi),
- pomoćni uređaji i sistemi..

### 2.3.1 Mjerni pretvarači

*MJERNI PRETVARAČ* ili *TRANSMITER* je davač (transducer) koji daje odziv na mjerenu varijablu pomoću senzora i konvertuje tu varijablu u standardizovani signal pogodan za prenos. Pri tome, taj signal funkcija je samo mjerene varijable.

*TRANSDUCER* je element ili oprema koja prima informaciju u formi jedne fizičke veličine i konvertuje tu informaciju u istu ili neku drugu fizičku veličinu.

*SENZOR (DAVAČ)* je element koji kvantitativno konvertuje energiju mjerene varijable u formu podesnu za mjerenje.

*MJERENA VARIJABLA* je fizička veličina, osobina ili uslov koji treba mjeriti.

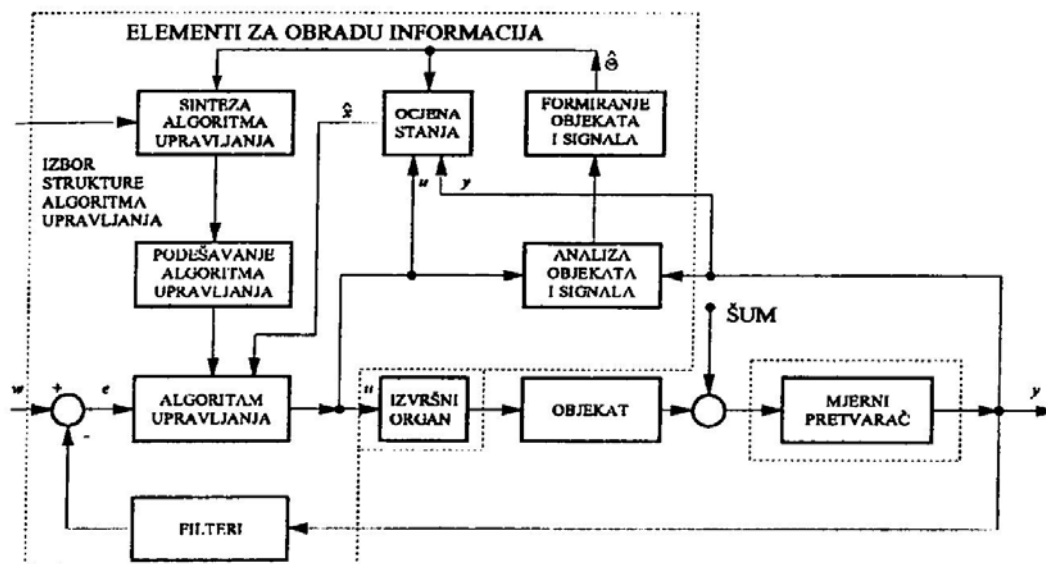
Relacija između ulazne i izlazne varijable senzora je fundamentalna relacija i bazira na zakonu o održavanju energije i ne može biti promijenjena eksterno bez fizičke ili funkcionalne modifikacije opreme.

U kategoriji elemenata i uređaja za dobijanje (mjerenje) informacija o upravljanom procesu, ulaze razni tipovi mjernih pretvarača (transmitera), davača i primarnih elemenata, koji kada je potrebno, sadrže i neophodne izvore napajanja energijom za njihov rad. Ti uređaji obavljaju operaciju pretvaranja i izmjene neke varijable o stanju objekta u standardni signal podesan za prenos i prijem od strane drugih elemenata SAU ili, direktno, za pogon izvršnih organa. Ovi elementi obično se montiraju na objekat upravljanja i u neposrednom su kontaktu sa mjenom varijablom.

### 2.3.2 Uređaji i sistemi za obradu signala

Skup uređaja ili sistem koji vrši razne dinamičke i statičke obrade ulaznih signala izvedenih iz jednog ili više procesnih signala u cilju dobivanja odgovarajućeg djelovanja na upravljani objekt, naziva se sistem upravljanja.

U ovu grupu uređaja, kada se radi o analognim sistemima upravljanja, ulaze regulatori, razni računarski elementi/moduli (sumatori, množači, djelitelji, diferencijatori, generatori funkcija, itd.), konvertori signala, galvanski izolatori signala, itd.



Sl. 2.6 Sistem automatskog upravljanja; klasifikacija na osnovi strukturne šeme

Kod računarski baziranih sistema upravljanja, svi ovi uređaji integrisani su u jedinstvenom hardware-u, a funkcije, koje ostvaruju ovi pojedinačni uređaji, ostvaruju se software-ski, korišćenjem odgovarajućih aplikacionih programa. Takođe, i neke funkcije mjernih pretvarača (pojačavanje, skaliranje, analogno-digitalna konverzija, itd.) obavljaju se unutar digitalnog sistema. Na taj način, pomjerena je granica između mjernih pretvarača i sistema obrade informacija tj. upravljačke strukture.

Komuniciranje između pojedinih uređaja u analognom SAU odvija se na principu: jedan prenosni put – jedan signal nosilac informacije, dok se komuniciranje unutar digitalnog sistema odvija na principu: jedan prenosni put – više signala nosilaca različitih informacija.

*SIGNAL* je mjerljiva veličina čiji jedan ili više parametara nose informaciju o jednoj ili više veličina koje signal predstavlja.

Drugim riječima, to je električna, mehanička, pneumatska, ili druga varijabla koja je analog mjerene varijable proizvedene davačem, transducer-om.

Na slici 2.6 data je opšta strukturna šema digitalnog sistema upravljanja gdje su dati pojedini elementi SAU. Sa slike se jasno vidi šta sve može da uđe u elemente za obradu informacija koji se danas, obzirom na nivo razvoja mikroelektronske tehnologije, realizuju u jedinstvenom hardware-u i software-u, ostvarujući upravljačku strukturu.

### 2.3.3 Izvršni uređaji (organi)

*IZVRŠNI ORGAN* je element direktne grane SAU kojim se neposredno mijenja izvršna (upravljačka) veličina. Obično izvršni organi mijenjaju tok energije ili materijala kroz objekat upravljanja u cilju dostizanja određenih radnih stanja (režima).

*IZVRŠNI MEHANIZAM (AKTUATOR)* je izvršni organ mehaničkog tipa.

Napomena:

1. Izvršni organi su u tehnološkim procesima najčešće mehanički (ventili, klapne, leptirice, itd.), ali mogu biti i drugog tipa.

2. Izvršni mehanizam se u osnovi sastoji iz mehaničkog uređaja, kojim se mijenja izvršna (upravljačka) veličina (ventil, klapna, leptirica, varijator brzine ili momenta, itd.) i pogonskog uređaja (solenoid, servomotor; električni, pneumatski, hidraulički, elektrohidraulički, itd.), koji mogu ali ne moraju biti izvedeni kao jedinstvena konstrukcijska cjelina.

Izvršni organi se obično montiraju na objektu gdje je moguća promjena toka energije ili materijala koji su obično upravljačka dejstva.

Izvršni uređaji mogu biti svrstani u četiri grupe obzirom na njihove dinamičke karakteristike:

1. Proporcionalni izvršni uređaji:
  - pogoni sa proporcionalnom karakteristikom i aperiodičnim odzivom prvog ili višeg reda,
  - pneumatski i hidraulički pogoni sa mehaničkom povratnom spregom
2. Integrirajući izvršni uređaji sa regulacijom brzine:
  - linearni integrirajući izvršni uređaji,
  - hidraulički pogoni bez povratne sprege; pogoni koji koriste elektromotore jednosmjerne struje sa regulacijom brzine.
3. Integrirajući izvršni uređaj sa konstantnom brzinom:
  - nelinearni integrirajući izvršni uređaji,
  - pogoni koji koriste naizmjenične motore sa trofaznim regulatorom.
4. Izvršni uređaji diskretnog tipa:
  - koračni motori,
  - integrirajući ili proporcionalni izvršni uređaji.

### 2.3.4 Pomoćni uređaji

Pomoćni uređaji nisu prikazani na blok šemama SAU datim na slikama 2.1 – 2.6, međutim oni su veoma bitni za funkcionisanje pojedinih uređaja i sistema automatskog upravljanja. U ovu grupu spadaju:

- razne napojne jedinice (izvori snage),
- stabilni izvori napona i struje,
- izvori komprimovanog vazduha,
- izvori hidrauličnog napajanja
- razni pokazni instrumenti i registrujući pribori i mediji (klasični pokazni instrumenti, ekrani sa katodnom cijevi, magnetne trake, diskete, diskovi itd.),
- razni pribori (kablovi, cijevi, priključci, konektori, itd.),
- sigurnosne barijere koje omogućavaju primjenu SAU u eksplozivno opasnim sredinama, itd.

SAU s obzirom na tehničku realizaciju, a u odnosu na vrstu pomoćne energije koja se koristi za njihov rad, mogu se klasifikovati na:

- mehaničke,
- elektromehaničke,
- hidrauličke,
- pneumatske,
- električne (elektronske).

Savremeni SAU hibridni su po tehnologijama u kojima su realizovani; npr. to su obično elektromehanički, elektrohidraulični, elektropneumatski, itd. kada se radi o izvršnim organima dok su sistemi i uređaji obrade informacije (upravljačke strukture) obično izvedeni u homogenoj tehnologiji koja danas uglavnom mikroelektronska.

### 3. TEHNIČKE KARAKTERISTIKE SAU

Primarni zahtjev koji se postavlja na SAU je da održava upravljane varijable unutar specificiranih granica u toku promjene uslova, koji remete rad sistema ili djeluju na sistem. Sistemi automatskog upravljanja s povratnom spregom teže da svedu grešku na prihvatljivu vrijednost. Pod određenim uslovima, upravljanje može da izazove nestabilan rad sistema, kada upravljane varijable više nije moguće održavati unutar definisanih granica. Tada greška može da počne divergirati u vremenu. Ti određeni uslovi mogu biti: preveliko pojačanje u sistemu, postojanje kašnjenja u sistemu, promjene parametara objekta, itd. S druge strane, zahtjev na tačnost sistema, oprečan je sa zahtjevom na stabilnost sistema upravljanja.

Tehnički zahtjevi ili specifikacije koje se postavljaju na uređaje i sisteme automatskog upravljanja, zavise od objekta (proces) upravljanja i performansi koje treba ostvariti. Pored toga, te zahtjeve određuju i uslovi sredine u kojoj SAU radi.

Obzirom da je proces upravljanja dinamički proces, to je neophodno, pored ispunjenja uslova na statičku tačnost, ispuniti i uslove na dinamičku tačnost SAU.

#### 3.1 STATIČKE KARAKTERISTIKE SAU

U POGLAVLJU 1 izneseno je da svaki dinamički sistem može biti opisan relacijama (1.1)-(1.7). Odgovarajućom transformacijom sistem opisan relacijama (1.3) i (1.4) može se, za slučaj sistema s konstantnim parametrima, opisati sljedećom diferencijalnom jednačinom

$$a_n \frac{d^n c}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} c}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dc}{dt} + a_0 c = b_m \frac{d^m r}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} r}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dr}{dt} + b_0 r \quad (3.1)$$

Ako su početni uslovi jednaki nuli, tada je funkcija prenosa u s-domenu

$$G(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} = \frac{C(s)}{R(s)} \quad (3.2)$$

gdje je:  $C(s)$ ,  $R(s)$  - Laplace-ova transformacija izlaznog i ulaznog signala, respektivno.

Matrična funkcija prenosa sistema (1.3) i (1.4) data je izlazom (1.5) ili izrazom (1.6).

Kretanje sistema (3.1) u stacionarnom stanju može se opisati jednačinom (kada se u (3.2) zamjeni  $s = 0$ )

$$a_0 c = b \quad (3.3)$$

koja predstavlja matematički opis statičke karakteristike opisivanog linearnog sistema. Nagib statičke karakteristike je definisan kao  $tga = b_0 / a_0$ .

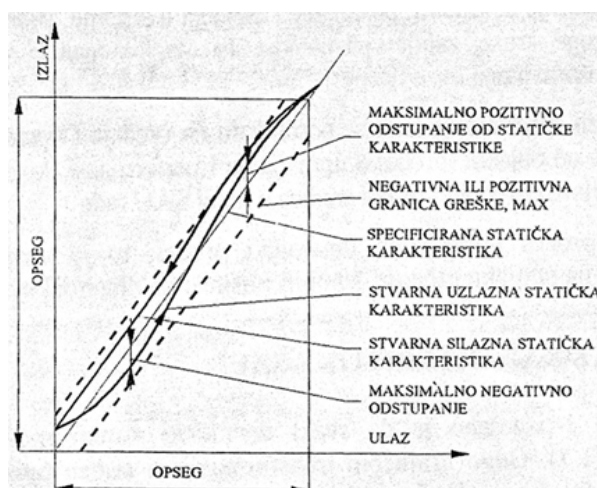
Statičke karakteristike prekidačkog (relejnog) tipa definišu se grafički ili opisuju posebnom matematičkom notacijom.

##### 3.1.1 Definicije parametara statičke karakteristike uređaja i SAU

Parametri statičke karakteristike bitni su za mjerne pretvarače i izvršne elemente. Ove karakteristike kod ovih uređaja obično su linearne.



Na slici 3.1 data je statička karakteristika linearnog sistema.



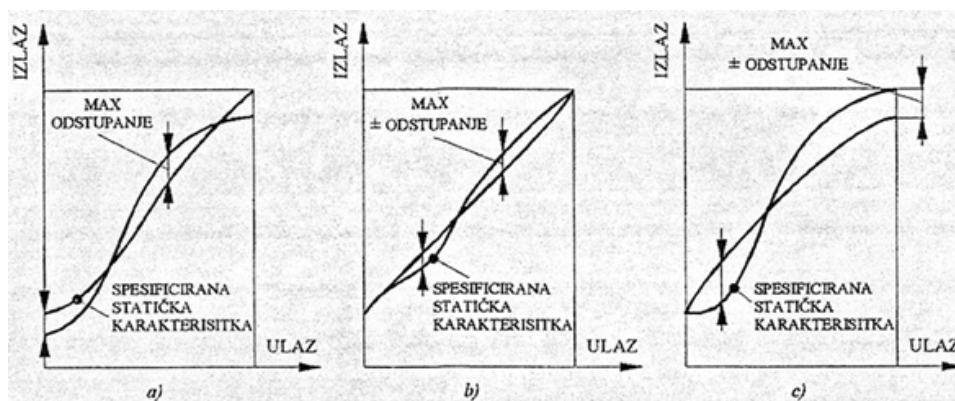
Sl. 3.1 Referentna tačnost

**TAČNOST** je odstupanje indicirane (mjerene) vrijednosti od stvarne specificirane vrijednosti.

**REFERENTNA TAČNOST** je broj ili veličina koja definiše granice koje greška neće premašiti kada uređaj radi u referentnim radnim uslovima, si. 3.1.

Referentna tačnost uključuje u sebe kombinaciju greške podudarnosti, histereze i obnovljivosti. Ona mora biti izražena brojačno u odgovarajućim jedinicama uz obavezan predznak "plus" ili "minus". Može biti izražena u odnosu na opseg, gornju granicu opsega, dužinu skale, tekuću vrijednost, itd.

**PODUDARNOST** statičke karakteristike je bliskost sa kojom se aproksimira specificirana statička karakteristika. Postaje: nezavisna podudarnost, granična podudarnost i podudarnost bazirana na početak statičke karakteristike. Ove podudarnosti date su na slici 3.2, a), b), i c), respektivno.



Sl. 3.2 Podudarnost statičke karakteristike

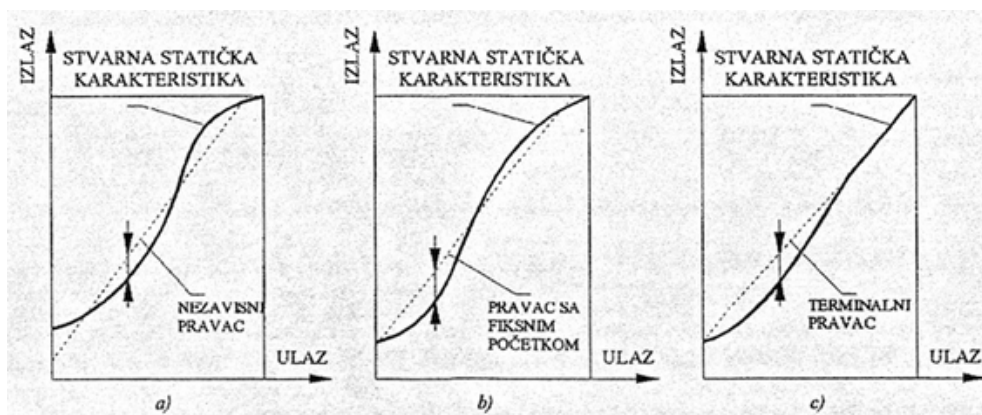
a) nezavisna podudarnost, b) granična podudarnost, c) nulta podudarnost

**LINEARNOST** je bliskost neke krive definisanoj pravoj.

Ona je obično mjerena kao nelinearnost, a izražava se kao linearnost, tj. to je maksimalno odstupanje između srednje stvarne krive (statičke karakteristike) i prave linije. Srednja kriva dobiva se na bazi više mjerenja u čitavom opsegu statičke karakteristike idući u oba smjera.

Veličina linearnosti odnosi se na izlaznu veličinu uređaja ako drugačije nije određeno.

U principu, postoje tri vrste linearnosti: nezavisna linearnost, terminalna (granična) linearnost, i linearnost bazirana na početak statičke karakteristike, slika 2.2, a), b) i c), respektivno.

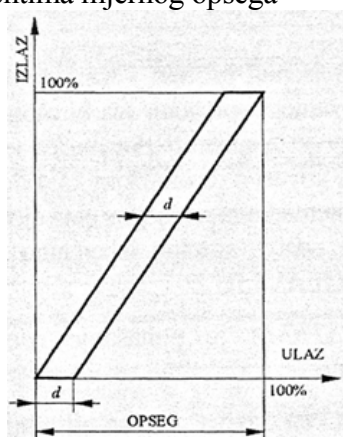


Sl. 3.3 Definisane linearnosti:

a) nezavisna linearnost, b) nulta linearnost, c) terminalna linearnost

**PODRUČJE NEOSJETLJIVOSTI MRTVA ZONA** je opseg promjene ulaza bez pojave izlaza.

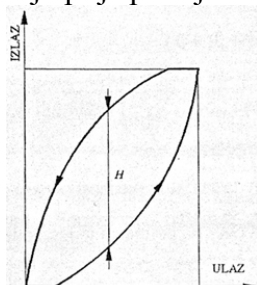
Mrtva zona obično se izražava u procentima mjernog opsega



Sl. 3.4 Područje neosjetljivosti

**HISTEREZIS** je maksimalna razlika između ulazne i silazne statičke karakteristike pri istom ulazu, slika 3.5.

Ova definicija uključuje i histerezis i mrtvu zonu. Kada se govori o histerezisu kao fizičkoj osobini, to je onda osobina elementa koja definiše zavisnost izlaza za definisanu promjenu ulaza uzimajući u obzir istoriju prije promjene ulaza i pravac promjene ulaza.



Sl. 3.5 Histereis i mrtva zona

**MRTVA ZONA** je zona gdje izlazna veličina ne postoji.

**NEUTRALNA ZONA** je zona u kojoj se prethodno postojeća veličina ne mijenja.

**PODRUČJE (RANGE)** je oblast između granica unutar kojih se mjerena veličina prima ili šalje.

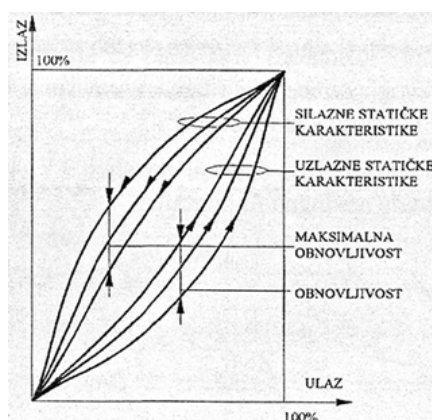
Npr. to je: 0-150 K, -20-200°C.

**OPSEG** je algebarska razlika između gornje i donje veličine područja.

Npr. ako je područje 0-150 K, opseg je 150 K ili ako je područje 4-20 mA, opseg je 16 mA.

**OBNOVLJIVOST** je bliskost izlaznih veličina koje su rezultat većeg broja uzastopnih mjerenja pri istim veličinama ulaza pod istim radnim uslovima i u što kraćem vremenu, slika 3.6.

Obnovljivost se izračunava u procentima opsega i ne uključuje u sebe histerezis.



SI. 3.6 Obnovljivost

**REPRODUCIBILNOST** je obnovljivost parametara u nekom periodu vremena. Mjeri se u procentima opsega i u sebe uključuje, kada se radi o dužem periodu vremena, obnovljivost, histerezis i drift.

**DRIFT** je izmjena statičke karakteristike u datom periodu vremena. Obično se izražava u procentima opsega. Pri tome, u tom periodu, moraju biti isti uslovi.

**OSJETLJIVOST** je odnos promjene izlazne veličine i promjene ulazne veličine poslije nekog dostignutog stacionarnog stanja.

Za linearne sisteme osjetljivost je konstantna dok se kod nelinearnih sistema mijenja od radne tačke do radne tačke u opsegu promjena.

**POJAČANJE** linearnog sistema ili elementa je odnos amplitude stacionarnog sinusoidalnog signala na izlazu koji je uzrokovao ulazni signal, i ulaznog signala.

Ovo pojačanje može biti promatrano kao: proporcionalno pojačanje K koje je frekventno nezavisno, dimenzije koja odgovara količniku dimenzije izlazne i ulazne veličine i kao pojačanje  $G(j\omega)$  koje je frekventno zavisno. Pri tome frekvencija, uslovi rada i način

mjerenja, moraju biti definisani. U nelinearnim sistemima, pojačanje je obično amplitudno zavisno.

Dinamičko pojačanje sistema ili element definiše se kao odnos amplitude izlaznog signala u stacionarnom stanju, za dati sinusoidalni ulazni signal.

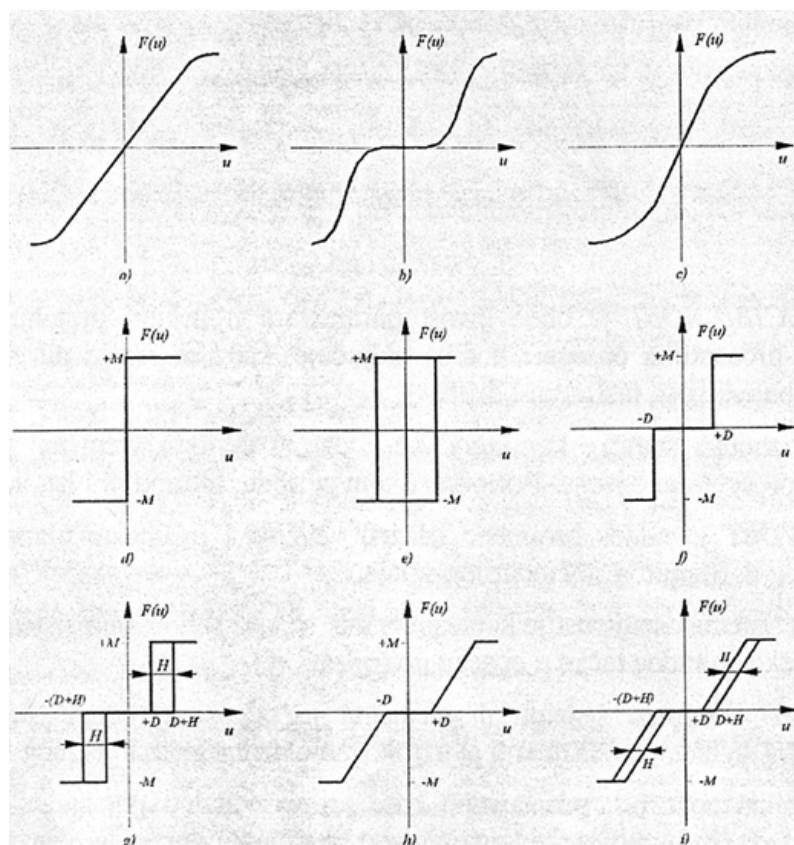
Statičke karakteristike uređaja i sistema upravljanja veoma su bitne, a naročito za mjerne pretvarače tj. informacione organe i donekle i izvršne organe, jer od njihove tačnosti zavisi i kvalitet upravljanja tj. performanse upravljanog sistema.

### 3.1.2 Tipične statičke karakteristike uređaja i sistema upravljanja

Statičke karakteristike mjernih pretvarača i izvršnih organa poželjno je da budu linearne u datom području rada. Obično su te karakteristike van područja rada na donjoj i gornjoj granici opsega nelinearne tj. tipa zasićenja iz fizikalnih razloga.

Upravljačke strukture (npr. regulatori) vrlo često se konstruišu da budu nelinearni (kontinualni ili relejni) zbog potrebe algoritama upravljanja ili zbog jednostavnosti realizacije kao što su dvo i tropozicioni regulatori.

Neke tipične statičke karakteristike date su na slici 3.7. Realizacija pomenutih karakteristika može da bude analogna ili digitalna.



Sl. 3.7 Tipične karakteristike: a) linearna sa zasićenjem, b) linearna sa zonom neosjetljivosti i zasićenjem, c) nelinearna, d) relejna, e) relejna sa histerezisom, f) relejna sa zonom neosjetljivosti, g) relejna sa zonom neosjetljivosti i histerezisom, h) linearna sa zonom neosjetljivosti i zasićenjem, i) linearna sa zonom neosjetljivosti, zasićenjem i histerezisom

### 3.2 DINAMIČKE KARAKTERISTIKE UREĐAJA I SISTEMA UPRAVLJANJA

Mogućnost podešavanja prelaznog procesa i stacionarnog stanja osnovna je prednost sistema upravljanja sa povratnom spregom. Da bi moglo da se pristupi projektovanju bilo kog SAU, neophodno je analizirati dinamičke karakteristike SAU i definisati njihove parametre. Kada se govori o dinamičkim karakteristikama, ovdje se prije svega misli na vremenski odziv sistema kada na njegov ulaz djeluje jedinična step funkcija. Sve informacije o dinamičkom odzivu sistema su sadržane u matematičkom modelu koji je opisan u POGLAVLJU 2.

*DINAMIČKI ODZIV SISTEMA* je ponašanje izlazne veličine u vremenu u zavisnosti od ulazne veličine.

Osnovni parametri dinamičkog odziva sistema određuju se u odnosu na odziv SAU drugog reda kada na njegov ulaz djeluje jedinična step funkcija. Odziv sistema drugog reda dat je u kompleksnom domenu izrazom

$$X(s) = \frac{w_n^2}{s^2 + 2\xi s + w_n^2} R(s) \quad (3.4)$$

gdje je:  $R(s)$  – zadata vrijednost sistema

Ako je  $R(s) = 1/s$ , tada se ima da je

$$x(t) = 1 - \frac{1}{\beta} e^{-w_n t} \sin(w_n \beta t + \theta) \quad (3.5)$$

gdje je:  $\beta = \sqrt{1 - \xi^2}$ ,  $\theta = \tan^{-1} \beta / \xi$ ,  $w_n$  - prirodna frekvencija sistema,  $\xi$  - koeficijent prigušenja.

Odziv ovog sistema drugog reda za datu vrijednost odnosa prigušenja dat je na slici 3.8.

PROCENTUALNI PRESKOK,  $A$ , definisan je izrazom

$$A = \frac{M_{pt} - 1}{1} \times 100\%$$

Za sistem drugog reda sa konstantom prigušenja  $\xi w_n$ , a da odziv ostane unutar 2%, neophodno je približno  $4\tau$  ili

$$T_s = 4\tau = \frac{4}{\xi w_n} \quad (3.6)$$

Vrijeme prvog maksimuma je

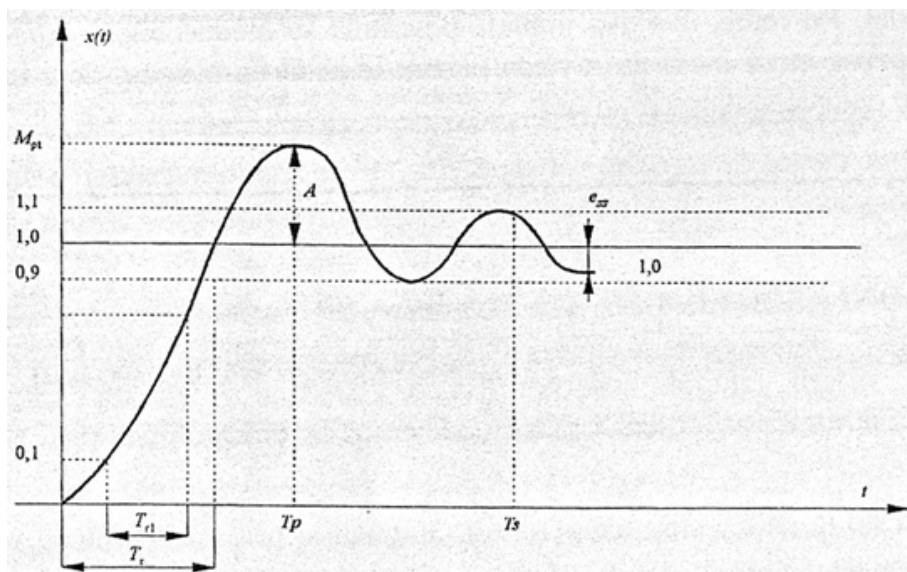
$$T_p = \frac{\pi}{w_n \sqrt{1 - \xi^2}} \quad (3.7)$$

a maksimalna vrijednost prvog pika

$$M_{pt} = 1 + e^{-\pi / \sqrt{1 - \xi^2}} \quad (3.8)$$

Na osnovi (3.8) procentualni preskok je

$$a = 100e^{-\pi / \sqrt{1-\xi^2}} \quad (3.9)$$



Sl. 3.8 Odziv sistema (3.5)

$T_{r1}$  - vrijeme porasta,  $T_r$  - vrijeme step odziva do 100%,  $T_s$  - vrijeme uspostavljanja,  $T_p$  - vrijeme prvog maksimuma,  $M_{pt}$  - vrijednost prvog maksimuma,  $A$  - veličina prvog preskoka,  $e_{ss}$  - greška stacionarnog stanja

**FREKVENTNI ODZIV** (karakteristika) linearnog sistema je odnos Fourier-ove transformacije izlazne veličine i Fourier-ove transformacije odgovarajuće ulazne veličine pri početnim uslovima jednakim nuli.

Drugim riječima, to je relacija koja opisuje frekventnu zavisnost amplitude i faze prenosne funkcije sistema kada se kompleksna promjenljiva zamijeni sa  $s = j\omega$ . Ova karakteristika naziva se i amplitudno-fazna karakteristika. Uobičajeno predstavljanje vrši se pomoću Bode-ovog dijagrama.

Snimanje frekventne karakteristike vrši se na osnovi snimanja odziva na sinusni ulazni signal promjenljive frekvence.

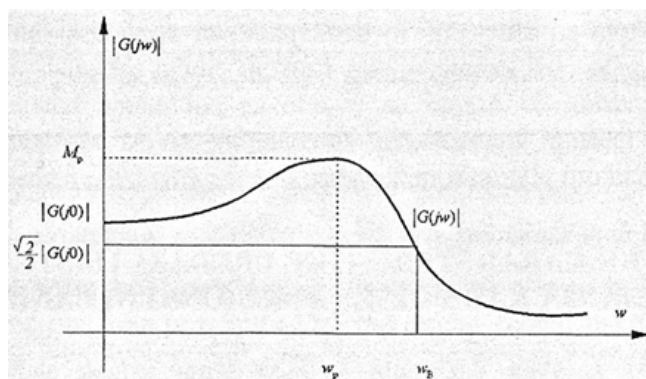
Na osnovni frekventnog odziva, moguće je dobiti statičko pojačanje, koje je odnos amplitude izlaznog signala i amplitude ulaznog signala pri  $\omega=0$ , ili to je modul prenosne funkcije, tj.

$$K_{statico} = |G(j\omega)|_{\omega=0} \quad (3.10)$$

**FREKVENTNA PROPUSNOST** sistema, propusni opseg  $\omega_B$  je pojas frekvence gdje je prigušenje amplitude  $|G(j\omega)|$  jednako  $\sqrt{2}/2$ , što odgovara približno - 3db. Propusni opseg dobija se iz relacije

$$\sqrt{2}/2|G(j0)| = |G(j\omega_B)| \quad (3.11)$$

rješavajući datu relaciju po  $\omega_B$ . Amplitudno-frekventna karakteristika jednog tipičnog sistema s povratnom spregom data je na slici 3.9 gdje je dat i propusni opseg tj.  $\omega_B$ .



Sl. 3.9 Definisane frekventne propusnosti;  $\omega_B$  - propusna frekvencija

Specificirana pobuda može biti jedinična step funkcija, rampa, vremenska parabola, ili sinusoida.

Dinamičke karakteristike naročito su važne kod mjernih pretvarača i izvršnih organa i aktuatora. Idealni mjerni pretvarač trebao bi da bude u dinamičkom smislu linearni statički element, tj. da je

$$G(s) = K = \text{const} \quad (3.12)$$

nezavisna od frekvencije. Isti zahtjev važi i za izvršne organe, mada je to kod njih mnogo teže postići obzirom na njihovu prirodu, da moraju na svom izlazu obezbijediti mnogo veću snagu i energiju. Dinamičke karakteristike ovih uređaja utiču direktno na dinamičku tačnost sistema, stabilnost sistema, vrijeme smirenja, itd. i time na performanse SAU.

Ako je mjerni pretvarač prvog reda, onda njegova vremenska konstanta mora biti što manja, makar za red veličine manja od odgovarajuće vremenske konstante upravljanog objekta. Primjera za ovo ima mnogo. Tipičan primjer je mjerenje i regulacija temperature u konusu mlaznog motora pomoću termoelementa.

U ovom slučaju posebnu pažnju treba posvetiti smještaju termoelementa tako da ovaj ima što manju vremensku konstantu, obzirom da se radi o upravljanju "brzog" objekta; step na dovod goriva, skoro se trenutno odražava na odziv temperature u konusu mlaznog motora.

Dinamika davača mora takođe biti zanemariva i u primjenama u oblastima upravljanja aviona, gdje se promjene stanja upravljanog aviona brzo mijenjaju, u sistemima zaštite elektroenergetskog sistema, gdje se kvar mora otkloniti u toku nekoliko desetih dijelova sekunde.

Radi toga, prilikom sinteze mjernih pretvarača i uređaja za dobivanje informacija, mora se voditi računa o dinamičkoj i statičkoj tačnosti tj. teži se da ovi uređaji budu u dinamičkom smislu jedno ili dvokapacitivni aperiodični blokovi, a da pri tome odzivi budu što bliži jediničnoj step funkciji. Slični zaključci važe i za izvršne organe. Tako, hidraulični organi na avionu za pokretanje komandnih površina moraju biti sa malom vremenskom konstantom, tj. sa visokom frekventnom propusnošću, i velikom pogonskom snagom.

### 3.3 TEHNIČKE KARAKTERISTIKE UREĐAJA I SISTEMA UPRAVLJANJA KADA ČINE FUNKCIONALNI LANAC

U POGLAVLJU 2, slika 2.5, data je blok šema jednog složenijeg sistema automatskog upravljanja. Pri tome, taj sistem sastavljen je od dva funkcionalna lanca koje čine više raznih uređaja i elemenata. Funkcionalni lanac koji čini direktnu granu sastoji se od: regulatora (upravljačke strukture), izvršnog organa (npr. servomotor sa regulacionim ventilom) i objekta.

Da bi bilo moguće povezivanje uređaja u funkcionalni lanac (niz) moraju biti ispunjeni slijedeći uslovi:

- postojanje signalne kompatibilnosti između dva susjedna uređaja (bloka) u funkcionalnom lancu; naime, izlaz iz prvog bloka mora biti signalno kompatibilan sa ulazom drugog bloka,
- impedansno prilagođenje,
- unilateralnost blokova (ne uvijek); što znači da se informacija može prenositi samo u jednom smjeru.

Neke od definicija termina koji se koriste u ovom dijelu su date u nastavku.

*SIGNAL* je informacija o varijabli koja može biti prenešena.

*ULAZNA IMPEDANSA* je impedansa uređaja gledano sa strane ulaza u uređaj.

*IZLAZNA IMPEDANSA* je impedansa uređaja gledano prema opterećenju na izlazu.

*BLOK (UREĐAJ)* sistema upravljanja unilateralan je ako je moguć prenos informacija samo u jednom smjeru.

Funkcija prenosa dva unilateralna bloka povezana u seriji, jednaka je proizvodu funkcija prenosa svakog pojedinačnog bloka. Kod neunilateralnih blokova to nije slučaj. Dvije pasivne RC mreže spojene u seriji, međusobno su interaktivne jer ulaz druge opterećuje prvu. Ubacivanjem elementa za impedantno razdvajanje, moguće je dvije RC mreže učiniti neinteraktivnim ali i unilateralnim.

*IMPEDANSA OPTEREĆENJA* je ona impedansa koju element SAU može da savlada u vidu opterećenja na svom izlazu.

Pod signalnom kompatibilnošću podrazumijeva se da izlazni signal iz prvog uređaja mora odgovarati po fizičkoj prirodi, području i opsegu ulaznom signalu u drugi uređaj. Pri tome, ova dva uređaja povezana su međusobno u lancu. Izlazni signal iz prvog mora moći da savlada ulaznu impedansu drugog, koja igra ulogu impedanse opterećenja prvog uređaja.

Kod prenosa digitalnih signala, pored ostalog, treba voditi računa i o frekventnoj propusnosti prenosnog puta, a time i o daljini prenosa, o čemu će biti govora kasnije.



### 3.4 RADNI USLOVI

Jedan od važnih faktora kod konstrukcije uređaja i sistema automatskog upravljanja je uzimanje u obzir i radnih uslova, tj. ambijentnih uslova u kojima će raditi SAU.

Uslovi kao što je ambijentna temperatura, ambijentni pritisak, vlažnost, vibracije, udari, radijacija, elektromagnetska zračenja, slana atmosfera, itd., kojima je oprema izložena, nazivaju se *RADNIM USLOVIMA*.

*NORMALNI RADNI USLOVI* pripadaju području radnih uslova unutar kojih treba da radi projektovani SAU pri datim radnim uslovima.

*REFERENTNI RADNI USLOVI* pripadaju području radnih uslova opreme, unutar kojih su radni uticaji zanemarivi. Pri tome područje radnih uslova obično je suženo. Takođe, to su uslovi pri kojima su utvrđene referentne performanse uređaja iz kojih se određuju veličine radnih uticaja.

*RADNI UTICAJI* predstavljaju izmjenu performansi uzorkovanih izmjenom u specificiranom radnom uslovu u odnosu na referentni radni uslov, uz održavanje drugih uslova unutar granica referentnih radnih uslova.

Specificirani radni uslovi obično su granice normalnih radnih uslova.

Radni uticaji mogu biti definisani i na drugi način; kao totalna izmjena performanse koja potiče od referentnog radnog uslova za specificirani radni uslov.

Primjer: Uticaj napona napajanja na tačnost može biti izražen kao:

2% opsega bazirano na promjeni napona od referentne vrijednosti od 120 V na vrijednost od 130 V ili

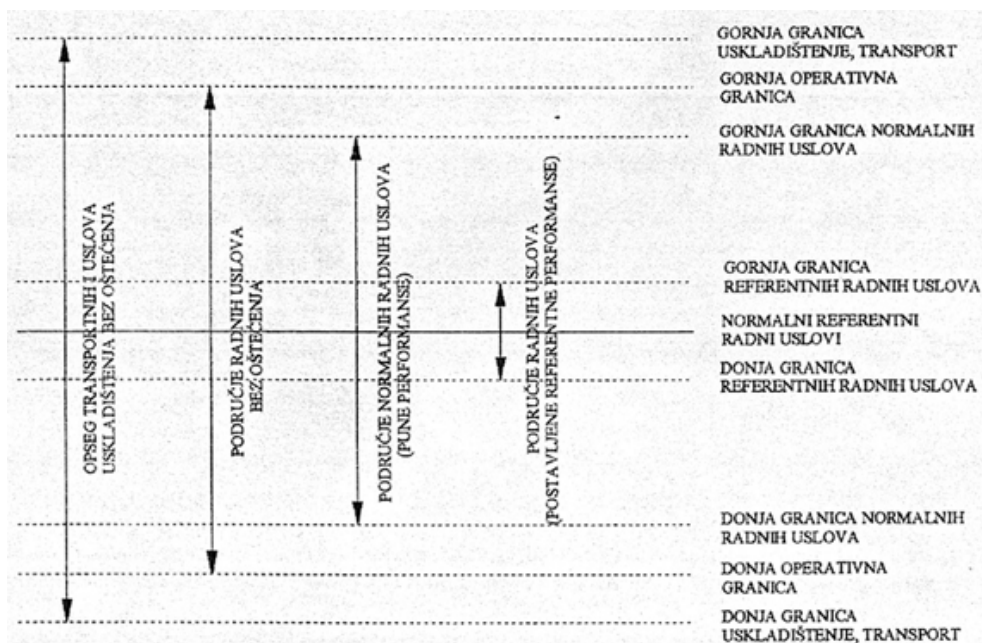
$$\frac{2\%OPSEGA}{130V - 120V} = 0.2\%OPSEGA/V$$

Relacija između radnog uticaja i izmjene u radnom uticaju, obično je linearna, što ne znači da ne može biti i drugačije. Npr. 0.05% opsega po voltu za promjenu napona od 120-125 V, a 0.15% opsega po voltu za promjenu napona od 125-130 V.

*RADNE GRANICE* predstavljaju područje radnih uslova u kojima projektovana oprema radi bez permanentnog sužavanja radnih karakteristika.

Obično se performanse uređaja ili sistema ne postavljaju u oblast između granica normalnih radnih uslova i radnih granica.

Na slici 3.10 dat je dijagram radnih uslova.



Sl. 3.10 Dijagram radnih uslova

Za određene oblasti primjene uređaja i sistema upravljanja, postoje relevantni standardi koji detaljno definišu ovu problematiku. U oblasti upravljanja tehnološkim i industrijskim procesima u okviru IEC TC N°65: INDUSTRIAL PROCESS MEASUREMENT AND CONTROL, postoje preporuke koje definišu radne uslove i uticaj ambijenta. Publikacija IEC 654-1 Part one, definiše radne uslove: temperaturu, vlažnost i barometarski pritisak, Publikacija IEC654-2, Part two, snagu, Publikacija IEC654-3, Part three, mehaničke uticaje, Publikacija IEC654-4, Part four, korozivne i erozivne uticaje, i Publikacija IEC654-5, part five, elektromagnetsku kompatibilnost.

Pored pomenutih publikacija, postoje i mnogi nacionalni standardi ili standardi velikih svjetskih firmi i nacionalnih udruženja koja su i dalje na snazi ili su bili osnova za izradu IEC standarda i preporuka. Takvi standardi su npr: American National Standards Institute - ANSI, IEEE standardi, Instrument Society of America - ISA standardi, Scientific Apparatus Makers Association - SAMA standardi, Process Measurement Section - PMC standardi, itd.

Za uređaje i sisteme za vojne primjene relevantni su tzv. Military Standards - MIL STD. Jedan od standarda koji definiše ovu problematiku u vazduhoplovnoj industriji je američki MIL STD 810 C.

### 3.5 OSTALE TEHNIČKE KARAKTERISTIKE SAU

Pored pomenutih tehničkih karakteristika i radnih uslova, postoji i niz drugih tehničkih karakteristika SAU. Prije svega, ovdje se misli na izvore napajanja pomoćnom energijom koji omogućavaju funkcionisanje, i na mehaničko oformljenje (konstrukciju) koje omogućava odgovarajući smještaj uređaja i sistema u pogonu.

*POTROŠNJA SNAGE* je maksimalna snaga koju zahtjeva oprema ili SAU unutar svog radnog područja u uslovima stacionarnog stanja signala.

Kod uređaja koji se napajaju električnom energijom, potrošnja se definiše u  $VA$ .

Za uređaj koji radi van radnog područja u smislu radnih uslova, maksimalna snaga može biti veća od one koja je potrebna za rad unutar radnih uslova, što se mora posebno naglasiti.

*KAPACITET PNEUMATSKOG IZVORA NAPAJANJA* je maksimalni protok vazduha kojim uređaj (pneumatski) može napajati neko opterećenje sa padom pritiska od 1 bara pri specificiranom nivou pritiska. Protok se izražava u  $dm^3/h$ . Pad pritiska mjeri se na opterećenju.

Pored ovih, definišu se i drugi podaci. To su: napon napajanja, frekvencija napona napajanja, moguće varijacije napona napajanja, itd.

Kod pneumatskih i hidrauličkih izvora napajanja, definiše se pored kapaciteta (protoka) i čistoća vazduha i fluida, viskoznost fluida, vlažnost vazduha napajanja, itd.

## 4. KOMUNIKACIJE U SAU

### 4.1 UVODNA RAZMATRANJA

Prenos podataka ili signala u sistemima upravljanja kao što su sistemi regulacije, sistemi za prikupljanje i prezentaciju podataka, sistemi za zaštitu i upravljanje elektroenergetskim sistemima, telemetrijski sistemi, je veoma važan proces. Ovaj proces prenosa informacija unutar i između sistema upravljanja, postao je veoma bitan, čak suštinski, kod distribuiranih sistema upravljanja. U osnovi, radi se o digitalnim sistemima koji u domenu sistema za obradu informacija postaju sve dominantnijim nad analognim sistemima upravljanja.

Posljednjih nekoliko godina došle su do izražaja značajne prednosti realizacije uređaja i sistema upravljanja na bazi digitalne tehnike. U vezi s tim, došlo je do značajnog smanjenja cijene po funkciji, povećana je tačnost, kao i moć i fleksibilnost SAU. Sve ovo omogućeno je napretkom u proizvodnji digitalnih kola uz stalno smanjivanje cijene njihovog koštanja.

Pored ostalih prednosti digitalni sistemi pružaju veću sigurnost, veću tačnost, stabilnost i pouzdan prenos signala. Digitalni signali prenose se kao biti, ili binarne cifre, a prijemnik signala treba samo da razlikuje binarne "1"-jedinice (prisustvo signala) i binarne "0"-nule (odsustvo signala).

U SAU, u principu, moguć je prenos analognih ili digitalnih (diskretnih) signala. Osnovni zahtevi na dobar prenos informacije ili signala je tačnost prenosa prenosnim putem i posjedovanje dovoljnog kvaliteta prenesene informacije na kraju prenosnog puta.

SAU za upravljanje tehnoloških procesa, elektroenergetskih sistema, prikupljanje podataka, itd., obično rade na takvim lokacijama gdje vladaju teški ambijentni uslovi rada (visoke temperature, vlažnost, uticaji elektromagnetnih smetnji, itd.). Radi toga, neophodno je kod projektovanja prenosnih puteva unutar i između SAU, osigurati integritet podataka, što podrazumijeva primjenu specifičnih načina prenosa signala, a koji zavisi od tipa samog signala, tačnosti prenosa, udaljenosti, tipa prenosne linije, itd.

Osnovni zahtev koji treba da bude ispunjen u toku prenosa signala je da se odnos SIGNAL/ŠUM ( $S/N$ ) na prenosnoj liniji zadrži na nivou koji obezbjeđuje zahtijevanu tačnost. Drugi faktor koji je bitan za prenos signala, je minimizacija uticaja koji smanjuju upotrebljivu daljinu prenosa. Da se ilustruje zahtjev na odnos  $S/N$ , neka bude razmotren sljedeći slučaj.

Dobar analogni regulator ima vremenski drift manji od 0.1% OPSEGA/h, ili 5 mV za područje izlaznog signala 0-5 V.

Mjerenja vršena na dvostrukom oklopljenom kablu, dužina 100-200 m, koji prolazi kroz tipičnu industrijsku sredinu, pokazala su da je realan nivo šuma  $\pm 0.1$  V, a nakon odgovarajuće redukcije, moguće ga je svesti na oko  $\pm 10$  mV. Ovo znači da je u ovom slučaju šum reda 0.2% OPSEGA analognog signala 0-5 V.

Ako je nivo logičke jedinice 5 V, što je oko 500 puta veće od nivoa šuma, u slučaju opisanom ovdje, vjerovatnoća zamjene "1" sa "0" i obrnuto skoro je nikakva. Konsekventno tome, tačnost prenosa signala zavisi samo od broja binarnih cifara upotrebljenih da se predstavi signal. Budući da digitalni signali mogu biti procesirani brzinom većom od 105 bita/s, veliki broj bita može se upotrijebiti za opisivanje amplitude signala u datom trenutku vremena. Tako, bilo koji broj

između 0 i 1048575 može biti predstavljen upotrebom 20 bita koji omogućuju tačnost od oko 1ppm (jedan milioniti dio). Ako je brzina prenosa 200000 bita/s, tada 10000 brojeva može biti preneseno svake sekunde. Ako su neki od ovih bita upotrebljeni za labele, tada može biti prenošeno više različitih vrsta digitalnih signala istom prenosnom linijom, ili multipleksirano.

Dakle, kod SAU fundamentalni zahtjev koji se postavlja kod njihove sinteze je zahtjev prema komunikacijama, tj. tačan i pouzdan prenos informacija iz jedne tačke u drugu prenošenjem signala. Mada je ovaj zahtjev uvijek bio od izuzetne važnosti, on je sada postao još važniji od kako su SAU postali dominantno distribuirani. Danas, većina sistema upravljanja koristi električne signale za prenos informacija, mada i dalje u nekim specifičnim aplikacijama, za prenos se koristi i pneumatski signal (eksplozivno opasne sredine). U budućnosti za prenos informacija sve će masovnije biti korišteni optički signali zbog niza prednosti koje posjeduju.

## 4.2 PRENOS ANALOGNIH SIGNALA

Prenos analognog signala kroz sistem upravljanja omogućava funkcionalno povezivanje uređaja koji čine SAU. Na slici 2.4 i slici 2.5 za povezivanje mjernog pretvarača i regulatora i servomotora koristi se obično dvoprovodna linija kroz koju prolazi strujni signal nosilac informacije. Prije prelaska na detaljnija razmatranja, neka bude definisan pojam analogni signal.

*ANALOGNI ILI KONTINUALNI SIGNAL* je signal čiji informacioni parametar može da ima svaku vrijednost unutar datog opsega u svakom momentu vremena.

Predmet prenosa signala je tačna korespondencija toga signala u nekoj udaljenoj lokaciji od izvora. Razmatranja koja će ovdje uslijedit, odnosice se isključivo na električne signale, međutim, slični principi upotrebljavaju se za prenos pneumatskih i drugih signala.

### 4.2.1 Unificirani analogni signal

Izbor unificiranog signala u analognim sistemima upravljanja jedno je od bitnih sistemskih pitanja.

Istorijski gledano, unificirani analogni signal, prvi put, pojavio se u pneumatskim sistemima upravljanja. Već odavno je usvojen standardni signal 20-100 kPa (0,2-1,0 bar). Osnovni razlozi za uvođenje ovog signala su:

- za generisanje ovakvog signala potreban je kompresor pritiska 500-1000 kPa, što omogućuje rad sistema bez opasnosti da dođe do kondenzacije (veći je dopustivi sadržaj zasićene pare u vazduhu),
- postiže se maksimalna brzina prostiranja signala uz prečnik cijevi od 4-6 mm. Pri tome, postoji jedno ograničenje na frekventni sadržaj pneumatskog signala koji je manji od  $4/L$  [Hz] gdje je  $L$  - dužina prenosnog puta u [m],
- manja je potrebna snaga pneumatskog izvora.

Potrebna snaga srazmjerna je proizvodu pritiska i protoka vazduha, tj.

$$P = kpq = k_1 p \sqrt{p} = k_1 p^{3/2} \quad (4.1)$$

Upoređujući jedan od prvih korištenih pneumatskih signala (70-350 kPa) koji je korišten u SAU početkom ovoga vijeka u rafinerijama nafte u SAD sa signalom (20-100 kPa), potrebna je oko 6 puta manja snaga pneumatskog izvora za ovaj posljednji. Takođe, porastom pritiska rastu histereze i vremenske konstante pneumatskog sistema.

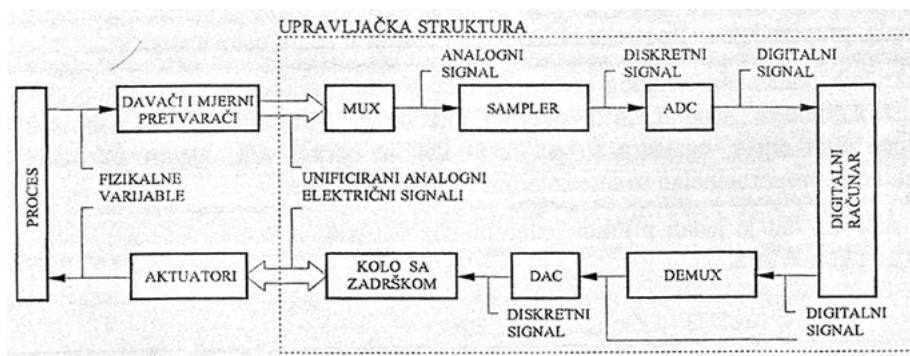
Danas, svi pneumatski SAU rade na jedinstvenom signalu (20-100 kPa), pritiska napajanja 120, 140, 250, 400 ili 600 kPa s prosječnom potrošnjom (100-3600) l/h.

Obzirom na prednosti koje danas pružaju elektronski sistemi upravljanja u odnosu na sisteme realizovane u drugim tehnologijama (pneumatski, hidraulički), najvažnije sistemsko pitanje je način komuniciranja unutar i između SAU.

Kod analognih SAU prenos informacija između pojedinih uređaja u sistemu, obično je ostvaren analognim ili digitalnim električnim signalom. Na slici 4.1 dat je detaljniji SAU, direktna i povratna grana, [9].

Danas u tehničkoj praksi i dalje postoji veliko šarenilo, kako u pogledu vrste tako i u pogledu područja i opsega signala. Pri izboru jedinstvenog standardnog analognog signala unutar SAU, bilo je potrebno riješiti tri osnovna problema:

- da li koristiti jednosmjerni ili naizmjenični signal?
- da li strujni ili naponski signal?
- koje područje i opseg signala odabrati?



SI. 4.1 Blok šema SAU; analogni električni unificirani signal

Jednosmjerni signal relativno je teže pojačavati od naizmjeničnog, pogotovo ako je malog nivoa, jer tada je uticaj drifta značajan.

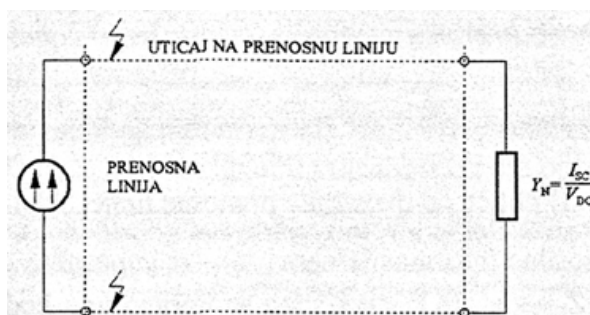
S druge strane, naizmjenični signal lakše je pojačavati, ali je otežana njegova filtracija od smetnji koje potiču od uticaja energetskih vodova, radiofrekventnih i drugih smetnji. Većina šumova u industrijskim postrojenjima koji se indukuju u prenosnim putevima frekventnog je opsega  $f_B \in [50\text{Hz}-10\text{MHz}]$ . Glavna snaga šuma koncentrisana je u području signala frekvenci od 50Hz - 100Hz (koji potiču od energetskih vodova, upravljača, fluorescentnih sijalica, itd.). Smetnje koje potiču od samog upravljanog procesa ili objekta, frekventnog su opsega 0.005Hz - 1Hz. Amplitude ovih šumova kreću se od nekoliko mV do nekoliko V.

Napretkom tehnologije proizvodnje poluprovodničkih elemenata, a naročito proizvodnje integrisanih krugova i instrumentacionih operacionih pojačavača, prevaziđen je problem pojačavanja malih jednosmjernih signala kao što su oni iz raznih davača. Tako je danas prevladao jednosmjerni električni signal kao standardni.

Odgovor na pitanje: "Da li naponski ili strujni signal", dobijen je iz prednosti koju ima strujni signal kada se koristi za prenos informacije na daljinu.

Prvo, problem pada napona duž prenosne linije, eliminisan je kao izvor greške, budući da je struja, nosilac informacije, ista u svim tačkama redne veze, prenosne linije.

Drugo, prijemnik informacije je niskoimpedantni, što minimizira razvoj šuma na izlazu zahvaljujući uticajima vanjskih smetnji. U vezi s tim, Nortonova ekvivalentna šema, data je na slici 4.2.



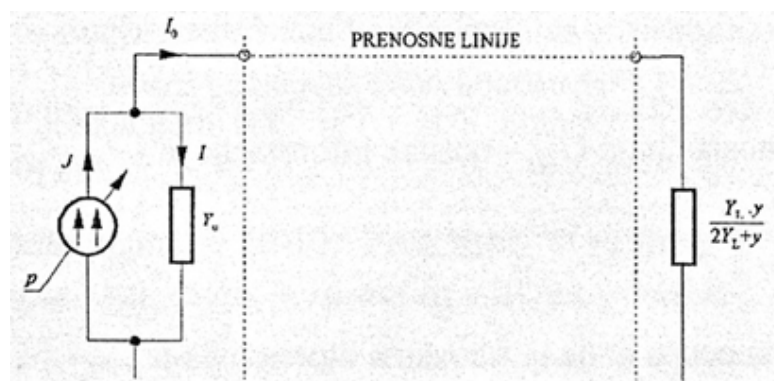
Sl. 4.2 Ekvivalentna šema izvora i prijemnika informacije

Terminalna admitansa je

$$Y_N = \frac{I_{sc}}{V_{oc}} \quad (4.2)$$

gdje je:  $I_{sc}$  - struja kratkog spoja,  
 $V_{oc}$  - napon otvorenog spoja.

Električna šema strujnog izvora - izvora informacije sa **prijemnikom** informacije data je na slici 4.3



Sl. 4.3 Ekvivalentna šema strujnog izvora

Na slici 4.3 oznake znače:

$p$  - procesni parametar koji **moduliše** intenzitet strujnog izvora,  
 $J$  - intenzitet strujnog izvora,

$$Y_U = \frac{1}{Z_U} \text{ - unutrašnja admitansa **strujnog** izvora,}$$

$I_o$  - struja nosilac informacije,

$$y = \frac{1}{z} \text{ - admitansa voda, jedne linije,}$$

$$Y_L = \frac{1}{Z_L} \text{ - admitansa opterećenja.}$$

Struja nosilac informacije  $I_o$  je:

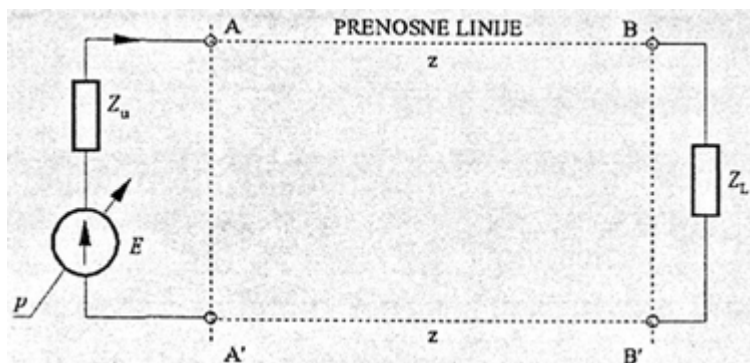
$$I_0 = \frac{JZ_u}{Z_u + 2z + Z_L} \quad (4.3)$$

gdje  $2z$  u imeniocu (4.3) potiče od dvostruke prenosne linije, slika 4.2.

Da bi struja  $I_0$  bila nosilac informacije nezavisan od impedanse prijemnika, mora biti zadovoljen uslov  $Z_u \longrightarrow \infty$  ili  $Y_u \ll Y_L$ , što se upravo ima kod strujnog izvora. Tada se ima  $I_0$

$$I_0 \xrightarrow{Z_u \longrightarrow \infty} J \quad (4.4)$$

Kada je izvor informacije naponski izvor, onda se ima šema ekvivalentnog naponskog izvora kao na slici 4.4.



Sl. 4.4 Ekvivalentna šema naponskog izvora

Napon na kraju prenosne linije  $U_{BB}$  - nosilac informacije je

$$U_{BB} = \frac{Z_L}{Z_u + 2z + Z_L} E \quad (4.5)$$

Napon na početku prenosne linije tj. na izlazu otpremnika je

$$U_{AA} = \frac{2z + Z_L}{Z_u + 2z + Z_L} E \quad (4.6)$$

gdje je:  $E$  - napon naponskog izvora proporcionalan procesnom parametru, veličini  $p$ .

Da bi napon na potrošaču bio jednak naponu izvora neophodno je da  $Z_u \longrightarrow 0$ , a  $Z_L \longrightarrow \infty$ . Prvi uslov ostvaren je kada se ima idealni naponski izvor ili približno tome, a drugi uslov je teško ostvariti, pa se teži da je  $Z_L$  što veće. Međutim veliko  $Z_L$  povećava osjetljivost na šumove.

Na osnovu ovoga zaključuje se da je naponski signal nepogodno prenositi na daljinu obzirom na gubitak informacije na prenosnom putu, analizirati relaciju (4.5).

Brzina prenosa analognog signala, obzirom na udaljenost, (1-3 km za strujni signal, 10-30 m za naponski signal), ograničena je samo frekventnom propusnošću strujnog ili naponskog izvora, što danas nije problem obzirom na frekventnu propusnost analognih integrisanih kola (IC), koja je veća od nekoliko desetina kHz, što je dovoljno za široku klasu procesnih varijabli.

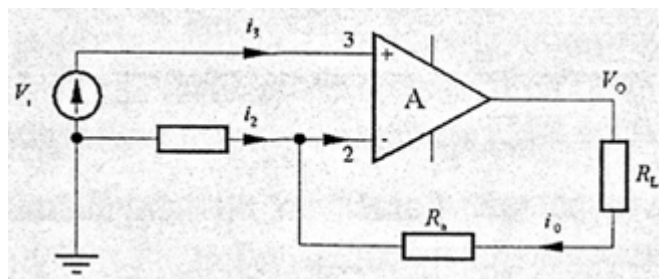
Obzirom na zaštitu od smetnji, i kod prenosa strujnog i kod prenosa naponskog signala, preporučuje se upotreba oklopljenih kablova u težim uslovima rada.

Praktičnih realizacija strujnog izvora na bazi poluprovodnika u tehničkoj praksi egzistira mnogo. Unutar svih mjernih pretvarača, transmitera, u njihovom adapterskom dijelu,



egzistira strujni izvor koji je upravljiv tj. njegov intenzitet direktno je proporcionalan sa intenzitetom procesne veličine.

Na slici 4.5 dat je jedan primjer jednostavnog strujnog izvora u vidu naponsko-strujnog konvertora.



Sl. 4.5 Naponsko-strujni konvertor

Nakon uvođenja svih pretpostavi koje važe za operacioni pojačavač A, tj. da je naponsko pojačanje pojačavača A,  $A_V \rightarrow \infty$ ,  $i_3 \rightarrow 0$ , ima se za struju opterećenja koja protiče kroz otpor opterećenja  $R_L$

$$I_0 = \frac{V_i}{R_a} = G_a V_i \quad (4.7)$$

Iz relacije (4.7) vidljivo je da ako je  $R_a = \text{const.}$ , struja opterećenja zavisi samo o  $V_i$  koji može biti modulisan nekom varijablom stanja  $p$ .

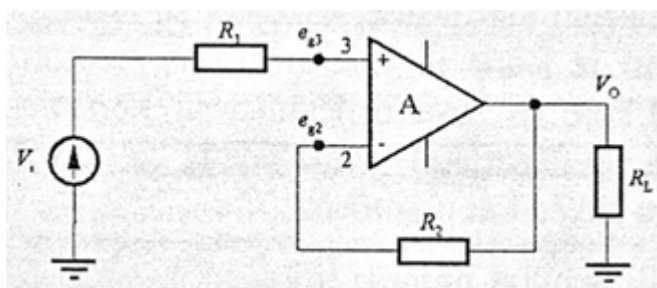
Tipična vrijednost impedanse opterećenja koju treba da savlada strujni izvor pri  $I_0 = 20 \text{ mA}$ , je do  $1000 \Omega$ . Pri tome, obično se, obzirom na tačnost, zahtjeva da unutrašnja impedansa strujnog izvora bude  $1\text{--}2 \text{ M}\Omega$ . Numerička ilustracija ove konstatacije je izložena u nastavku.

Data je impedansa opterećenja zajedno sa impedansom vodova od  $1 \text{ K}\Omega$ . Odrediti unutrašnju impedansu strujnog izvora  $Z_U$ , slika 4.3, tako da je tačnost s kojom se prenosi informacija do prijemnika  $0.1\% \text{ P.O.}$  Intenzitet strujnog izvora je  $0\text{--}20 \text{ mA}$ .

Na osnovu slike 4.3 je  $I_0 + I = J$ , tj.  $0,999J + 0,01J = J$ . S druge strane je  $I_0 R_L = I R_U$  odakle se ima da je

$$R_U = \frac{I_0}{I} R_L = \frac{0,999}{0,001} R_L = 999 R_L = 999 \text{ K}\Omega$$

Najjednostavniji način realizacije naponskog izvora korištenjem operacionog pojačavača dat je na slici 4.6.



Sl. 4.6 Naponski izvor

Uvodeći pretpostavke da je  $(V_i - e_3)/R_1 \approx 0$ ,  $(V_o - e_2)/R_2 \approx 0$  i  $(e_3 - e_2)A_V = V_o$ , ima se da je izlaz  $V_o$

$$V_0 = V_i \frac{A_V}{1 + A_V} \quad (4.8)$$

gdje je:  $A_V$  - naponsko pojačanje pojačavača A.

Ako  $A_V \rightarrow \infty$ , tada se ima da je  $V_0 = V_i$ .

Ulazna impedansa kola sa slike 4.6 data je izrazom

$$Z_{ir} = (1 + A_V)Z_i + Z_i - \frac{Z_0}{Z_0 + Z_L} Z_i \quad (4.9)$$

gdje je:

$Z_{ir}$  - ulazna impedansa kola sa slike 4.6,

$Z_i$ , - ulazna impedansa kola bez povratne grane,

$Z_0$  - izlazna impedansa operacionog pojačavača bez povratne grane,

$Z_L$  - impedansa opterećenja,

$A_V$  - naponsko pojačanje operacionog pojačavača .

Za savremene operacione pojačavače tipične vrijednosti su:

$$Z_i = (0,2-2)M\Omega, Z_0 < 50\Omega, A_V = (1-3)10^5 V/V, Z_{ir} = (1 + A_V)Z_i = (0,2-2)10^{11} \Omega.$$

Na sličan način, nakon određenih aproksimacija, za izlaznu impedansu kola sa slike 4.6 ima se

$$Z_{or} \approx \frac{1}{1 + A_V} Z_0 \approx (100 - 25)10^{-5} \Omega$$

što odgovara unutrašnjoj impedansi praktično idealnog naponskog izvora.

Kod rješavanja problema područja i opsega strujnog signala vođeno je, prije svega, računa o:

- snazi unificiranog signala koja je dovoljna za jednovremeno priključivanje više prijemnika (potrošača);  $I_{Omax}R_{Lmax} \leq U_{doz}$
- mogućnosti prenosa strujnog signala do 10 km udaljenosti; otpornost ove linije direktno utiče na maksimalnu vrijednost otpora opterećenja,  $R_{Lmax}$ ,
- $U_{doz}$  - maksimalno dozvoljenom naponu koji se javlja na impedansi opterećenja koji mora biti manji od 50 V u cilju bezopasnosti od dodirnog napona.

Takođe je vođeno računa i o intenzitetu povratne sprege u mjernim pretvaračima s kompenzacijom sile gdje se koristi konvertor struje (nosioca informacije) u silu. Tako dobivena sila povratne sprege poredi se sa silom koja je rezultat direktne konverzije mjerene varijable u silu. Pri tome, sila povratne sprege formira se putem elektromehaničkog konvertora sa permanentnim magnetom kao sprežnim elementom, koja je jednaka proizvodu  $BII_0N$ .

Kako su jačina magnetnog polja  $B$ , dužina namotaja  $l$  i broj namotaja  $N$  ograničeni, to je da bi se postigla odgovarajuća sila povratne sprege, struja  $I_0$  odabrana tako da bude maksimalno 20 mA, što je i kompromis da gubitak snage na potrošaču  $I_0^2 R_{Lmax}$  bude odgovarajući.

Na osnovu ovoga i ranijeg istorijskog kontinuiteta da je pneumatski signal bio 0,7-3,5 bara (opseg 5:1), odabran je standardni strujni signal u SAU (4-20) mA, što je sankcionisano i Publikacijom IEC 381 i JUS Standardom. Pri tome, opciono je uzet i signal (0-20) mA. Standardni naponski signal je (0-10) V, ili (-10 do +10) V. U elektroprivredi se susreću i drugi signali kao -5 mA do +5 mA ili -10 mA do +10 mA.

Signal (4-20) mA naziva se signal sa "živom" nulom, a signal (0-20) mA signal s pravom nulom. Mjerni pretvarači (4-20) mA svoju vezu s potrošačem ostvaruju putem dvostruke linije, a oni (0-20) mA putem trostruke linije.

### 4.3 PRENOS DIGITALNIH SIGNALA KROZ SAU

U cilju smanjenja greške u prenosu analognog signala, smanjenja uticaja smetnji i šuma na koristan signal (tj. odnos  $S/N$  - Signal Noise ratio), sve više se koristi prenošenje podataka u SAU u digitalnoj formi. Pojavom digitalnih distribuiranih SAU na bazi mikroprocesora i mikroracunara, ovo je postao isključivi zahtjev, obzirom da se obrada vrši na digitalnom nivou. Treba naglasiti, da ako se analogni signali prenose digitalno, prijemnik mora izvršiti ponovnu konverziju digitalnog signala u analogni. Pri tome, greška konverzije pretvara se u analogni šum, ali odnos signal/šum,  $S/N$ , postaje mjerljiv.

Proces kvantizacije analognog signala odvija se u dvije etape:

- uzimanje odbiraka analognog signala u vremenu,
- zamjena svakog odbirka najbližim brojem skupa diskretnih vrijednosti.

Učestalost uzimanja odbiraka u vremenu i kvantizacija odbiraka, zavise od frekventnog sadržaja analognog signala i tačnosti uzimanja odbiraka, tj. nivoa kvantovanja.

*DIGITALNI SIGNAL* je signal disrektizovan po vremenu i amplitudi čiji je informacioni parametar kodiran broj.

Pri tome diskretizacija ili kvantovanje signala je postupak pri kome se cijeli opseg veličine dijeli u konačan broj podopsega, a veličina unutar svakog podopsega predstavlja odgovarajućom vrijednošću koja se naziva kvantovana vrijednost.

Amplitudno-kvantovani signal je signal čiji je informacioni parametar kvantovan, odnosno signal koji je diskretizovan po amplitudi.

Binarni signali daleko su iznad nivoa šumova koji se javljaju u prenosnim linijama, pa je prenešeni digitalni signal neosjetljiv na drift ili grešku, sve dok binarni signali "1" i "0" nisu dovoljno prigušeni i izobličeni usljed dužine prenosnog puta da ih prijemnik ne raspoznaje. Dalje, neki bit-ovi namijenjeni su za kodiranje tj. provjeru svake primljene "riječi" ili broja, i kada se pojavi greška u prenosu, vrši se retransmisija.

Primjena digitalnih signala tj. digitalnog prenosa, omogućava kompatibilnost sistema upravljanja sa računarima na višem hijerarhijskom nivou, kao i lakšu implementaciju upravljačkih algoritama, te mnoge prednosti koje se imaju korištenjem operatorovog interface-a. Hijerarhijska funkcionalna struktura jednog SAU, bez obzira na topologiju, korištenjem digitalnih sistema može se veoma jednostavno realizirati, jer komunikacioni podsistem omogućuje povezivanje svih hijerarhijskih nivoa.

Osnovni zahtjevi koji se postavljaju pred sistem za prenos digitalnih signala (podataka) su:

- brzina prenosa podataka ili zahtjevani propusni opseg,
- dopuštena greška u prenosu podataka ili potreban kvalitet u prenosu podataka.

Brzina prenosa se obično definiše kao broj bita u jedinici vremena ili baud (bod) brzina.

*BAUD* je obično interval koji pripada podatku od jednog bita. U bit sinhronim sistemima, baud brzina je ravna bit brzini, tj. brzini izraženoj u bit/s.

Brzina prenosa odnosi se na maksimalnu dopustivu brzinu prenosa uz određenu grešku. Pri tome, specifikacija dopustive greške zavisi od aplikacije.

Prenos signala na veće udaljenosti vrši se u formi diskretnog signala, a tehnika prenosa može biti analogna ili digitalna.

### 4.3.1 Bazični principi modulacije

Komuniciranje je definisano kao proces u kojem se analogne ili digitalne poruke prenose nekim medijem iz jedne ili više tačaka u prostoru i vremenu, nazvane izvori, u druge tačke koje se zovu prijemnici ili korisnici. Efikasnost prenosa zahtijeva da informacija (poruka) proizvedena u izvoru bude procesirana (modulisana) prije nego što će biti prenešena.

Modulacija je proces ili rezultat procesa u kojem su neke od karakteristika talasa modifikovane u saglasnosti sa karakteristikom drugog talasa ili signala.

Projektovanje širokopropusne prenosne linije u funkciji je odziva na širok spektar frekvencija koje su sadržane u signalu nosioca informacije. Danas je ovaj opseg frekvenci praktično od 0 Hz do nekoliko GHz. Za potrebe distribuiranih sistema za upravljanje tehnoloških procesa reda je do 10-ak MHz. Prenosni mediji koji omogućuju prenos signala frekventnog opsega po segmentima ukupnog frekventnog područja, mogu biti: koaksijalni kabl, fiberoptički vodovi, radio talasa, talasovodi, tvinaksijalni kablovi, itd. Efektivna iskorištenost resursa prenosnog medija visoke frekventne propusnosti, zahtjeva pomjeraj frekvencije u drugo područje za prenos, i nakon prenosa, ponovo vraćanje na izvornu frekvenciju. Ovo se ostvaruje primjenom postupka modulacije kako je ranije, na početku ovoga dijela i definisano.

U principu neki signal može se prenositi na dva načina, [5]:

- direktno, bez bilo kakve modifikacije prenošenog, baznog signala, - tzv. baseband postupak prenosa,
- modulacijom signala koji se prenosi.

Tehnike modulacije signala mogu se podijeliti u dvije osnovne grupe, [10]:

- analogne,
- impulsno-digitalne.

#### 4.3.1.1 Analogne tehnike modulacije

1. *LINEARNA MODULACIJA* je prenos koji može biti predstavljen sa:

$$m(t) = k_1 s(t) c(t) \quad (4.10)$$

gdje je:

$m(t)$  - modulisani signal,  
 $s(t)$  - signal koji treba prenijeti,  
 $c(t)$  - nosilac,  
 $k_1$  - konstanta.

Nosilac  $c(t)$  definisan je kao

$$c(t) = a_c \cos(\omega_c t + \theta_c) \quad (4.11)$$

2. *AMPLITUDNA MODULACIJA* je proces koji može biti predstavljen sa:

$$m(t) = a(t) \cos \omega_c t \quad (4.12)$$

gdje je:  $a(t) = a_0 + s(t)$ ,  $s(t) \geq -a_0$

Ako se uzme da je

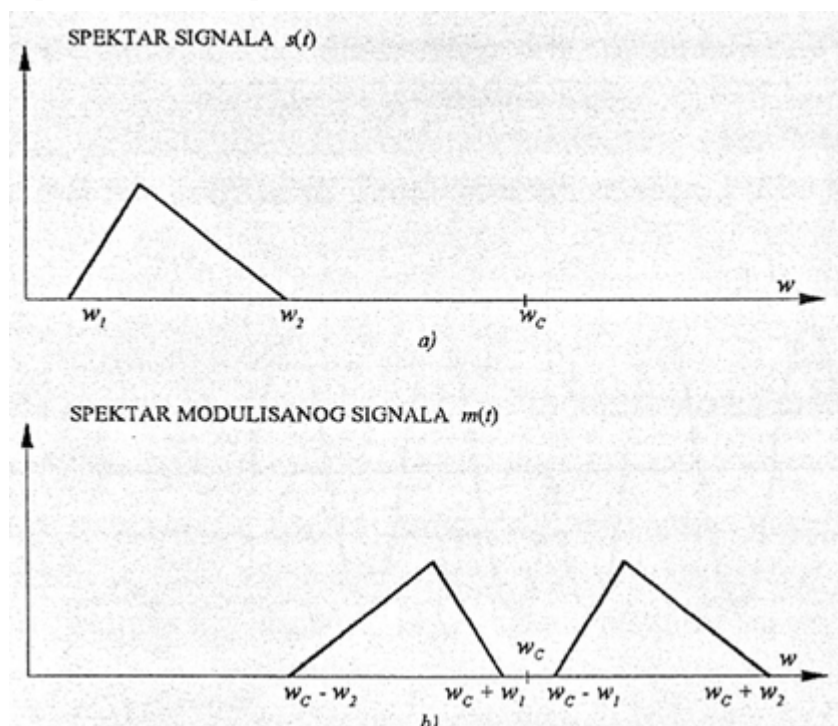
$$s(t) = s_0 \cos w_s t \quad (4.13)$$

tada se za modulirani signal  $m(t)$  ima

$$m(t) = a_0 \cos w_c t + \frac{ka_0}{2} \cos(w_c - w_s)t - \frac{ka_0}{2} \cos(w_c + w_s)t \quad (4.14)$$

gdje je:  $k = \frac{s_0}{a_0}$  - faktor modulacije,  $0 < k < 1$ .

Frekventni spektar realnog amplitudno-moduliranog signala dat je na si. 4.7, [10].



Sl. 4.7 Frekventni spektar: (a) signala  $s(t)$ , (b) moduliranog signala  $m(t)$

Propusni opseg zahtjevan za prenos amplitudno moduliranog vala je dva puta veći od najveće frekvence moduliranog signala, tj.  $w_B = w_c + w_s - (w_c - w_s) = 2w_s$ .

Nedostatak amplitudne modulacije je što se razni šumovi superponiraju na amplitudu signala pa je teško razlikovati željeni od neželjenog signala.

3. **FREKVENTNA MODULACIJA (FM)** je proces u kome se vremenski izvod faze moduliranog signala mijenja linearno sa signalom

$$\Phi'(t) = \frac{d\Phi}{dt} = w_c + ks(t) \quad (4.15)$$

ili

$$\Phi(t) = w_c t + k \int_{t_0}^t s(t) dt \quad (4.16)$$

Obično je amplituda nosioca konstantna pa se za modulirani signal ima

$$m(t) = a_c \cos[w_c t + k \int_{t_0}^t s(t) dt]$$

Minimalni propusni opseg  $f_B$  koji se zahtijeva za prenos frekventno modulisanog signala je na osnovi Carson-ovog pravila, [10]

$$f_B = 2(f_s + \Delta f) \quad (4.17)$$

gdje je:  $\Delta f$  - peak frekventne devijacije.

4. *FAZNA MODULACIJA (PM)* definisana je kao proces kod kojeg je

$$m(t) = a_c \cos[w_c t + k s(t)] \quad (4.18)$$

Modulacione tehnike (1) - (4) bazirane su na činjenici da signal nosioc ne iščezava u vremenu.

Drugu grupu tehnika modulacije čine one tehnike kod kojih signal nosilac u određenim intervalima vremena iščezava; to su impulsno-digitalne metode.

#### 4.3.1.2 Impulsno-digitalne tehnike modulacije

1. *IMPULSNO-AMPLITUDNA MODULACIJA (PULSE AMPLITUDE MODULATION -PAM)* je proces u kojem je amplituda prenešenog impulsa srazmjerna signalu.

2. *IMPULSNO-POZICIONA MODULACIJA (PULSE POSITION MODULATION -PPM)* je proces u kojem je vrijeme pojave prenošenog impulsa od nekog fiksnog trenutku srazmjerno signalu.

3. *IMPULSNO-ŠIRINSKA MODULACIJA (PULSE DURATION MODULATION -PDM)* je proces u kojem je trajanje impulsa srazmjerno nivou signala.

4. *IMPULSNO-KODNA MODULACIJA (PULSE CODE MODULATION -PCM)* je proces koji je baziran na digitalizaciji odbiraka signala i njihovom slanju u vidu rezultirajućih diskretnih brojeva kao telegrafskih signala. Tačnost sa kojom su uzimani uzorci signala zavisi od njegovog frekventnog sadržaja. Greška učinjena predstavljanjem odbiraka najbližim diskretnim brojem, naziva se šum kvantizacije koji se pojavljuje na kraju prenosnog kanala.

Odnos signal/šum kod PCM modulacije je

$$\frac{S}{N} = \frac{3}{2} 4^{f_p / k f_s} \quad (4.19)$$

gdje je:  $f_s$  - frekventni sadržaj signala koji treba prenijeti,  
 $f_s - k m f_s$ ,  $m$  - broj binarnih impulsa da se predstavi signal,  $1 < k < 2$ .

Sa aspekta signal/šum PCM modulacija je povoljnija od FM modulacije jer je S/N manji kod FM nego kod PCM modulacije.

Propusni opseg za PCM signal zavisi od frekventnog opsega prenošenog signala (definisano je teoremom o uzorkovanju) i broju binarnih cifara upotrebljenih da se predstavi odbirak signala; ovo je samo bitno za prijemnik da ovaj bude u stanju da "razlikuje" logičku "0" i

logičku "1". Ako je frekvencijski sadržaj signala  $f_s[Hz]$ , minimalna frekvencija uzimanja odbiraka je  $2f_s$ . Ako su uzorci predstavljeni sa  $n$ -cifarskim kodom, onda je propusni opseg zahtjevan za prenos PCM signala, [11],

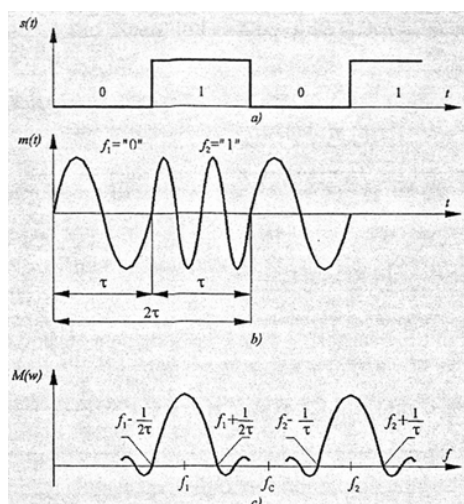
$$f_B = (2f_s x n) / 2 \quad (4.20)$$

Za prenos digitalnih signala koriste se, u osnovi, sljedeće dvije metode modulacije.

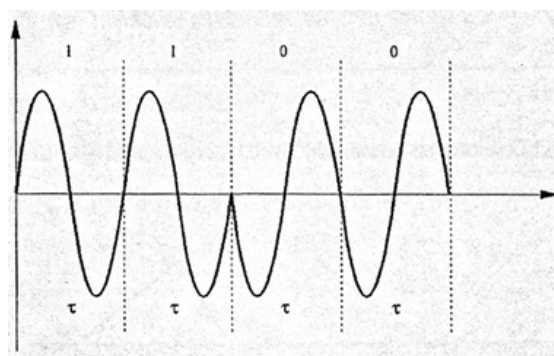
5. **TONSKA MODULACIJA (FREQUENCY SHIFT KEYING - FSK)** je proces u kojem logičkoj "1" u trajanju te logičke jedinice odgovara sinusni signal jedne frekvence, npr.  $f_2 \equiv "1"$ , a logičkoj "0" odgovara sinusni signal frekvence  $f_1 \equiv "0"$ . Pri tome  $f_2 \neq f_1$  slika 4.8.

FSK modulacija omogućava da je S/N relativno povoljan, što kvalifikuje ovaj način prenosa u sredinama sa prisustvom šuma.

6. **FAZNA MODULACIJA (PHASE SHIFT KEYING - PSK)** - PSK modulacija je proces u kojem se binarna jedinica predstavlja sinusoidom sa faznim pomakom od  $0^\circ$ , a binarna nula sinusoidom sa faznim pomakom od  $180^\circ$ , slika 4.9, [12].



Sl. 4.8 FSK modulacija; (a) - vremenski domen digitalnog signala, (b) - modulirani signal, (c) - amplitudno-frekventna karakteristika moduliranog signala



Sl. 4.9 PSK modulacija

### 4.3.2 Kodiranje signala

U toku prenosa informacije nemoguće je izbjeći uvođenje u prenosni kanal (liniju) razne vrste šumova (smetnji), bilo da se radi o električnim kablovima, radio putevima, optičkim

vezama, itd. Nivo šuma utisnut u prenosnu liniju može biti toliki da ozbiljno ugrozi prenos signala. Postoji mnogo načina da se utiče na promjenu signala da ovaj bude podesan za prenos kanalom u kojem se pojavljuje šum. Najjednostavniji način je povećanje snage izvora signala. Ovaj način je neekonomičan i ograničen nivoom izvora snage.

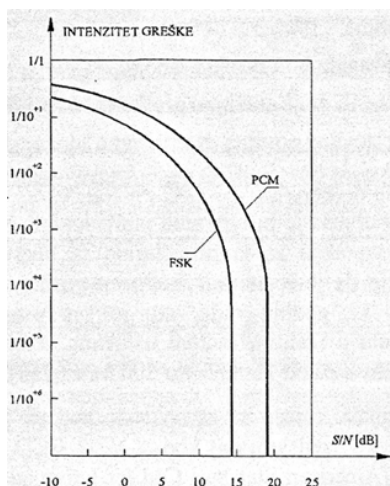
Koja će tehnika prenosa da bude primijenjena, zavisi prije svega od signala, ali i od primjene tj. uređaja ili SAU. Svaki sistem ima sopstvene probleme i zahtjeve kao što su: tačnost, pouzdanost, propusni opseg komunikacionih kanala, itd. Ovo je naročito važno kod telemetrijskih sistema, digitalnih distribuiranih sistema upravljanja tehnološkim procesima, integrisanim sistemima za upravljanje i zaštitu elektroenergetskih sistema, integrisanim sistemima upravljanja savremenim borbenim avionima, itd.

Kod razmatranja tipova modulacije, za svaki tip rečeno je šta je informacioni parametar. Takođe rečeno je, da različiti tipovi modulisanog signala imaju različite nivoe šumova, tj. odnos S/N.

Proces amplitudne modulacije (AM) proizvodi frekventne komponente sa svake strane noseće frekvencije, tako da je frekventni opseg modulisanog signala dva puta veći od frekvencije prenošenog signala. Ako takav modulisani signal prolazi kroz kanal, na kraju kanala u prijemniku, nakon demodulacije i filtracije, dobija se izobličeni signal što zavisi od superponiranog šuma. Jednostavno, amplituda šuma dodaje se na amplitudu prenošenog signala, a stepen uticaja šuma na koristan signal defmisan je odnosom S/N.

Kod PCM koristan signal je odabiran (samplovan), kvantiziran i kodiran. Rezultat ovog procesa je pojava kvantizacionog šuma, koji je direktna greška prenosa. Za ilustraciju, neka je signal u opsegu 0-31 V, i neka se odbirak signala uzima u trenutku kada je vrijednost signala 25,29 V. Neka je korišteno 5-cifarsko kodiranje tako da imamo  $2^5 = 32$  nivoa koji su jednostavno opisani sa ovim kodom, a svakom broju odgovara nivo od 1 V. Odbirak od 25,29 V, predstavljen najbližim nivoom je 25 V; broj 25 predstavljen u binarnoj formi je 11001, tj.  $2^4 + 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 2^0$ . Međutim, greška uvedena kvantizacijom je 0,29 V i ona se naziva kvantizaciona greška ili kvantizacioni šum.

Zahtjevani propusni opseg kod procesa PCM zavisi od propusnog opsega prenošenog signala (teorema o odabiranju) i od broja binarnih cifara upotrebljenih da se predstavi odbirak signala. Odatle, smanjenje kvantizacionog šuma, uslovljava povećanje propusnog opsega kanala. Da bi npr. PCM signal bio primljen bez greške, prijemnik mora da razlikuje logičku "0" i logičku "1". Zavisnost intenziteta greške u funkciji S/N za PCM data je na slici 4.10.



Sl. 4.10 Zavisnost intenziteta greške od S/N



Polazeći od toga da distribuirani sistem za upravljanje tehnoloških procesa upravlja velikim količinama energije i materijala, bitno je da praktično nema greške u prenosu signala. Konsekventno tome, primarni zahtjevi koji se u tom slučaju postavljaju su: sigurnost prenosa poruka unutar SAU, otpornost na smetnje koje dolaze iz okoline i adekvatno prezentiranje poruka operatoru.

Moguća je, međutim, obrada digitalnih signala tako da prijemnik signala indicira pojavu greške u signalu, ili njenu detekciju, i da je koriguje. Mogućnost detekcije i korigovanja greške u komunikacionom podsistemu SAU, može biti ostvarena odgovarajućom obradom prenošenog signala (informacije) koja se naziva kodiranje.

*KODIRANJE* je obrada informacije dodavanjem redundantne informacije signalu koja se dodaje binarnim ciframa koje opisuju iznos nivoa uzorka signala.

Najjednostavniji metod detekcije greške u prenosu je ponavljanje prenosa svakog kodiranog odbirka i upoređivanje primljenih odbiraka.

Postoje razne vrste kodova za detekciju greške kao što je: Tri-redundantni bit 8-4-2-1 kod, 31,26 BCH (Bose Chaudhuri - Hocquenghem) kod, gdje se 26 bita koristi za upravljanje podatkom i predstavljanje podatka, a 5 bita za provjeru tačnosti (pouzdanosti) prenosa, itd.

Ovaj kod ima sljedeće osobine:

- sve greške od pet ili manje bita detektovane su,
- sve kombinacije jedne ili dvije slučajne greške detektovane su,
- sve jednostruke invertovane poruke, detektovane su,
- 98% šest bitnih grešaka i 95% svih drugih grešaka, detektovne su.

Efikasnost ovoga koda dopunjena je provjerama individualnih bita, brojanjem bita, i nadgledanjem totalnog vremena za komuniciranje sa bilo kojom opremom u sistemu. Ukupni rezultat je da je reduciran intenzitet greške na nivou bolji od 1 nedetektovane greške za 12 godina rada, što je sve pokazano teorijskim i ekperimentalnim rezultatima u realnim radnim uslovima. Testiranje je vršeno pri jačini polja od 30 V/m frekvencije od 20 KHz do 500MHz.

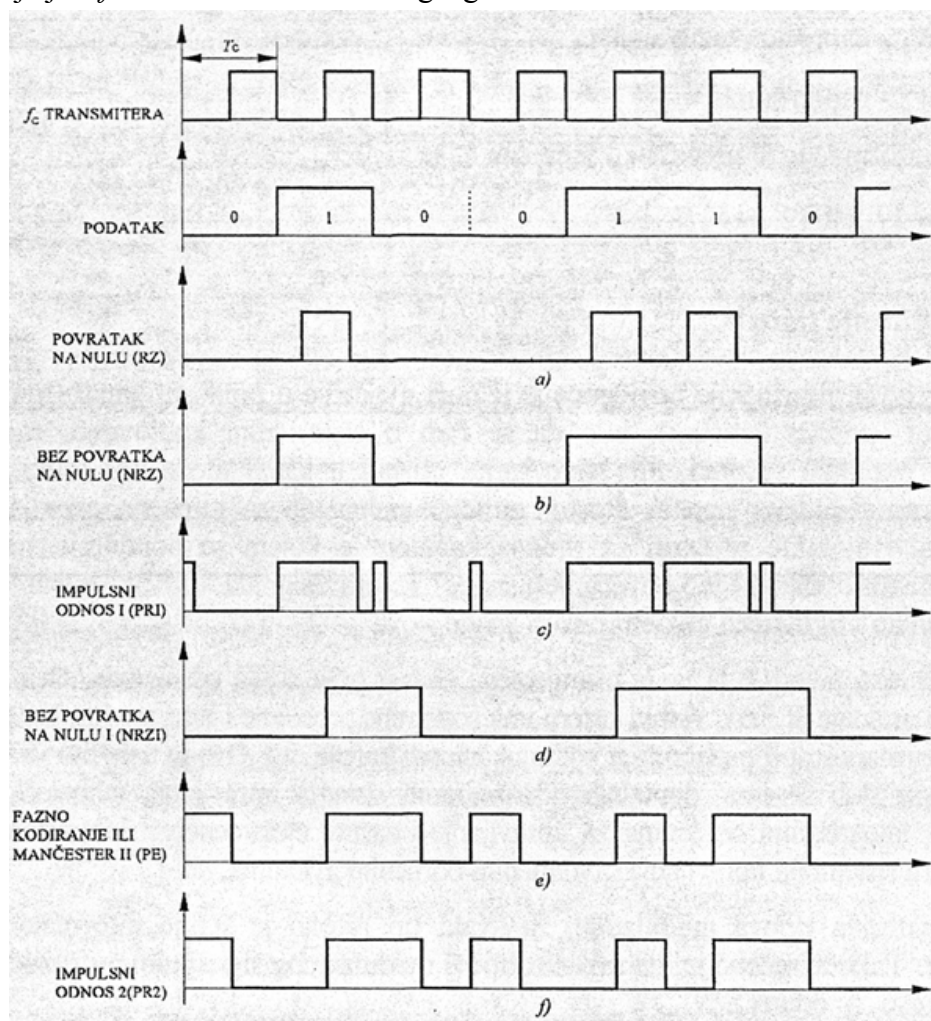
Za kodiranje digitalnih signala koriste se razne vrste kodova kao što su: oktalni, normalni binarni kod, Gray-ov (reflektovani) kod, 8-4-2-1 BCD (BINARY CODED DECIMAL), BCD ASCII (American Standard Cod for Information Interchange) kod, koji definiše binarne ekvivalente slovnih simbola i brojeva.

Popularni formati kodiranja impulsno modulisanih signala dati su na slici 4.11. Svi su pogodni za asinhroni rad. Pod asinhronim radom podrazumijeva se prenos signala kada elementi računarskog sistema ili sistem ne rade istovremeno ili u prethodno određenim intervalima.

Format kodiranja *POVRATAK NA NULU (RZ) (RETURN-TO-ZERO)*, proizvodi impulse za svaku logičku "1" impulsa podatka. Ovo je zadovoljavajuće kodiranje za daljinski prenos (npr. izlaz iz naponsko-frekventnog, V/F, konvertora), ali budući da nije efikasna i jednostavna sinhronizacija, rijetko se koristi u prenosu podataka. Ako je logička "1" predstavljena naponskim impulsom amplitude A, a logička "0" naponskim impulsom - A, tada je normalizirani spektar snage na otporu od 1Q slučajnog NRZ podatka, [10]

$$S(f) = A^2 \frac{T_c^2}{4} \left[ \frac{\sin \pi \frac{T_c^2}{2}}{\frac{T_c}{2} f} \right] \quad (4.24)$$

gdje je:  $f$ - frekvencija kontinualnog signala.



Sl. 4.11 Digitalno kodirani impulsni formati

Poredeći RZ i NRZ kodiranje, nedostatak RZ kodiranja je da tako kodirani signali zahtjevaju dvostruko veći propusni opseg nego što se to zahtjeva kod NRZ i signala, [10].

Kod kodiranja NRZ1, linija (d), u periodu logičke "1" vrši se invertovanje. Ovaj metod koristi se kod kodiranja svakog kanala u štampačima za velike računarske instalacije, jer omogućuje veliku brzinu prenosa podataka.

Kodiranje nazvano *MANCHESTER II*, linija (e), primjenjuje smjer prelaza prenošenog impulsa u centar impulsa transmitera (clock-a) da se indicira logičko stanje. Logička "0" i "1" odgovaraju silaznom i ulaznom prelazu, vidjeti liniju (e), respektivno.

Prenos podataka u početku perioda  $T_c$  ignoriše se za vrijeme dekodiranja, i podatak ne mijenja znak ("0" je slijedena sa "0" i "1" sa "1"). Prednosti ovakvog kodiranja su da je neophodan manji propusni opseg i veća brzina prenosa.

Kod kodiranja *IMPULSNI ODNOS 2*, prikazanje u liniji (f).

Bolji metod kodiranja je *IMPULSNI ODNOS 1 (PRI)*, linija (c), koji prenosi suženi impuls, npr. trajanje četvrtine perioda  $T_c=1/f_c$  transmitterskog impulsa za logičke "0" i tri četvrtine perioda  $T_c$  za logičku "1". Hardware koji omogućuju ovo kodiranje, relativno je jednostavan.

Kodiranje *BEZ POVRATKA NA NULU (NRZ)* je u stvari takvo da je preneseni podatak isti ulaznom podatku. Prelaz se vrši poslije svakog bita podatka, a širina impulsa logičke "1" i "0" se razlikuje (logička "1" dva puta je šira od logičke "0").

U distribuiranim sistemima za upravljanje tehnološkim procesima, jedna od najboljih metoda za prenos signala unutar sistema je na bazi FSK, gdje se logička "0" predstavlja sinusnim valom frekvence 11 MHz, a logička "1" sinusnim valom frekvence 13 MHz, vidjeti sliku 4.8. Ovaj metod modulacije ima značajnu prednost nad MANCHESTER II kodom koji leži u frekventnom spektru industrijskih šumova, [15].

## 4.4 STANDARDNI INTERFACE SISTEMI

### 4.4.1 Opšta razmatranja

*INTERFACE* je skup hardware-skih i software-skih modula upotrebljen za fleksibilno povezivanje postrojenja, procesa, objekta ili instrumenta, itd. sa digitalnim računarom.

Pod interface-om u računarski baziranim sistemima podrazumijeva se koncept koji uključuje specifikacije za spajanje dva različita uređaja ili opreme, koji imaju različite ili slične funkcije.

Ovaj odjeljak daje sistemski pogled na povezivanje svih elemenata i dijelova SAU, sugerišući standardne sisteme koji se danas koriste.

Proces tj. davači/transduceri, mjerni pretvarači, generišu signale, koji postaju ulazi u digitalni računar ili upravljačku strukturu. Proces takođe prima izlazne signale iz upravljačke strukture koji komanduju aktuatorima/izvršnim organima.

Ulazno-izlazni signali u SAU mogu biti analogni (neprekidni ili diskretni) ili digitalni (neprekidni ili impulsni). Ovi signali procesirani su ekstenzivno prije nego što stignu u ili napuste digitalni računar tj. upravljačku strukturu (njihovu ulazno-izlaznu-U/I strukturu). Pri tome neka od procesiranja su:

- prilagođavanje ili terminacija signala - standardni signal,
- zaštita procesa ili SAU - razne barijere,
- statičko kondicioniranje signala - dovođenje na standardne nivoe,
- dinamičko kondicioniranje signala - filtriranje,
- manipulacija signala - linearizacije, nelinearizacija, itd,

i ona se odvija u interface-u između procesa i upravljačke strukture ili digitalnog računara. Detaljno o ovim procesiranjima, biće govoreno kasnije u drugim poglavljima ove knjige. Imajući ovo u vidu interface je tačka(e) u sistemu gdje su signali pripremljeni na takav način da prijemni elementi raspoznaju njihov ulazni format.

### 4.4.2 Standardni interface sistemi

Potreba za standardnim metodama povezivanje egzistira samo kao sredstvo da projektantima sistema uštedi vrijeme.

Svaki novi interface uključuje odgovarajuće strukture prekida, tajming podataka, fizičko spajanje, naponske nivoe i programiranje. U ovom odjeljku, u najkraćim crtama daje se pregled i opis nekih najvažnijih standardnih interface-a.

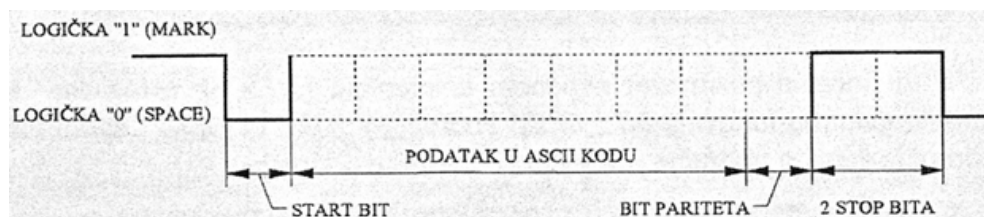
#### 4.4.2.1 RS 232

Za eksterno povezivanje CRT (Cathode Ray Tube), terminala, štampača i modema sa računarski baziranim sistemima, koristi se uglavnom ovaj standard. Definiše serijski prenos signala (podataka) na rastojanjima do 15 m. Danas nema računara na tržištu koji ne nudi neku mogućnost upotrebe opreme, koja je bazirana na standardnom interface-u RS 232C, preko kojeg se priključuju printer, CRT, kasete i drugi "spori periferali". Prvi put ovaj standard kada je preporučen od strane firme EIA, RS je značilo -PREPORUČENI STANDARD (RECOMENDATION STANDARD, C je oznaka za treću verziju), bio je namijenjen za vezivanje računara na modem.

MODEM (MODulator/DEModulator) je uređaj koji konvertuje digitalne signale u signal nosioc i obrnuto. Upotrebljava se da prenese digitalni podatak telefonskom linijom. Za svoj rad koristi uglavnom princip FSK modulacije.

Standard za RS232 definiše 20 signala, mada je rijetko u upotrebi svih 20. Standardna oprema koristi 13 signala. Najjednostavniji spoj ostvaruje se sa tri provodnika: SIGNAL GROUND (REFERENTNI SIGNAL) SEND DATA (SLANJE PODATAKA), RECEIVE DATA (PRIJEM PODATAKA). Prenos podataka je serijski binarni.

Format prenošenog podataka pomoću RS-232 interface-a prikazan je na slici 4.12.



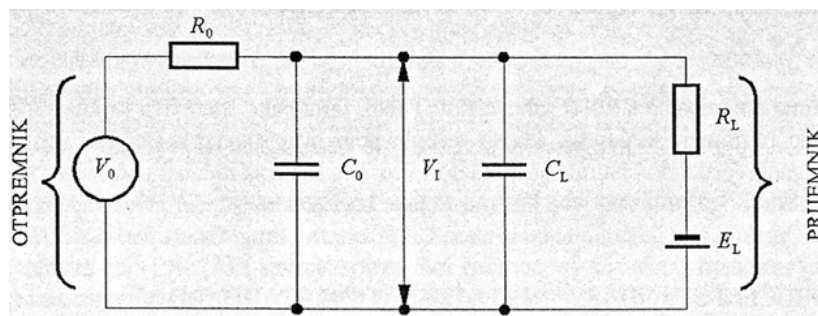
Sl. 4.12 Serijski prenos podataka u ASCII kodu

Početak prenosa podataka signalizirane prelaskom na stanje "0" ili SPACE uslov. Podatak u ASCII kodu prenosi se startovanjem prenosa sa LSB (bitom najmanjeg značenja), a završava prenosom bita pariteta. U stvari, podatak može imati 5-8 bita plus jedan bit pariteta. Dva stop bita koriste se neposredno prije starta novog podatka za prenos.

Osnovni parametri koje definiše RS-232C su:

- brzina prenosa podataka,
- udaljenost prenosa,
- ekvivalentno električno kolo,
- električne karakteristike.

Ekvivalentno električno kolo definisano je na slici 4.13, [17].



Sl. 4.13 Ekvivalentno električno kolo prema RS-232

Osnovne karakteristike kruga sa slike 4.13 su:

- napon otpremnika  $V_o \leq 25 V$ ,
- struja kratkog spoja  $\leq 0.5A$ ,
- impedansa opterećenja,  $R_L \leq 3000 \Omega$ ,
- $V_I \in [5, 15V]$  pri  $E_L = 0 V$  i  $R_L \leq 3000 \Omega$ ,
- $C_L$  (uključujući i kapacitet prenosne linije),  $\leq 2500 pF$ ,
- $R_O < 300 \Omega$ .

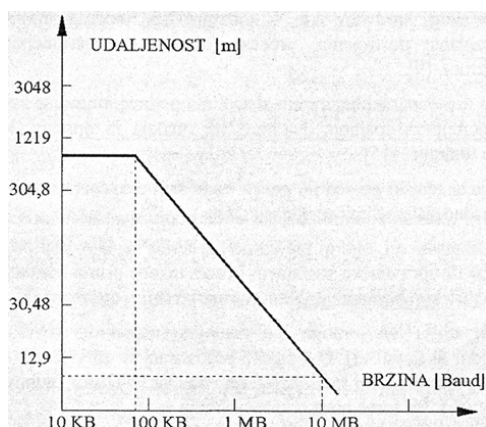
Logička "0" definisana pozitivnim naponom u intervalu  $[5, 15 V]$ , a logička "1" negativnim naponom u intervalu  $[-15, -5 V]$ . Područja  $[-5, -3 V]$  i  $[3, 5 V]$  definisana su kao područja šuma a područje  $[-3, 3 V]$  kao prelazno područje, [17].

Osnovni zahtjevi koji se postavljaju pred RS-232 interface su: obezbjeđenje minimalnih napona otpremnika saglasno nivoima defnisanim na slici 4.13, kapacitet prenosne linije, i definisanje referentne tačke u odnosu na koju se mjeri napon  $V_I$ , (obično je to tačka prijemnika).

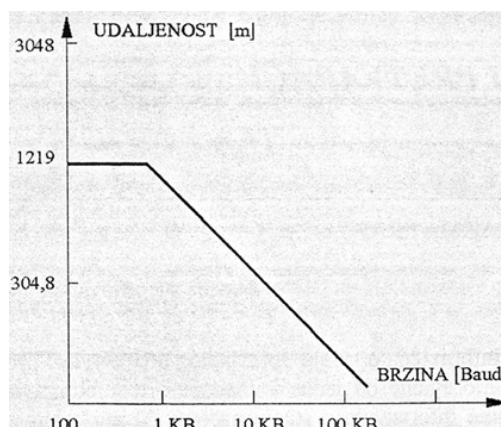
#### 4.4.2.2 RS-422/RS-423 INTERFACE-I

Godine 1977 EAI uveo je nove standardne interface-e RS-422 i RS-423 kao zamjenu za RS-232, sa veoma izmjenjenim karakteristikama, ali praktično istim rasporedom pinova na konektoru kao kod RS-232C (koristi se standardni 25-pinski konektor).

Na slici 4.14 data je distanca prenosa u funkciji brzine prenosa za interface RS-422. Dijagram je dobiven snimanjem na dvostrukom telefonskom kablju ( $\Phi 0,50 mm$ ) sa opterećenjem na kraju kabla od  $100 \Omega$ . Granična brzina je negdje oko  $90 kBaud-a$ , a za udaljenost od oko  $1200 m$ , a  $10 MBaud-a$  se može postići na udaljenosti od  $12 m$ .



Sl. 4.14 Udaljenost u funkciji brzine prenosa za RS-422



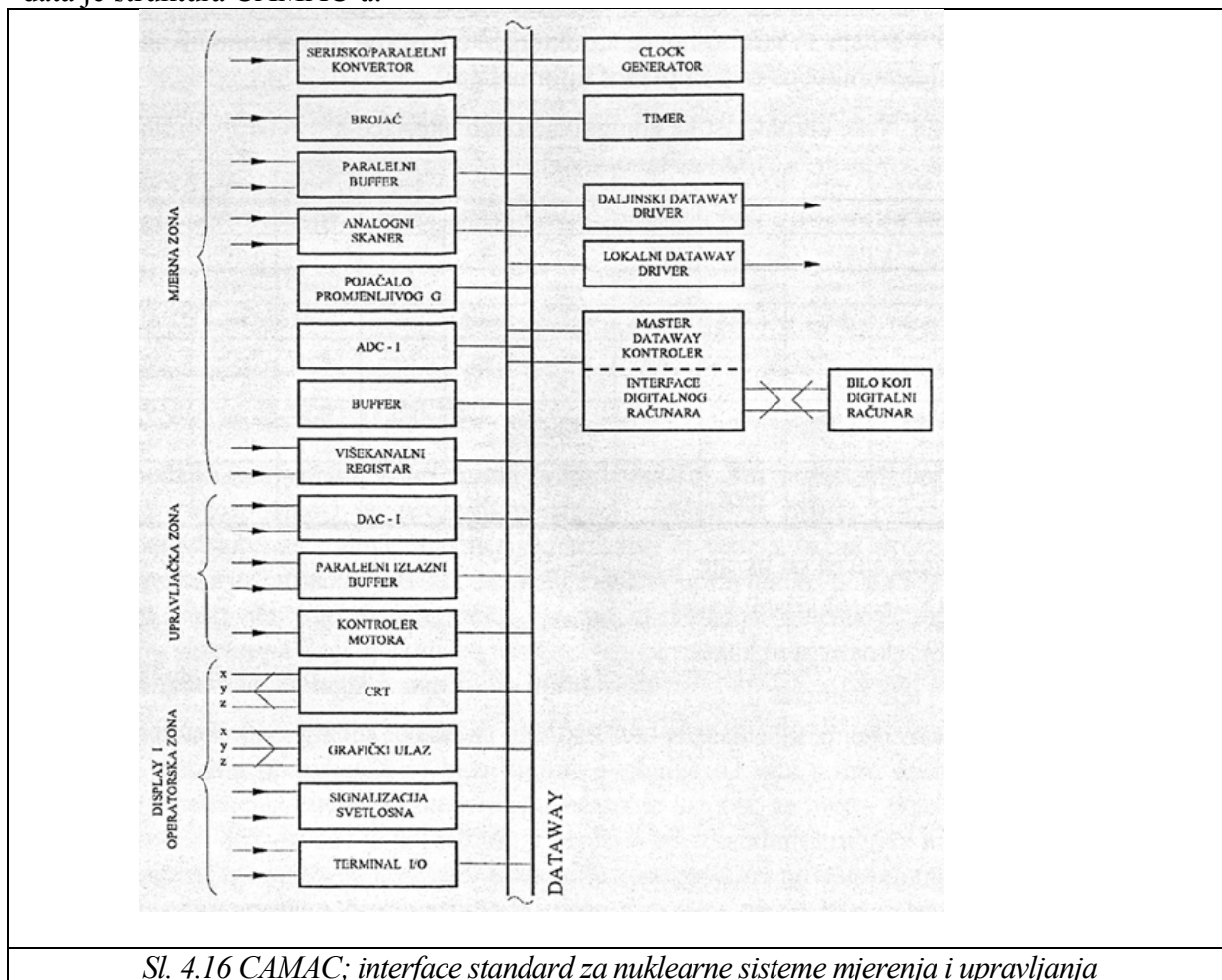
Sl. 4.15 Udaljenost u funkciji brzine prenosa za RS-423

Na slici 4.15 data je dužina prenosnog puta u funkciji brzine prenosa.

Nedostatak RS-422 interface-a dolazi do izražaja kod multi-drop primjene gdje se spaja više predajnika na zajedničku sabirnicu (bus). U tom slučaju, aktivan je samo jedan transmieter dok su ostali u visokoimpedantnom stanju, ne opterećuju sabirnicu. RS-422 interface ne obezbjeđuje zaštitu predajnika od oštećenja u slučaju istovremenog spajanja više predajnika.

### 4.4.2.3 CAMAC (IEEE 583)

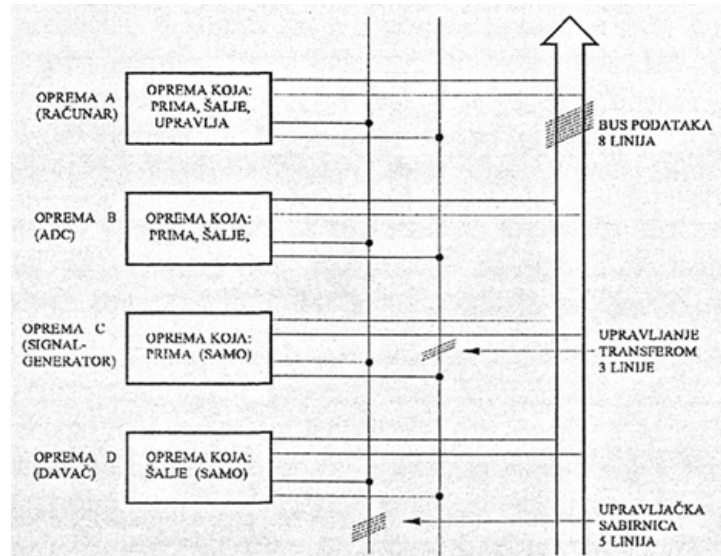
CAMAC (THE COMPUTER AUTOMATED MEASUREMENT AND CONTROL) interface standard konstituisan je oko 1964. godine za potrebe u nuklearnoj tehnici i za primjene u nuklearnim laboratorijama i postrojenjima, [9]. CAMAC je paralelni interface sistem (24 bita) koji koristi 86-žične kablove. Digitalni računar komunicira preko bus-a podataka (dataway) korištenjem posebnog modula. Maksimalna brzina koja se postiže je do 5 *Mbit/s*. Programska podrška bazirana je na FORTRANU. Interface ima 5 adresnih linija, 3 kontrolne linije, 5 komandnih linija, 4 linije za status i 2 sinhronizacione linije. Na slici 4.16 data je struktura CAMAC-a.



Sl. 4.16 CAMAC; interface standard za nuklearne sisteme mjerenja i upravljanja

### 4.4.2.4 IEEE 488-1975 INSTRUMENTACIONI BUS

Ovaj standard razvijen je u Hewlett-Packard-u (1972-1974) kao standard alternativan GPIB standardu (GENERAL PURPOSE INTERFACE BUS). Maksimalna dužina je 20 m, brzina do 500 *kbytes/s*, mogućnost priključenja do 15 instrumenata. Bus sadrži 16 linija (8 za podatak, 3 za handshaking i 5 za kontrolu). Komuniciranje između opreme na ovom bus-u mora biti u stanju da obavi najmanje sljedeće tri funkcije: da prima (LISTENER), da šalje (TALKER) i da kontroliše (CONTROLLER). Očito je da neka od opreme može kombinovati ove funkcije; npr. ADC prima i šalje podatak. Slika 4.17 predstavlja generalnu strukturu GPIB, [9].



SI. 4.17 IEEE 802 (488) / "GPIB"

U TABELI 4.1 daju se neke osnovne karakteristike fizičkog nivoa komunikacionih interface-a (eksternih bus-ova za prenos informacija).

TABELA 4.1 Neke karakteristike komunikacionih interface-a

|                              | IEE-438     | CAMAC             | RS-232                         | RS-422          | RS-423           | RS-449     | TTY       | TWAX       | COAX       | NAPOMENA |
|------------------------------|-------------|-------------------|--------------------------------|-----------------|------------------|------------|-----------|------------|------------|----------|
| FORMAT                       | PARALELNI   | PARALELNI         | SERUSKI                        | SERUSKI         | SERUSKI          | SERUSKI    | SERUSKI   | SERUSKI    | SERUSKI    |          |
| VODIČI (BR)                  | 24          | 86                | 25                             | 25              | 25               | 37         | 6         | 2          | 2          |          |
| TIPIČNA BRZINA               | <100K bps/s | <1M bps/s         | <9600 Baud                     | <100K Baud      | <1000 Baud       | >100K Baud | 110 Baud  | <9600 Baud | 1,5MB Baud |          |
| MAX. BRZINA                  | 7M bps/s    | 5M bps/s          | 200K Baud                      | 10K Baud        | 100K Baud        | 2M Baud    | 4,8K Baud | 500K Baud  | <5M Baud   |          |
| TIPIČNA DOSTANCA PREENOSA    | <5m         | <100m             | <3,5m                          | 1200m           | 1200m            | 3,5m       | 300m      | <1600m     | <1600m     |          |
| MAKSIMALNA DOSTANCA PREENOSA | 20M         | 1700m (500K) Baud | 15m                            | 12m* (10K) Baud | 12m* (100K) Baud | 15m        | 300m      | 10m        | 3km        |          |
| TIPIČAN SIGNAL               | TTL         | NRZ               | Bipolarni (naponski) (strujni) | UNIPOLARNI      | UNIPOLARNI       | BIPOLARNI  | STRUJNI   | NRZ (PSK)  | PSK, PSK   |          |

- Distanca zavisi od brzine
- TWAX - tvinakxijalni kabel
- COAX - koaksijalni kabel
- TTY - tele štampač

## 5. MJERNI PRETVARAČI

### 5.1 UVODNA RAZMATRANJA

U osnovi dobijanja informacija o stanju upravljanog procesa, leži proces mjerenja, koji sadrži prenos informacije od jedne komponente u mjernom nizu do druge komponente. Pri, tome informacija o stanju procesa ne može biti prenošena bez prenosa i utroška energije. Utrošak energije ili snage koji se uzima iz izvora informacije u procesu mjerenja, mora biti zanemarljiv u odnosu na raspoloživu ukupnu energiju ili snagu kojom se raspolaže u tački mjerenja. Energija utrošena u procesu mjerenja javlja se kao smetnja. U procesu mjerenja temperature, energija koja se troši, zanemarljiva je, dok energija koja se troši kod mjerenja protoka na bazi pada pritiska, predstavlja čist gubitak u sistemu.

Da bi u nekom sistemu došlo do transformacije energije ili njenog prenosa, koji obično prate svako dobivanje informacije (mjerene), neophodno je ostvariti promjenu koordinate stanja objekta, jer bez te promjene nema ni promjene energije. Obično, u dinamičkim sistemima, promjena energije definisana je kao proizvod dviju generalisanih koordinata koje idu zajedno, spretno. Evo nekoliko primjera izraza za energiju kod nekih vidova kretanja:

|                                 |                        |
|---------------------------------|------------------------|
| MEHANIČKO TRANSLATORNO KRETANJE | <i>SILA x BRZINA</i>   |
| MEHANIČKO ROTACIONO KRETANJE    | SILA x UGAONA BRZINA   |
| ELEKTRIČNO                      | NAPON x NAELEKTRISANJE |
| FLUIDNO                         | PRITISAK x PROTOK      |

Postoji nekoliko elementarnih operacija nad energijom:

1. *STORIRANJE. USKLADIŠTENJE*: energija je storirana bez gubitka.
2. *KONVERZIJA ILI TRANSFORMACIJA*: energija je konvertovana iz jedne forme u drugu uzorkujući pri tome povećanje jedne generalisane koordinate uz smanjenje druge generalisane koordinate. Konverzija može biti bilateralna, reverzibilna između jedne forme i druge, ili nepovratna, konvertujući ulaznu energiju u toplotnu.
3. *TRANSPORT, PRENOS*: energija se prenosi iz jednog mjesta u drugo bez storiranja ili transformacije između dva kraja prenosnog puta, ili se dijeli u tački grananja.
4. *IZVORI I UVORI* energije su uvijek akumulatori energije ili konvertori energije.
5. *UPRAVLJANJE ENERGIJE* je fizičko djelovanje na jednom kraju koje prouzrokuje (kontrolise) protok energije na drugom kraju.

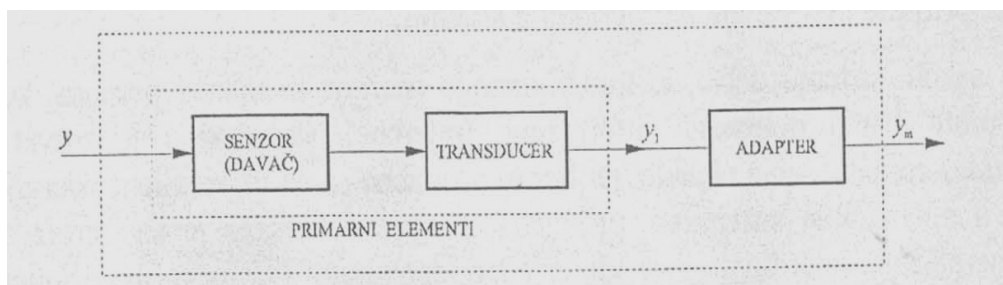
Uzimajući u obzir operaciju pod (2), nije moguće npr. pomjeraj bez sile čak i kada se govori o elektrostatičkom polju u kondenzatoru, gdje je taj pojeraj ekstremno mali, a nije jednak nuli.

Od dvije veličine (stanja) koje egzistiraju u tački mjerenja, jedna je nosilac informacije, a druga je prisutna radi fizičkih zakona. Veličina-nosilac informacije naziva se *PRIMARNA VELIČINA*, a koegzistirajuća (konjugovana) veličina naziva se *SEKUNDARNA VELIČINA*.



## 5.2 STRUKTURA MJERNIH PRETVARAČA

Svaki mjerni pretvarač može biti opisan i predstavljen kao skup funkcionalnih elemenata koji čine sistem. Jedna generalisana predstava mjernog pretvarača bez povratne sprege data je na slici 5.1, [12],



Sl. 5.1 Blok šema mjernog pretvarača bez povratne sprege

Fizikalna varijabla (varijabla stanja procesa ili objekta) može prenositi informaciju kroz izmjenu jedne ili više osobina kao što je amplituda, faza, frekvencija, itd. Fizikalna veličina ili posebna osobina koja treba da bude mjerena, a koja je ulaz u mjerni pretvarač,  $y$ , naziva se mjerena varijabla. Primarni element ili grupa elemenata prima energiju od mjerene varijable i proizvodi izlaz koji na neki način zavisi od mjerene varijable.

Senzori ili davači mogu imati neelektrični ulaz i izlaz, kao što je opruga, Bourdon-ova cijev, manometar, ..., ili oni mogu imati neelektrični ulaz a električni izlaz, itd. Veoma često će neelektrični signali (najčešće mehanički) biti konvertovani pomoću transducer-a u električne signale. Adapter ima zadatak, da takav signal,  $y_1$ , pretvori u odgovarajući standardni signal (analogni strujni) ili neki drugi signal pogodan za prenos na određenu udaljenost. Takav mjerni pretvarač naziva se i transmitter.

Zakon konverzije  $y$  u  $y_m$  obično je fundamentalan, i opisan je prvo funkcionalnim preslikavanjem

$$y_1 = f_1(y) \quad (5.1)$$

Operator preslikavanja  $y_1(\bullet)$  u sebi sadrži i domenzionalni koeficijent homogenizacije. Konverzija opisana relacijom (5.1) naziva se primarnom i bazira se na zakonu o održanju energije.

Adapter sa slike 5.1 konvertuje međukoordinatu  $y_1$  u unificirani signal  $y$ . Ta konverzija opisana je relacijom

$$y_m = f_2(y_1) \quad (5.2)$$

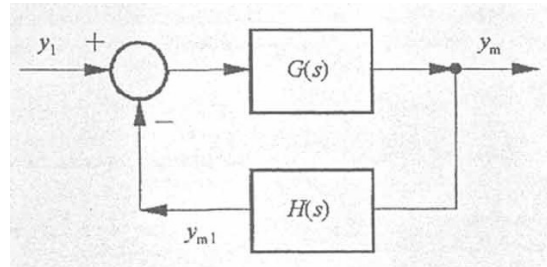
pri čemu je operator  $f_2(\bullet)$  obično linearan. Imajući u vidu (5.1) i (5.2), za  $y_m$ , se može napisati

$$y_m = f_2[f_1(y)] = f(y) \quad (5.3)$$

Konverzija opisana sa (5.2) obično se naziva sekundarna konverzija i povezana je, u svakom konkretnom slučaju, sa složenim problemom konstrukcije i gradnje adaptera.

Uvođenje međukoordinate  $y_1$ , prvi je korak ka standardizaciji, i to se čini da bi se adapter mogao upotrijebiti u više mjernih pretvarača.

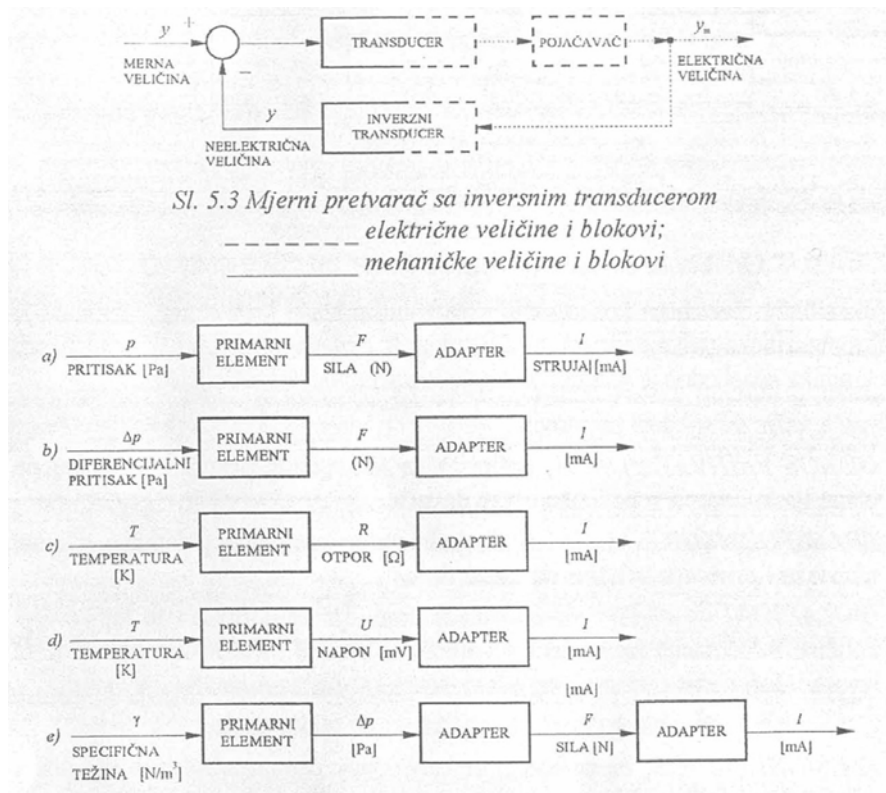
U cilju tačnije konverzije, blok adaptera sa slike 5.1 ima internu povratnu spregu kao na slici 5.2.



SI. 5.2 Strukturna šema adaptera  $G(s)$ -prenosna funkcija direktne grane,  $H(s)$  - prenosna funkcija povratne sprege

Kako je signal  $y_1$  obično unificirani, blok povratne sprege ima osnovni zadatak da konvertuje  $y_m$ , u  $y_{m1}$ , tako da je  $y_{m1}$ , direktno uporedivo sa  $y_1$ . Ovaj blok se često naziva i inverzni transducer.

Principijelna šema mjernog pretvarača sa inverznim transducer-om data je na slici 5.3. Polazeći od slike 5.1, na slici 5.4 date su blok šeme nekoliko mjernih pretvarača raznih fizičkih veličina koje prethodno treba konvertovati u neku međukoordinatu, pogodnu za dalju konverziju.

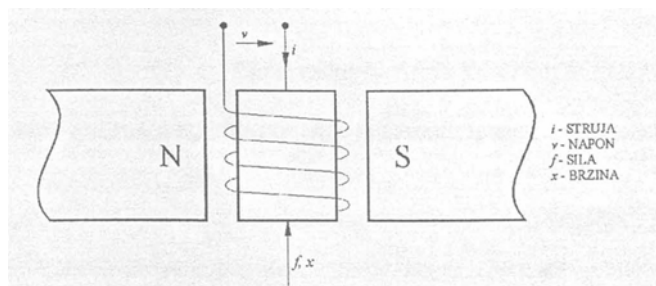


SI. 5.4 Blok šeme tipičnih mjernih pretvarača

## 5.2.1 Senzori, davači

U osnovi, senzori su bazirani na jednom od tri energetska procesa: konverziji energije, storiranju energije i upravljanju energije.

Tipičan senzor baziran na konverziji energije je namotaj koji se kreće u magnetskom polju permanentnog magneta, slika 5.5.



SI. 5.5 Elektrodinamički senzor;  $i$  - struja,  $v$  - napon,  $f$  - sila,  $x$  – brzina

Za idealni linearni element koji ne posjeduje sposobnost akumuliranja energije ili gubitaka, može se napisati jednostavna relacija

$$\begin{bmatrix} V(s) \\ f(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & A \\ B & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i(s) \\ x(s) \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

gdje je, na osnovi konzervacije energije,  $A = -B$ .

Ovaj model pokazuje da elektrodinamički senzor može proizvesti napon koji je funkcija brzine i biti senzor brzine, ili da proizvodi silu koja je funkcija struje i biti senzor struje. Tipičan senzor baziran na upravljanju toka snage je električni otpor koji se mijenja usljed naprezanja (strain gauge), u kome mehanički pomjeraj kontrolira snagu na izlazu senzora. Jednačine koje opisuju element su

$$V = R(x)i \quad (5.6)$$

$$f = kx \quad (5.7)$$

$R$  i  $k$  su otpor i krutost otporne trake tj. elementa na kojem je montirana otporna traka, a  $x$  je pomjeraj. Linearizovani inkrementalni model tenzometrijskog senzora je opisan relacijom

$$\begin{bmatrix} \delta V(s) \\ \delta f(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R(x) & s^{-1}Ai \\ 0 & s^{-1}k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta i(s) \\ \delta x(s) \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

gdje su varijable  $\delta V$ ,  $\delta f$ ,  $\delta i$ ,  $\delta x$  inkrementalne varijacije oko stacionarne radne tačke  $(x_0, i_0)$  a  $A$  je konstanta tenzometrijskog elementa. Model pokazuje da su varijacije u izlaznom naponu funkcije pomjeraja. Element (2,1) u matrici iz (5.8) jednak je nuli i pokazuje da električne varijable nemaju uticaja na mehaničke varijable, tj. sistem je unilateralan..

## 5.2.2 Transducer-i

Senzori i transduceri-i mogu biti klasifikovani prema više kriterija. Jedna od uobičajenih podjela je na aktivne i pasivne.

**AKTIVNI DAVAČ** je onaj davač kod kojeg ulazna energija mjerene veličine proizvodi energiju na svom izlazu.

Tipični primjeri aktivnih davača su: termoelement (termopar), piezoelektrični kristal, Bourdon-ova cijev, itd.

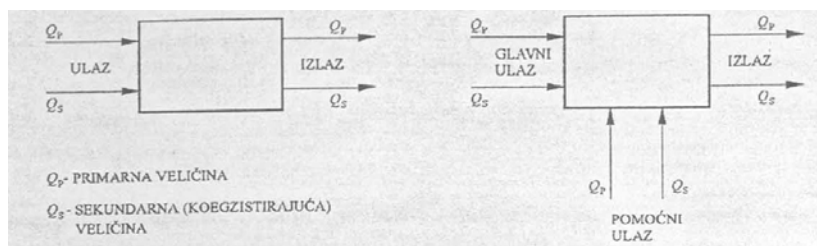
**PASIVNI DAVAČ** je onaj davač kod kojeg je potrebna dodatna energija da bi se na izlazu dobila informacija koja je praćena energijom na izlazu.

Tipični primjeri pasivnih davača su davači na impedantnoj osnovi kao što su: termootporni, tenzometrijski strain gauge, kapacitivni davači, itd., jer je kod ovih davača neophodna dodatna energija da bi izlazna veličina bila nosilac energije.

### 5.2.3 Senzori/davači kao višekrajnici

Imajući u vidu prethodne definicije iz [19], blok šeme aktivnog i pasivnog davača date su na slici 5.6.

Slika 5.6, (a) i (b) predstavlja opštu blok strukturu aktivnih i pasivnih davača razmatranih kao četvorokrajnik (aktivni) i kao šestokrajnik (pasivni).



SI. 5.6 Blok šeme davača: (a) -aktivni davač, (b) -pasivni davač

Da se identifikuju parametri koji opisuju prenos informacija kroz davač, potrebno je odrediti matematičke relacije između 4 ili 6 ulaznih i izlaznih varijabli. Za opisivanje četvorokrajnika neophodno je 4, a za opisivanje šestokrajnika 9 koeficijenata.

Kod davača važni su sljedeći pojmovi:

- **ODNOS PRIHVATANJA,  $A$** , definisan je kao odnos primarne veličine na ulazu i sekundarne veličine na ulazu davača.
- **TRANSFORMACIONI ODNOS,  $\gamma$** , definisan je kao odnos primarne veličine na izlazu i primarne veličine na ulazu davača.
- **IZOLACIONI ODNOS,  $I$** , u informacionom smislu definisan je kao odnos količine informacije prihvaćene na ulazu i količine informacije dobivene iz izvora informacije. Cilj konstrukcije svakog davača je da izolacioni odnos bude 1.
- **EMISIONI ODNOS,  $E$** , definisan je kao odnos primarne izlazne veličine i sekundarne izlazne veličine.

Veličine  $A$  i  $E$  nisu ekvivalentne ulaznoj ili izlaznoj impedansi, respektivno. Impedansa je parametar baziran na snazi, a odnos prihvatanja  $A$  i emisioni odnos  $E$  parametri su davača bazirani na energiji. Impedansa je obično povezana sa odnosom nezavisnih promjenljivih, dok odnosi  $A$  i  $E$  ne baziraju ni na zavisnim ni na nezavisnim promjenljivim u sistemu.

Ako je ulaz napon, ulazna impedansa mora biti visoka, a ako je ulaz struja, ulazna impedansa mora biti niska. U principu, svaki senzor mora uzimati minimum energije iz sistema u tački mjerenja.

## 5.2.4 Tehničke karakteristike mjernih pretvarača

Jednačina koja opisuje kretanje linearnog mjernog pretvarača n-tog reda s jednim ulazom i jednim izlazom je

$$\sum_{i=n}^0 a_i \frac{d^{(i)} y_m}{dt^{(i)}} = \sum_{j=r}^0 b_j \frac{d^{(j)} y}{dt^{(j)}} \quad (5.10)$$

gdje su:  $a_i, b_j, (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, r)$  - konstante koje zavise od konkretnog mjernog pretvarača.

U stacionarnom stanju je  $y_m^{(i)} = 0$  i  $y^{(j)} = 0$ , pa jednačina (5.10) glasi

$$a_0 y_m = b_0 y_s \quad (5.11)$$

i naziva se statička karakteristika mjernog pretvarača.

Veličine  $y_{ms} = \lim_{t \rightarrow \infty} y_m(t)$  i  $y_s = \lim_{t \rightarrow \infty} y(t)$  nazivaju se stacionarne vrijednosti izlaza i ulaza.

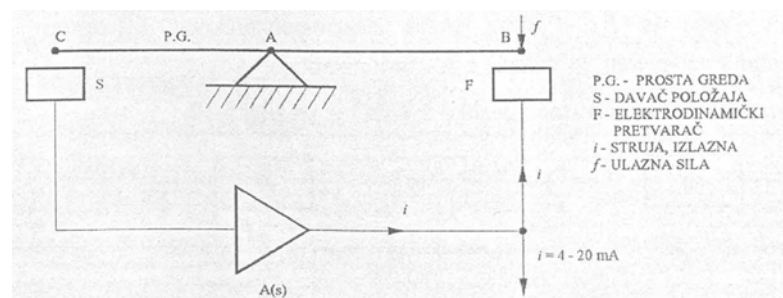
Dinamička karakteristika definisana je relacijom (5.10), a karakteristika SAU drugog reda, diskutovana je ranije u POGHLAVLJU 3, pa isti zaključci važe i ovdje.

Osnovni zahtjevi koji se postavljaju na tehničke karakteristike mjernih pretvarača mogu se sumirati kako slijedi:

- Visoka statička i dinamička tačnost;
- Mjerni pretvarač mora imati odgovarajuću frekventnu propusnost koja mora odgovarati frekventnom sadržaju mjenog signala. Ovo znači da mjerni pretvarač ne smije da guši mjereni signal po amplitudi i da unosi značajno fazno kašnjenje, te da ne pojačava industrijske šumove, što su dva oprečna zahtjeva, koji moraju biti usklađeni;
- Galvansko odvajanje ulaza od izlaza tamo gdje je to neophodno;
- Neosetljivost na uticaje šumova i vanjskih smetnji;
- Mogućnost rada u eksplozivno-opasnim sredinama. ;

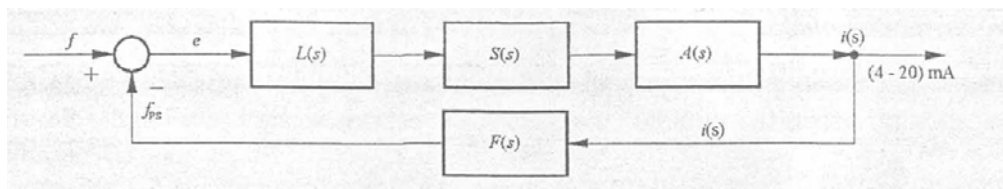
## 5.3 MJERNI PRETVARAČI S KOMPENZACIJOM SILE

Principijelna šema mjernog pretvarača sile (dinamometra) s kompenzacijom sile, data je na slici 5.7.



Sl. 5.7 Mjerni pretvarač sile s kompenzacijom sile (force-balance)

Sila  $f$  djeluje u tački B na prostoju gredi P.G. usljed čega se pomjera tačka C. Pomjeraj tačke C detektuje se pomoću senzora, S koji proizvodi signal proporcionalan pomjeraju tačke C, a ovaj se pojačava u naponsko-strujnom pojačavaču A. Struja  $i$  koja je proporcionalana pomjeraju tačke C u pretvaraču F proizvodi silu  $f_{ps}$  koja se uravnotežava sa silom  $f$ . Strukturna blok šema mjernog pretvarača sile sa slike 5.7 data je na slici 5.8



SI. 5.8 Blok šema mjernog pretvarača sile s kompenzacijom sile

Relacija između sile i struje data je izrazom

$$\frac{i(s)}{f(s)} = \frac{L(s)S(s)A(s)}{1 + L(s)S(s)A(s)F(s)} \quad (5.12)$$

gdje je:

$L(s)$  - prenosna funkcija grede CAB sa svim masama koje učestvuju u kretanju,  
 $S(s)$  - prenosna funkcija detektora pomjeraja,  $A(s)$  - prenosna funkcija pojačavača,  
 $F(s)$  - prenosna funkcija konvertora struje u silu povratne spruge  $f_s$  (inversni transducer),

Ako se pretpostavi da je pri radnim frekvencama pojačnje  $A(s)$  veoma veliko, relacija (5.12) se može napisati

$$i(s) \approx \frac{f(s)}{F(s)} \quad (5.13)$$

Efekat strukture sa slike 5.8 je da se poboljša dinamički odziv mjernog pretvarača čineći ga neosetljivim na moment inercije grede, i ostale smetnje koje djeluju na sistem. Tačnost ovog mjernog pretvarača isključivo zavisi od tačnosti inverznog transducer-a  $F(s)$  tj. konvertora struje  $i$  u silu povratne sprege  $f_{ps}$

### 5.3.1 Primjer mjernog pretvarača pritiska s kompenzacijom sile

Pritisak je važna mjerena varijabla u nauci i industriji ali ne može biti mjerena direktno. Generalno, mahanička oprema obezbjeđuje pomjeraj ili silu kao odziv na promjenu pritiska. Taj pomjeraj ili sila pretvaraju se u električni signal koji se dalje prenosi i koristi u SAU.

Postoje četiri koncepta definisanja pritiska:

- mehanički,
- hidraulički,
- kinetički i
- termodinamički.

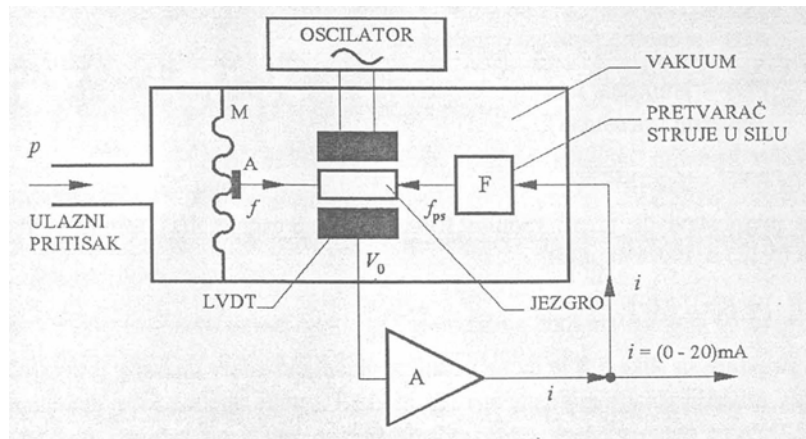
Primarna definicija pritiska je mehanicka prema kojoj se pritisak definise kao odnos sile i površine, tj.

$$(5.14)$$

gdje je:  $F$  - sila u  $[N]$ ,  $A$  - površina u  $m^2$ .

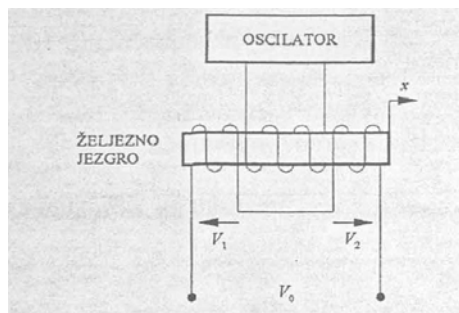
U osnovi postoji više načina za mjerenje pritiska, što je detaljno opisano u [9], [20], [21], [22], [23], [11] i nizu drugih referenci.

Kod mjernog pretvarača pritiska s kompenzacijom sile, kako i sam naziv podrazumijeva, koristi se princip povratne sprege. Blok šema jednog takvog mjernog pretvaraca data je na slici 5.9.



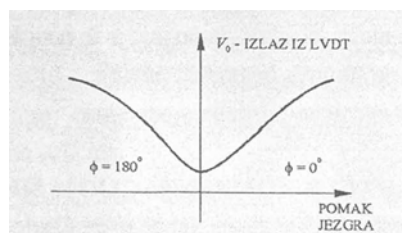
SI. 5.9 Mjerni pretvarač pritiska sa kompenzacijom

Pritisak  $p$  djelujući na talasastu membranu  $M$ , proizvodi silu  $f$  u tački  $A$  koja pomiče jezgro od mekog željeza linearnog varijabilnog diferencijalnog transformatora - LVDT. Rezultat tog pomjeraja jezgra je naponski signal  $V_0$  na izlazu LVDT, koji se pojačava i pretvara u strujni signal  $i$  u pojačalu  $A$ . U pretvaracu  $F$ , struja  $i$  pretvara se u silu povratne sprege  $f_{ps}$  koja se suprotstavlja sili  $f$ . Kada su ove dvije sile jednake tada imamo da je struja  $i$  direktno srazmjerna pritisku  $p$ . Principijelna šema LVDT data je na slici 5.10



SI. 5.10 LVDT: Principijelna šema

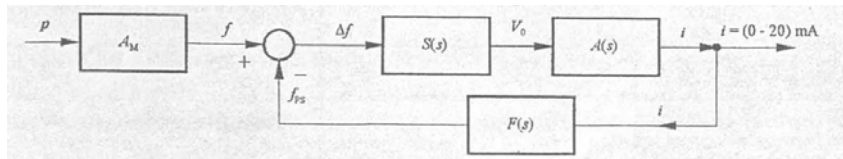
LVDT sa slike 5.10 sadrži primarni namotaj uniformo namotan čitavom dužinom jezgra, i dva potpuno ista i simetrično namotana sekundarna namotaja preko primarnog namotaja. Pri tome magnetno jezgro slobodno se kreće unutar namotaja. Kako se primar napaja naizmjeničnim naponom, to se na sekundaru indukuju naponi  $V_1$  i  $V_2$  koji su međusobno u opoziciji, pa se na izlazu ima napon  $V_0 = V_1 - V_2$ . Kada se jezgro nalazi u centralnom položaju, napon  $V_0 = 0$  u idealnom slučaju, što, međutim, u praksi nije slučaj zbog problema balansa, zaostalih napona, itd. Izlazni napon mijenja fazni pomjeraj za  $\Phi = 180^\circ$ , kada pomjeraj  $x$  mijenja smijer.



SI. 5.11 Statička karakteristika LVDT

Inverzni transducer F predstavlja elektromehanički konvertor koji generiše silu  $f_{ps} = iBIN$ , gdje je  $B$  - jačina polja elektromehaničkog konvertora sa permanentnim magnetom,  $l$  - dužina, a  $N$  - broj namotaja.

Strukturna blok šema pretvarača sa slike 5.9 data je na slici 5.12.



SI. 5.12 Blok šema mjernog pretvarača pritiska s kompenzacijom sile

gdje je:

$A_M$  - poprečni presjek talasaste membrane M,

$S(s)$  - prenosna funkcija LVDT, uključujući i mase koje učestvuju u kretanju (jezgro sa svojom masom i viskozim trenjem),

$A(s)$  - prenosna funkcija naponsko-strujnog pojačavača,

$F(s)$  - prenosna funkcija inverznog transducera, elektro-mehaničkog konvertora. Relacija koja povezuje pritisak  $p$  i struju  $i$  je

$$\frac{i(s)}{p(s)} = \frac{A_M S(s) A(s)}{1 + S(s) A(s) F(s)}$$

Ako je  $A(s)$  dovoljno veliko za datu frekvencu, tada je  $i(s) = \frac{A_M p(s)}{F(s)}$ , što znači da tačnost mjernog pretvarača zavisi isključivo od tačnosti konvertora F.

Ako se na izlazu želi imati 4,0 mA, tada se jezgro LVDT izvede van centralne pozicije tako da se na izlazu ima 4,0 mA.

Kod opisanog mjernog pretvarača kao senzor se umjesto talasaste membrane može koristiti ravna membrana, Bourdonova cijev, i svi senzori koji za svoj izlaz imaju silu ili pomjeraj. Takođe, opisani mjerni pretvarač može da se koristi i za mjerenje diferencijalnog pritiska  $\Delta p$ , mjerenje ubrzanja, brzina. Tačnost ovakvih mjernih pretvarača može biti ispod 0,2% PO, a kod pretvarača ubrzanja ovog tipa, tačnost može biti i bolja ako je to neophodno.

#### 5.4 MJERNI PRETVARAČI DIREKTOG TIPRA

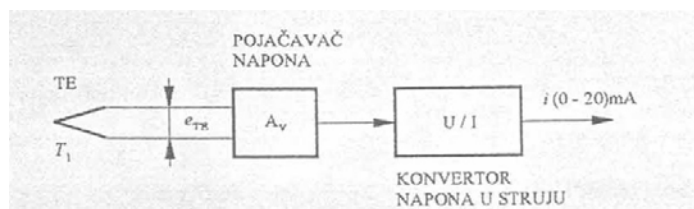
Ovaj tip mjernih pretvarača nema povratnu spregu. Tipičan primjer je mjerni pretvarač temperature na bazi termoelementa ili otpornog termometra ili mjerni pretvarač pritiska na bazi tenzometrijskog principa.

Za mjerenje temperature najčešće se koriste sljedeće metode:

- ekspanzione metode (živin termometar, bimetalni termometar, itd.),
- termoelektrične metode (termoelement),
- otporne metode (termistori, otporni termometri),
- racijacione metode (pirometri).

Primjer mjernog pretvarača temperature kada je senzor temperature termoelement, dat je na slici 5.13.





Sl 5.13 Mjerni pretvarač temperature na bazi termoelementa

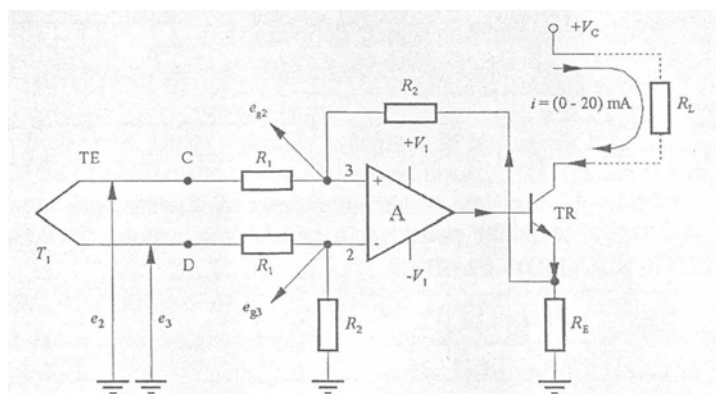
Signal o temperaturi  $T_1$  dobiva se pomoću termoelementa TE u iznosu reda  $mV$ , što zavisi od tipa termoelementa, temperature toplog kraja  $T_1$  i temperature hladnog kraja  $T_2$  (referentna temperatura koja je obično  $T_2 = 0^\circ\text{C}$  do  $20^\circ\text{C}$ ). Tako dobijeni signal  $e_{TE}$  ( $mV$ ) pojačava se u naponskom pojačavaču sa pojačanjem  $A_V [V/V]$ , i onda pojačani signal se u naponsko-strujnom konvertoru pretvara u standardni strujni signal  $i$ , opsega (0-20 mA) ili (4-20 mA).

Postoji više načina realizacije mjernog pretvarača temperature sa slike 5.12, što zavisi od tehnologije koja se koristi za realizaciju. Obično se koriste dva načina realizacije:

1. korišćenjem instrumentacionih operacionih pojačavača visokih performansi i
2. korišćenjem diskretnih poluprovodničkih komponenti za realizaciju čoperskih pojačavača instosmjernog napona.

Masovna industrijska rješenja mjernih pretvarača temperature na bazi termoelementa kao senzora koriste instrumentacione pojačavače, dok se čoperska pojačavača koriste za realizaciju mjernih pretvarača visokih performansi.

Na slici 5.14 daje se jedan mjerni pretvarač na bazi instrumentacionog pojačavača.

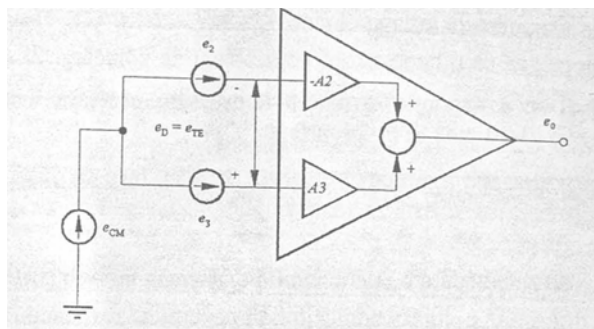


Sl. 5.14 Mjerni pretvarač temperature: TE - termoelement, A - operacioni pojačavač, TR - tranzistor,  $R_L$  - otpor opterećenja (prijemnika, potrošača)

Uz uobičajene pretpostavke koje važe za ovakve sklopove (pojačanje pojačavača A,  $A_V \rightarrow \infty$  pojačanje tranzistora  $h_{FE} > 500$ ,  $R_2 \gg R_E$ ), može se za struju opterećenja napisati izraz

$$i \approx \frac{R_2}{R_1} \frac{1}{R_E} (e_3 - e_2) = \frac{R_2}{R_1} \frac{1}{R_E} (e_{TE}) \quad (5.16)$$

Pojačavač A mora da bude veoma kvalitetno operacioni pojačavač za ove namjene, što podrazumjeva da pojačavač dobro pojačava napon  $e_{TE}$  (diferencijalni napon) a veoma slabo pojačava napon  $e_{CM}$ , slika 5.15.



Sl. 5.15 Uprošćena predstava diferencijalnog pojačavača

Izlazni napon pojačavača sa slike 5.15 dat je izrazom

$$e_0 = A_D e_D + A_{CM} e_{CM} \quad (5.17)$$

gdje je:  $A_D$  - diferencijalno pojačanje definisano kao  $A_D = 1/2(|A_2| + |A_3|)$

$A_{CM}$  - pojačanje zajedničkog signala definisano kao  $A_{CM} = |A_3| - |A_2|$

Relacija (5.17) može se napisati u obliku

$$e_0 = A_D (e_D + \frac{A_{CM}}{A_D} e_{cm}) \quad (5.18)$$

Odnos  $A_{CM} / A_D$  naziva se faktor potiskivanja zajedničkog napona (COMMON MODE REJECTION RATIO) - CMRR, tj.

$$CMRR = \frac{A_D}{A_{CM}} = \frac{1/2(|A_2| + |A_3|)}{|(|A_3| - |A_2|)|} \quad (5.19)$$

Da bi uticaj napona  $e_{CM}$  bio što manji, što se uvijek zahtijeva u praksi, faktor CMRR mora biti što veći, jer on u suštini potiskuje napon  $A_D$  da se ovaj ne pojavi u izlaznom signalu  $e_0$

CMRR se izražava u V/V ili u dB i treba za ove primjene da bude reda

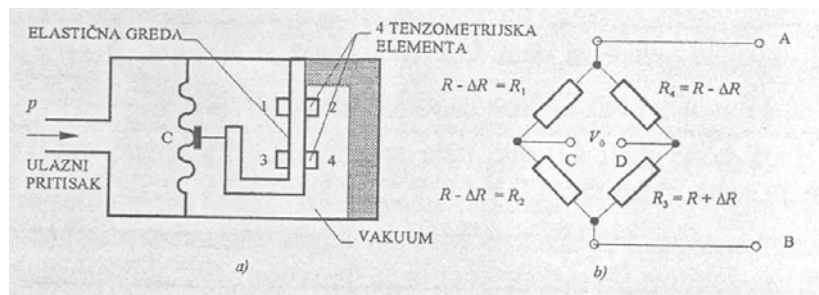
$$(10^5 - 10^6) \text{ V/V tj. } 100\text{-}120\text{dB.}$$

Ako je

$$e_D = 1\text{mV}, e_{CM} = 1\text{V}, \text{ a } CMRR = 10^6,$$

tada je  $e_0 = A_D (1\text{mV} + 1\text{V} / 10^6) = A_D (1\text{mV} + 1\mu\text{V})$ , sto je 0,1%. Ovo znači daje napon  $e_{CM}$  prigušen  $10^6$  puta tj. milion puta jer se na izlazu probio napon od  $1\mu\text{V}$  koji potiče od  $e_{CM}$ . Ovo je naročito važno kod termoelemenata čiji je vrh uzemljen tj. može da se nađe pod naponom od nekoliko desetina volti.

Drugi primjer mjernoga pretvarača direktnog tipa je mjerni pretvarač pritiska na tenzometrijskom principu, tj. strain gauge principu, slika 5.16.



Sl. 5.16 Tenzometrijski transducer pritiska

Četiri metalna strain gauge montirana su na elastičnoj gredi od kojih se dva izdužuju, a dva skraćuju prilikom djelovanja pritiska  $p$  koji, djelovanjem na talasastu membranu stvara silu u tački C. Otpori  $R_1, R_2, R_3, R_4$  vezani su u Wheatstone-ov most, koji se napaja jednosmjernim stabilnim naponom, u cilju da se između tačaka A i B dobije električni izlaz.

Strain gauge radi na principu da provodnik uniformnog poprečnog presjeka  $A$  i dužine  $L$  mijenja svoje dimenzije kada se napreže. Rezultat toga naprezanja je da se njegov otpor mijenja.

Neka je otpor tenzometrijskog elementa

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

gdje je:  $\rho$  - specifična otpornost,

$A = D^2 \pi / 4$  - površina poprečnog presjeka,

$D$  - dijаметar tenzometrijskog elementa.

Nakon nalaženja totalnog diferencijala i uvođenja konačnih razlika ima se daje

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{2\Delta D}{D}$$

Nakon dijeljenja sa  $\frac{\Delta L}{L}$ , dobiva se

$$\frac{\Delta RL}{R\Delta L} = \frac{\Delta \rho L}{\rho \Delta L} + 1 - \frac{2\Delta DL}{D\Delta L} \quad (5.20)$$

U izrazu (5.20)  $\frac{\Delta L}{L}$  naziva se aksijalna deformacija,  $(\varepsilon_a)$ ,  $\frac{\Delta D}{D}$  poprečna

deformacija,  $\varepsilon_t$ , a  $\frac{\Delta DL}{D\Delta L}$  naziva se Poisson-ov odnos,  $\nu$ , tj.  $-\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_a}$  Izraz  $\frac{\Delta RL}{R\Delta L}$

naziva se GAUGE FACTOR  $G$ . Na osnovu uvedenih oznaka, relacija (5.20) može se napisati u obliku

$$G = \frac{\Delta \rho \varepsilon_a}{\rho} + 1 + 2\nu \quad (5.21)$$

Neka bude konstatovano da su  $\varepsilon_a$  i  $\varepsilon_t$  suprotnog predznaka. Za elastične materijale,  $\nu$  je konstantan, a za metalne materijale kreće se od 0 do 0.5.

Tipične vrijednosti GAUGE FACTORA  $G$  su za metalne materijale oko 2. Tako npr. za konstantan je  $G = 2,05$ , za nikal-hrom  $G = 2,0$ , za izoelastične materijale  $G = 3,5$ , a za

poluprovodničke materijale je  $G = 150$ . U tehničkoj praksi vrijednosti za  $G$  i  $R$  određene su od strane proizvođača. Polazeći od definicije GAUGE FACTOR-a ima se da je

$$G = \frac{\Delta RL}{R\Delta L} = \frac{\Delta R}{R\varepsilon_a} \quad (5.22)$$

ili

$$\Delta R = RG\varepsilon_a$$

Neka je dat strain gauge element od *Ni-Cr* čiji je otpor  $R = 350 \Omega$ ,  $G = 2,0$  i neka je akcijama deformacija  $\varepsilon_a = 1000 \mu\text{strain}$ -a =  $1000 \mu\text{m/m} = 1000 \cdot 10^{-6} \text{ m/m}$ , tada se za promjenu otpora  $R$ , pri datoj aksijalnoj deformaciji ima da je  $\Delta R = 0,7 \Omega$ .

Postoji više tipova konstrukcija strain gauge, ali se najčešće susreću:

- na bazi depozicije u vakuumu metalnog tankog filma i
- na bazi difundiranih poluprovodnika.

Tipične vrijednosti su  $120$ ,  $350$  i  $1000 \Omega$ .. Relativna deformacija je u opsegu elastične deformacije reda  $50 \mu\text{m}$ .

Otpori sa slike 5.16 (a), čine grane Wheatstone-ovog mosta sa slike 5.16 (b), i ako se taj most napaja naponom  $V_{AB}$  onda se za napon  $V_0$  ima

$$V_0 = \varepsilon_a G V_i = V_i \frac{\Delta R}{R} \quad (5.24)$$

Ako se uzme daje za prethodni slučaj  $\Delta R = 0,7 \Omega$ ,  $V_i = 10$  onda je izlaz iz mosta sa slike 5.16 (b),  $V_0 = 20 \text{ mV}$ .

Wheatstone-ov most sa slike 5.15 (b) naziva se transducerski most i postoje razni mosni spojevi takvog tipa, [9], [12].

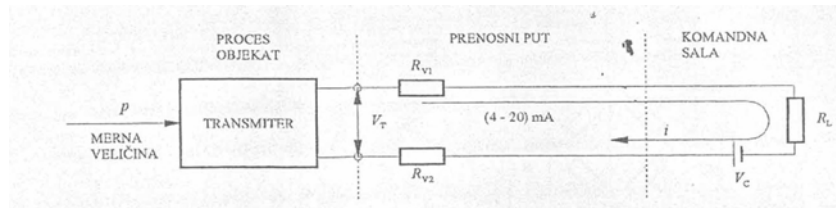
Kad je jednom dobijen napon  $V_0$  koji je srazmjeran aksijalnoj deformaciji  $\varepsilon_a$ , a ova pritisku  $p$  sa slike 5.16 (a), sada je neophodno taj signal pojačati i pretvoriti ga u strujni signal, što se ostvaruje korištenjem sklopa kao na slici 5.13, s tim što se umjesto termopara, u tačke CD priključuje izlaz iz mosta  $V_0$  sa slike 5.16 (b).

Transducer-i na bazi strain gauge koriste se u raznim oblicima i za razne opsege sila od nekoliko grama, do nekoliko tona. Tačnosti koje se postižu su reda  $0,1\%$  PO, temperaturne greške  $\pm 0,03\%$  / $^\circ\text{C}$ , i temperaturni opseg od  $-10^\circ\text{C}$  do  $+40^\circ\text{C}$ .

Razvojem elektronskih i mikroelektronskih komponenti, sve su manje zastupljeni mjerni pretvarači (transmiteri) sa standardnim strujnim signalom  $0(4)\text{-}20 \text{ mA}$  ili standardnim naponskim signalom  $0\text{-}10 \text{ V}$ , a sve više se električni signali (ako egzistiraju) iz davača/senzora ili transducera direktno uvode u SAU, tj. upravljačku strukturu, koja je sve češće računarski bazirana. Tako se napon iz termoelementa ili otpornog mosta direktno uvodi u analogni ulaz računarske upravljačke strukture. Neki digitalni transducer-i kao što su enkoderi, ultrazvučni davači protoka fluida, davači pritiska na bazi vibracione žice, itd. direktno se mogu vezivati na binarne ili digitalne ulaze računarskog sistema.

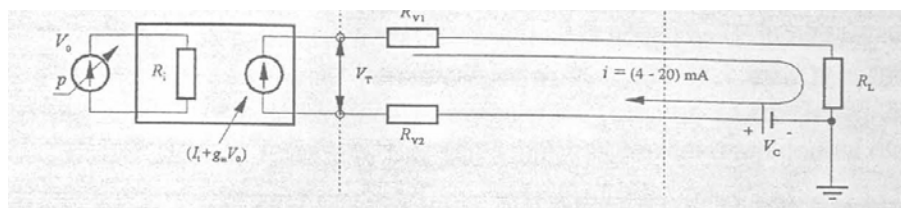
## 5.5 DVOŽIČNI MJERNI PRETVARAČI/TRANSMITERI

Tačno prenošenje izlaznog signala iz senzora ili transducer-a sa neke udaljenosti u pogonu (sa objekta) do centralnog mjesta za pokazivanje, obradu ili upravljanje (do komandne sale), stalni je problem prisutan kod projektovanja SAU.



Sl. 5.17 Blok šema dvožičnog transmitera:  $V_T$  - napon transmitera, minimalni, neophodan za njegov rad,  $R_{V1}, R_{V2}$  - otpori prenosnih vodova,  $i$  - struja opterećenja,  $R_L$  - otpor opterećenja,  $V$  - napon napajanja transmitera.

Tradicionalan pristup je korištenje mjernih pretvarača sa standardnim strujnim signalom na izlazu  $(4-20) \text{ mA}$  za prenos informacije o mjerenoj veličini, ili korištenje neke druge vrste signala za iste svrhe. U POGLAVLJU 4 bilo je govora o prenosu signala kroz SAU te o prednostima i manama signala sa "živom" nulom,  $(4-20) \text{ mA}$ , i signala sa pravom nulom  $(0-20) \text{ mA}$ . Osnovna prednost transmitera sa "živom" nulom je, što se oni, za razliku od onih sa pravom nulom, povezuju sa prijemnikom informacije dvožično, i da se oni mogu koristiti u eksplozivno opasnim sredinama, te omogućuju detekciju prekida prenosne linije. Blok šema dvožičnog mjernog pretvarača data je na slici 5.17.

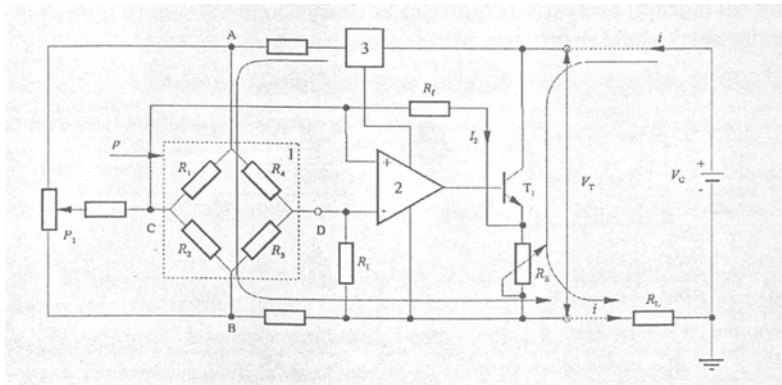


Sl. 5.18 Električna šema dvožičnog mjernog pretvarača:  
 $V_0$  - ulazni naponski signal srazmjeren mjerenoj veličini  $p$ ,  
 $I_1 + g_m V_0$  - intenzitet strujnog izvora,  $I_1$  - mirna struja, konstantna;  $I_1 = 4,0 \text{ mA}$ ,  
 $g_m$  - transkonduktanca, konstantna,  $R_1$  - ulazna impedansa

Budući da napon  $V_T$  i struja  $i$ -signal nosilac informacije o upravljanoj procesi, variraju sa promjenom mjerene varijable stanja  $p$ , transmieter mora biti u stanju da radi i kod minimalne struje  $i = 4,0 \text{ mA}$ , kolika je minimalna vrijednost signala nosioca informacije. Drugim riječima, treba obezbijediti funkcionisanje transmitera pri snazi  $4[\text{mA}]V_T[\text{V}]$ , što nije uvijek moguće ostvariti.

Električni dio dvožičnog transmitera, obično je konvertor napona u struju, koji prenosi strujni signal vlastitim napojnim linijama i šematski se može prikazati kao na slici 5.18.

Tipičan primjer dvožičnog transmitera na bazi transducer-a sa slike 5.16 (b), dat je na slici 5.19.

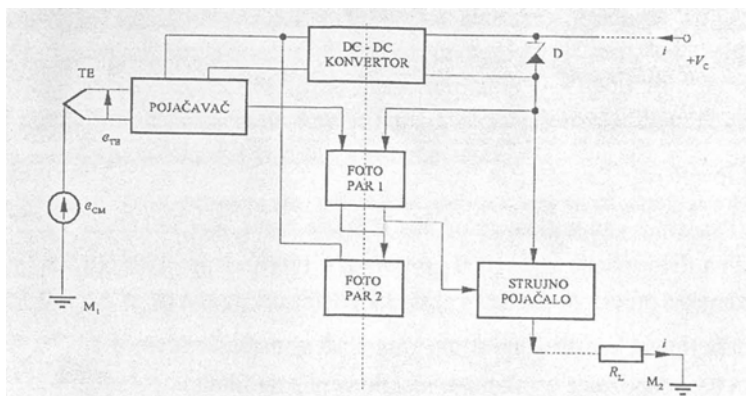


Sl. 5.19 Dvožični mjerni pretvarač: 1 - mjerni most na bazi strain gauge sa slike 5.16 (b), 2 - naponski pojačavač, 3 - naponski stabilni izvor napajanja pojačavača 2 i Wehatstone-ovog mosta,  $T_1$ , - transistor kao naponski upravljani strujni izvor,  $i = I_1 + I_2$  - struja nosilac informacije  $I_1$ , - mirna struja mjernog pretvarača;  $I_1 = \text{const} = 4,0 \text{ mA}$ ,  $I_2$  —  $kp$  - komponenta struje koja zcnisi od procesnog parametra  $p$

Mjerna veličina  $p$ , dovodi se na mjerni most 1, koji se sastoji od četiri otpornika, slika 5.16 (b). Kako je rečeno ranije, napon između tačaka  $D$  i  $C$  srazmjernan je pritisku  $p$ , tj. mjerenoj varijabli. Naponsko pojačalo  $A_2$  je u nekoj vrsti diferencijalnog spoja, tako da je izlazna struja  $I_2$ , koja teče kroz tranzistor  $T_1$ , koji radi u linearnom režimu i upravljani je naponom iz izlaza pojačavača 2. srazmjerna procesnom parametru  $p$ .  $I_1$  napaja praktično mjerni most i operacioni pojačavač i ona se potenciometrom  $P_1$  podešava na  $4,0 \text{ mA}$ , tj. ovim potenciometrom podešava se „živa“ nula. Potenciometrom  $R_E$  podešava se opseg mjernog pretvaraca

Kada je davač informacije termoelement sa uzemljenim vrhom što je veoma čest slučaj u praksi radi boljeg odziva, kao i eksploatacionih uslova, tada je napon  $e_{CM}$  značajan. Da bi se izvršilo galvansko odvajanje mjernog davača TE od prijemnika informacije, koristi se dvožični mjerni pretvarač kao na slici 5.20.

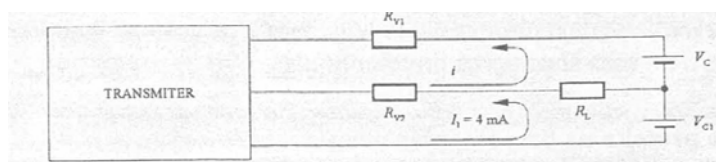
Galavansko razdvajanje po napajanju izvora  $V_C$  sa masom  $M_2$  od napona davača  $e_{TE}$  i napona  $e_{CM}$  sa masom  $M_2$  ostvaruje se pomoću DC/DC pretvarača (DC/DC pretvarač je pretvarač istosmjernog napona u istosmjerni uz galvansko odvajanje ostvareno transformatorskom spregom).



57. 5.20 Dvožični mjerni pretvarač sa galvanskim razdvajanjem

Galvansko razdvajanje po signalu nosiocu informacije, da ne bi došlo do zatvaranja strujnog kruga usljed razlike potencijala mase  $M_1$  i mase  $M_2$  kroz sam transmitter, ostvaruje se fotoparovima 1 i 2.

Dvožični transmitter ne omogućava realizaciju signala nosioca informacije opsega (0-20 mA), jer nije moguće da mirna struja  $I_1$ , bude nula. Jednostavno, kada je  $I_1 = 0$ , transmitter ne prima nikakvu snagu za svoj rad. Struja  $I_1$  određena je, minimalnom snagom koja je neophodna za rad transmittera a napon  $V_T$  zavisi od otpora opterećenja napona napajanja i maksimalne struje; ( $I_{MAX} = 20 \text{ mA}$ ). Signal sa pravom nulom ostvaruje se trožičnim transmitterom uvođenjem pomoćnog izvora napajanja, slika 5.21.



Sl. 5.21 Trožični transmitter

Naponski izvor  $V_{C1}$  formira mirnu struju  $I_1 = 4 \text{ mA}$  koja poništava dio struje  $i$  kroz otpor opterećenja  $R_L$  u opsegu od (0-16) mA. Povećanjem pojačanja za 25% struja  $i$  se podešava na opseg (0-20) mA.

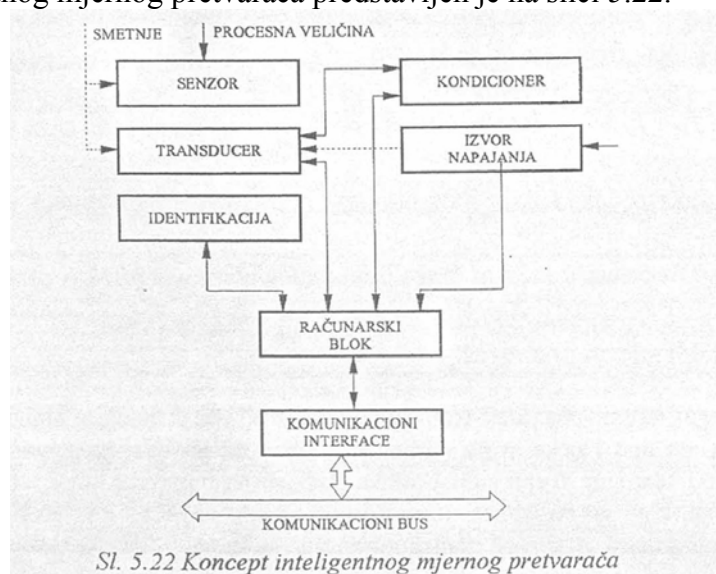
## 5.6 INTELIGENTNI SENZORI I MJERNI PRETVARAČI

Tehnološki progres u oblasti razvoja i proizvodnje mikroelektronike doprinio je da se pojavi i realizuje koncept "pametnog" (smart) ili inteligentnog senzora i mjernog pretvarača.

Inteligentni mjerni pretvarač sastoji se iz:

- senzora.
- transducer-a,
- adaptera,
- komunikacionog interface-a za digitalnu informaciju i
- dijela za identifikaciju.

Koncept inteligentnog mjernog pretvarača predstavljen je na slici 5.22.



Sl. 5.22 Koncept inteligentnog mjernog pretvarača

Mjerni pretvarač sa slike 5.22 uključuje u sebe računarski blok koji je tako konfigurisan da obavlja postavljene zadatke. Karakteriše ga decentralizovana mogućnost računanja i mogućnost procesiranja koja mu omogućava da šalje digitalnu informaciju i komunicira sa računarskim sistemom negdje u računarskoj mreži. Inteligencija mjernog pretvarača nije sadržana u samom senzoru ili transducer-u već u njegovom računarskom bloku, bloku za identifikaciju i komunikacionom interface-u, koji na bazi signala iz transducer-a generiše digitalni signal u formi koja je kompatibilna sa komunikacionim kanalom centralnog računara ili računarskom mrežom.

Osnovne karakteristike inteligentnih mjernih pretvarača su:

- direktno izračunavanje veličine mjerne varijable korigovane za uticaje smetnji na nivou senzora ili transducer-a, bez korištenja kalibracionih koeficijenata u centralnom računaru,
- digitalni izlaz umjesto analognog,
- identifikacija senzora ili transducer-a,
- mogućnost prenosa signala i komuniciranje sa računarskim sistemom ili računarskom mrežom,
- integracija svih dodatnih funkcija (samodijagnostika, kalibracija, itd).

## 5.7 DIGITALNI MJERNI PRETVARAČI

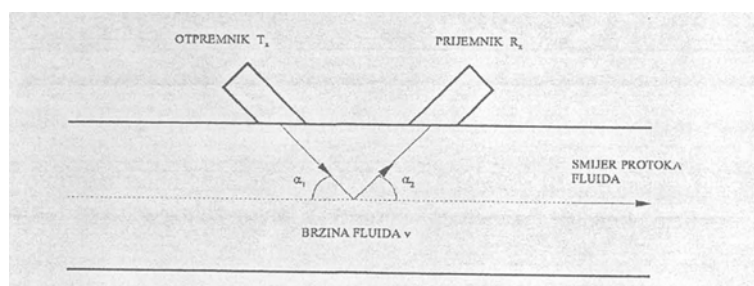
### 5.7.1 Uvod

U prethodnim razmatranjima u ovom poglavlju, radilo se o mjerenju prirodnih fenomena tj. varijabli stanja, koje su bile analogne veličine. Ovdje će biti govora o mjerenju onih varijabli stanja čiji je reprezentent digitalna veličina ili je analogna veličina pretvorena u digitalnu, pa prenesena na daljinu, i opet konvertovana u analognu.

Idealni transducer mogao bi mjeriti prirodni fenomen, tj. varijablu stanja i proizvoditi i davati na svom izlazu binarni ili binarno kodirani decimalni (BCD) broj. Bazično, ovakav transducer mjeri pomjeraj, ali može biti upotrebljen da mjeri silu, pritisak, nivo itd., korištenjem analognih mehaničkih translatora kretanja. Primjer za ovo je digitalni enkoder. Enkoder je, u stvari, oprema koja obezbjeđuje kodiranje. Kodiranje je uvođenje sistema simbola ili bita za predstavljanje podatka o nekoj veličini. Ovdje se daje primjer digitalnog davača protoka na bazi transitnog vremena, gdje je frekvencija srazmjerna protoku fluida.

### 5.7.2 Mjerenje protoka na bazi Doppler-ovog efekta

Korištenje Doppler-ovog efekta često se primjenjuje za mjerenje brzine fluida i dobijanje odgovarajuće frekvence koja je srazmjerna brzini fluida tj. protoku. Na slici 5.24 dat je Doppler-ov davač protoka.



SI. 5.24 Doppler-ov davač protoka

Ako je  $f_T$  frekvencija ultrazvuka koji emituje otpremnik  $T_x$ , tada će frekvencija primljenog ultrazvučnog talasa  $f_R$  biti,



$$f_R = f_T \left( 1 - \frac{v}{c} \cos \alpha_1 + \frac{v}{c} \cos \alpha_2 \right) \quad (5.25)$$

gdje je:  $v$  - brzina tečenja fluida,

$c$  - brzina prostiranja ultrazvučnog talasa kroz fluid čiji se protok mjeri.

Doppler-ov pomjeraj frekvencije  $f_D$  je tada

$$f_D = f_R - f_T = f_T \frac{v}{c} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) = kv \quad (5.26)$$

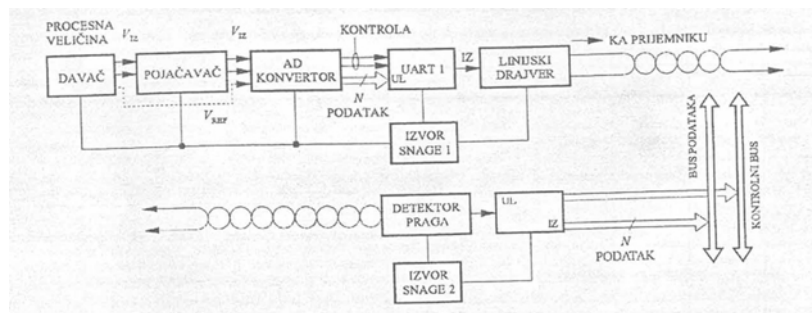
gdje je:  $k = \frac{f_T}{c} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)$  - konstanta.

Uvođenje ove frekvencije u računar preko frekventnog ulaza nije nikakav problem.

### 5.7.3 Digitalni mjerni pretvarači

Mada analogni mjerni pretvarač (transmitter) zadovoljava u mnogim standardnim primjenama, on ima i neka svoja ograničenja obzirom na udaljenost na koju se može prenijeti analogni strujni signal, uticaj šumova na prenosnu liniju, common-mode napona koji je posljedica uzemljivanja nekih davača, itd. Korištenjem digitalnog transmitera, mnogi od pomenutih problema mogu biti prevaziđeni

Principijelna šema digitalnog transmitera, zajedno sa otpremnikom i prijemnikom, data je na slici 5.25, [16].



Sl. 5.25 Digitalni mjerni pretvarač

Naponski signal iz davača, nakon što se pojača u pojačavaču, vodi se u analogno-digitalni konvertor, gdje se vrši pretvaranje u digitalni signal. Ovakav digitalni signal koji je paralelan, putem univerzalnog asinhronog prijemnika - otpremnika (Universal Asynchronous Receiver Transmitter - UART1) pretvara se u serijski podatak, koji se onda kao niz bita prenosi prenosnom linijom prethodno pojačan u linijskom drajveru. Detektor praga (komparator) u prijemniku, rekonstruiše binarne podatke koji u jednom određenom nizu čine preneseni podatak. UART2 vrši konverziju serijskog podatka u paralelni, koji se direktno može voditi u računar ili druge digitalne sisteme. Ako se želi digitalno pokazivanje, onda se koristi UART koji ima tri heksadecimalna izlaza, mogućnost polariteta i prekoračenja.

## 8. Distribuirani sistemi upravljanja

### 8.1 Uvodna razmatranja

Pod tehnološkim procesom podrazumijeva se, u naširem smislu, transformacija energije ili materijala iz jednog oblika u drugi s određenom namjenom. Tehnološki procesi po tipu odvijanja transformacije mogu biti kontinualni i šaržni. Najvažniji tehnološki i industrijski procesi su: petrohemijski, hemijski, toplotni, proizvodnja energije itd.

Fizički gledano, upravljanje procesa uključuje ventile za regulaciju protoka tečnosti ili gasova, grejne elemente za regulaciju temperature, procesne posude i drugu sličnu opremu kojom se manipuliše materijom i njenim fizičkim veličinama i parametrima.

U slučaju velikih i složenih tehnoloških procesa broj veličina i parametara koje direktno treba mjeriti, regulisati i upravljati toliko je velik da je potrebna neka forma nadgledanja pojedinačnih, lokalnih, regulatora u cilju povećanja efikasnosti upravljanja. pri tome grupe tehnoloških cjelina ili procesa mogu biti prostorno, geografski, udaljene.

Ovakvim procesima koji su geografski razučeni, a koji sa aspekta nivoa upravljanja zahtijevaju sve nivoe upravljanja (direktno upravljanje, regulaciju, nadgledanje, optimizaciju i koordinaciju) ne može se upravljati na zadovoljavajući način korištenjem centralizovanog sistema upravljanja jer ovaj nije dovoljno fleksibilan i pouzdan.

### 8.2 Mogućnost rješenja problema distribuiranog upravljanja

Jedan od pristupa rješavanja problema distribuiranog upravljanja je da se sistem upravljanja može posmatrati kao dual pripadajućeg procesa upravljanja tj. upravljanog sistema. Iz ove ideje se izvela definicija distribuiranog upravljanja:

Distribuirano upravljanje je takvo upravljanje koje omogućava upravljanje procesa ili postrojenja, tako što se oni podjele u nekoliko tehnoloških cjelina sa gledišta upravljanja i odgovornosti u tehničko-tehnološkom i informacionom smislu, pri čemu je svaka cjelina upravljana sopstvenom upravljačkom strukturom ili regulatorom. Pri tome, sve upravljačke strukture (operativne stanice ili procesne stanice), međusobno komuniciraju preko komunikacionih medija raznih vrsta.

Ovakva definicija potiče od vremena kada je važio moto: " veći tehnološki proces, veći sistem upravljanja ", što je dovelo do povećanja komandnih sala i ožičenja, pa time i poskupljenja sistema upravljanja i smanjenja njihove pouzdanosti.

Realizacija ovakvog koncepta upravljanja moguća je na jedan od načina:

1. Korišćenjem pojedinačnih regulatora putem individualnog povezivanja svakog regulatora sa procesom,
2. Upotrebom centralnog procesnog računara koji radi u raspodjeljenom vremenu obavljajući određene zadatke upravljanja korištenjem jedinstvenih podataka,
3. putem distribuiranog sistema upravljanja koji je kombinacija mogućnosti pod 1. i 2.

Načini 1. i 2. ne zadovoljavaju potrebe pouzdanosti i performansi upravljanog sistema zato se koristi treći način.

Treći način realizacije sadrži sve pozitivne rezultate razvoja mikroprocesora i kola visokog stepena integracije i mogućnosti konfigurisanja distribuiranog sistema upravljanja korištenjem komunikacionog podsistema unutar sistem upravljanja.

Ovakvom konceptu razvoja u oblasti upravljanja složenih procesa doprinio je i:

- razvoj i pojava teoretskih rezultata i modifikacija dobro poznatih teoretskih metoda za primjenu u raznim industrijskim procesima,
- razvoj raznih algoritama softwer-skih paketa,
- razvoj digitalnog hardwer-a koji omogućava veliku moć procesiranja, veliku brzinu prenosa podataka kroz SAU, i izradu inteligentnog operatorskog interface-a,
- razvoj softwer-a koji uključuje moćne operacione sisteme u realnom vremenu i programske jezike visokog nivoa.

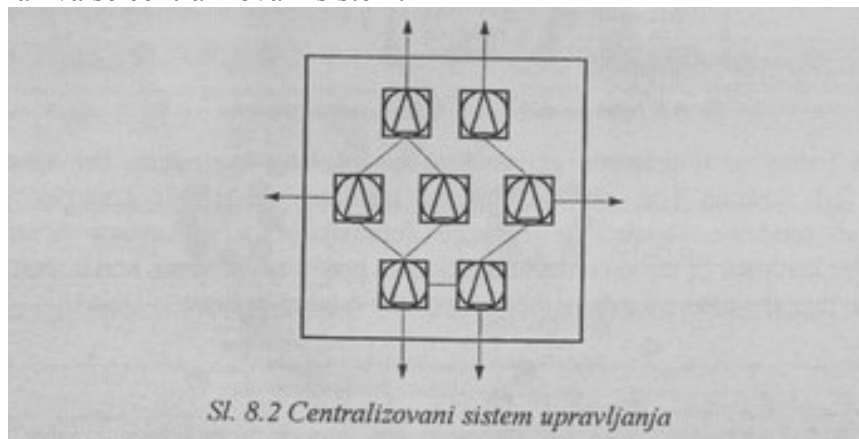
### 8.3 Topološke strukture distribuiranih SAU

Da bi se na jedinstven način izvršio prikaz različitih topologija DSAU usvojićemo skup grafičkih simbola sa sledećim značenjem:

- funkcija **automatizacije**, koja u sebi sadrži funkcije regulacije, upravljanja i akvizicije,
- funkcija **vođenja** koja u sebi sadrži funkcije nadzora, opsluživanja i koordinacije rada kako pojedinih delova procesa i procesa u celini, tako i procesu pridruženih sredstava automatizacije koja obavljaju naprijed pobrojane funkcije automatizacije,
- funkcije **upravljanja komunikacijom**, koja omogućuje da veći broj učesnika u komunikaciji vrši razmenu informacija posredstvom jedinstvenog komunikacionog podsistema,
- funkcija **optimizacije** koja se u postojećim sistemima fizički odvaja od funkcije vođenja i izvršava se u posebnom računaru,
- **informacioni**, odnosno **izvršni organi** koji su u kontaktu sa upravljanim procesom.

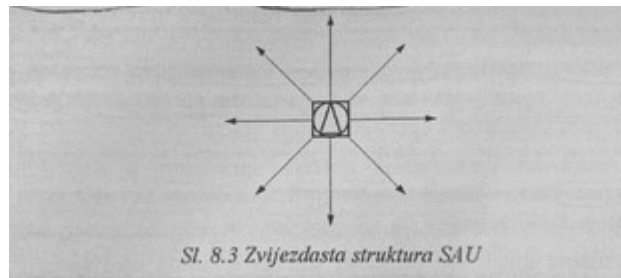
#### 8.3.1 Neke topološke strukture DSAU

Klasičan sistem automatizacije, strukturno gledano, zvjezdaste strukture, koju karakteriše vremenski paralelan rad komponenti, prostorna centralizacija i totalna funkcionalna decentralizacija ( slika 8.2 ). Pri tome, jedna funkcionalnost zahtjeva prisustvo jednog uređaja . Ovakav sistem naziva se centralizovani sistem.



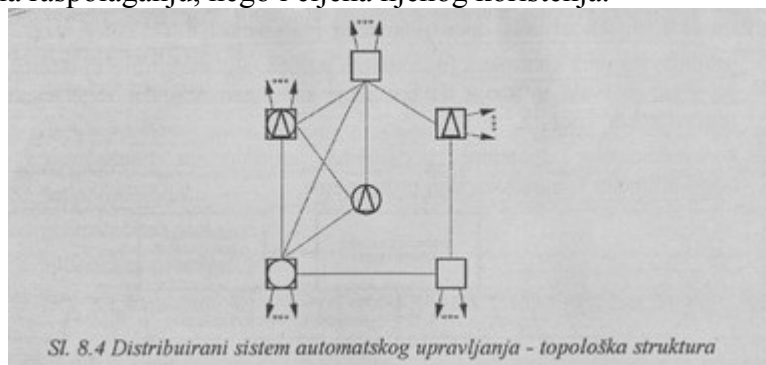
Sl. 8.2 Centralizovani sistem upravljanja

Kada se koristi direktno digitalno upravljanje primjenom procesnog računara, tada se ima potpuna centralizacija, struktura je zvjezdasta, a sve funkcije odvijaju se na jednom mjestu tj. u procesnom računaru ( slika 8.3 ). Ovi sistemi su nepouzdana jer kada otkaže procesni računar sve funkcije koje je on ostvarivao prestanu da budu ostvarivane.



Da bi se prevazišao problem smanjene pouzdanosti došlo se na ideju da se primjene DSAU. Drugi motiv ogleđa se u težnji da se SAU prilagodi procesu upravljanja. Treći motiv za razvoj i promjenu DSAU treba tražiti u razvoju tehnologije proizvodnje mikroprocesora i mikroročunara, koji je doveo do naglog pada cijene hardver-a, što je sve omogućilo realizaciju koncepta distribuiranog upravljanja

DSAU koji treba da ispuni zahtjeve koje nameće proces upravljanja, po svojoj strukturi svojevrsna je kopija ( ogledalna slika ) procesa upravljanja. Razmjena informacija, odnosno komuniciranje između pojedinih dijelova sistema, obavljalo bi se komunikacionim linijama koje odgovaraju informacionim tokovima procesa. U ovakvom sistemu problem komunikacije i njene organizacije postaje dominantan. Nisu u pitanju samo sredstva koja za realizaciju komunikacije stoje na raspolaganju, nego i cijena njenog korištenja.



Mada na strukturu distribuiranih sistema utiče još čitav niz faktora, kao što su funkcionalna moć pojedinih njegovih dijelova, način organizacije vođenja, optimizacija, problem redundance, itd., struktura se prvenstveno javlja kao kompromis između zahtjeva koje nameće proces i zahtjeva za adekvatnom komunikacijom. Na slici 8.4. data je opšta strukturna šema DSAU.

### 8.3.2 Distribuirani sistem upravljanja - opšti opis

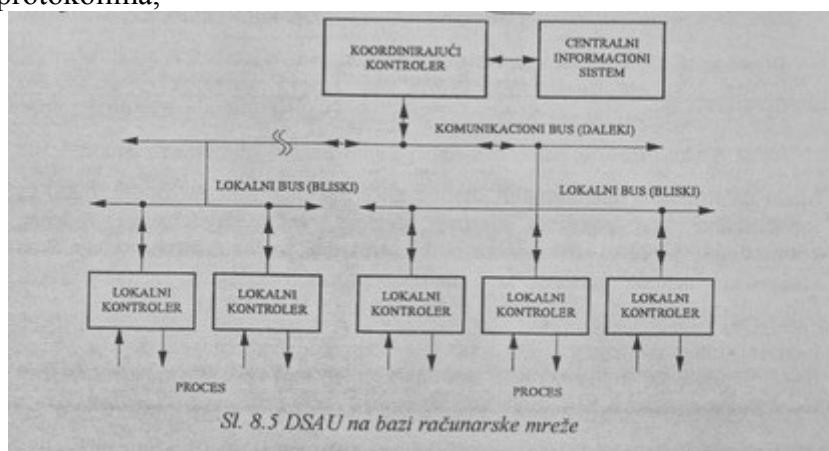
Distribuirani sistem automatskog upravljanja može biti projektovan po mjeri primjene, za specifičnu klasu procesa , ili na bazi distribuirane računarske mreže čija se topologija određuje u skladu sa topologijom upravljanog procesa. Pri tome, on objedinjuje geografski i funkcionalno odvojenu opremu, uključujući i ulazno-izlazni podsistem, u jedinstven sistem upravljanja, kroz digitalni komunikacioni podsistem. Ovako realizovani sistem upravljanja ima dvije značajne prednosti:

- moguće je realizovati funkcionalna rješenja upravljanja u hijerarhijskoj ili modularnoj formi,
- rezultirajući sistemi imaju sve prednosti sistema lokalnog upravljanja i većinu prednosti centralizovanog upravljanja.

#### 8.3.2.1 Komponente DSAU na bazi računarskih mreža

Distribuirani sistem automatskog upravljanja na bazi računarskih mreža sastoji se od:

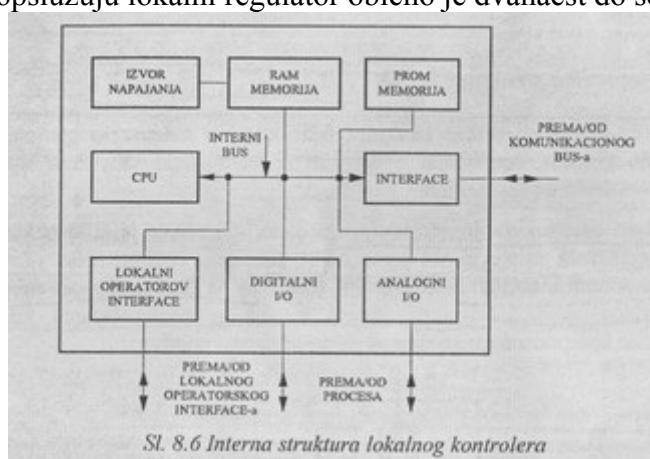
1. nekoliko lokalnih kontrolera ( operativnih stanica, automatizirajućih stanica ), od kojih je svaki u stanju da opslužuje simultano nekoliko regulacionih ( upravljačkih ) kontura,
2. komunikacionog digitalnog podsistema, zajedno sa hardwer-om i odgovarajućim komunikacionim protokolima,



3. najmanje jednog koordinirajućeg kontrolera ( nadzorne stanice ),
4. centralnog informacionog sistema, i operatorskog interfece-a koji takođe može biti distribuiran na svakom nivou ( lokalni, nadzorni, centralni ).

Tipičan DSAU na bazi računarske mreže dat je na slici 8.5.

Tipična interna struktura šema lokalnog kontrolera (operativne stanice, automatizirajuće stanice.), data je na slici 8.6. Obično sadrži regulacione i upravljačke (sekvencijalne ) algoritme koji se ostvaruju software-ski obradom odgovarajućih ulaznih signala i podataka generišući izlazne upravljačke signale koji se koriste za pokretanje izvršnih organa. Broj zatvorenih kontura koje opslužuju lokalni regulator obično je dvanaest do šesnaest.



Na slici 8.7. date su u grupama glavne funkcije lokalnog kontrolera. Pri tome, lokalni kontroler može biti kontroler koji dominantno ostvaruje regulacione funkcije ( upravljanje u zatvorenoj konturi ), sekvencijalni kontroler ili samo uređaj koji prikuplja podatke o procesu, kondicionira ih i pretvara u digitalni oblik tako da se mogu koristiti u ostelim djelovima DSAU.



Kod projektovanja ili specifikiranja lokalnog kontrolera ( operativne stanice, automatizirajuće stanice ) neki od glavnih parametra i funkcija moraju biti poznati i to:

- maksimalan broj regulacionih kontura koje mogu biti konfigurisane,
- opseg mogućih perioda semplovanja,
- tipovi i nivoi ulaznih/izlaznih signala,
- zahtjevani stepen lokalne autonomije,
- način lokalnog vođenja,
- stepen samodijagnostike, redundance i samopopravke,
- stepen jednostavnosti radi korištenja neekspertnog osoblja,
- repertoar upravljačkih algoritama i ostalih algoritama,
- stepen standardizacije i modularnosti hardwer-a i softwer-a, unutar kontrolera i između kontrolera,
- tip komunikacionog podsistema ( hardwer, protokoli, brzina, itd. ) između kontrolera i drugih dijelova sistema,
- dopustiva greška u prenosu podataka između dva kontrolera, itd.

Topologije sistema i protokoli za prenos podataka određeni su karakterom DSAU tj. procesom koji treba da bude upravljani. U DSAU neophodno je da raznovrsna oprema međusobno komunicira, koja je i fizički međusobno udaljena, i da obavlja mnoge funkcije u cilju ostvarivanja algoritama upravljanja. Tada je neophodan odgovarajući podsistem koji treba da organizuje komuniciranje, uzimajući u obzir prioritet poruka, zahtjeve na konfliktne situacije u informacionom smislu, brzinu prenosa podataka unutar sistema ( i između čvorova ), pouzdanost i tačnost prenosa podataka itd. Skup pravila koji omogućava komuniciranje unutar DSAU naziva se protokol.

Kod sabirničke ( bus ) strukture, svi čvorovi spojeni su na zajedničku sabirnicu. Ova topologija je dosta robusna u slučaju da dođe do fizičkog prekida bus-a. U zavisnosti od toga gdje dođe do prekida, moguće je da sistem pod određenim uslovima nastavi da radi u autonomnim dijelovima.

Zvezdasta struktura nije mnogo povoljna za primjene u upravljanju jer, ispadom centralnog čvora dolazi do ispada čitavog sistema, a ostaju da funkcionišu samo periferni dijelovi sistema.

Od svih struktura, bus topologija je najpovoljnija i ona je realizirana kroz razne komercijalne komunikacione sisteme.

Protokol je skup pravila koji omogućava komuniciranje unutar pojedinog DSAU. Internacionalna organizacija za standarde ( ISO ) preporučuje strukturu protokola koja omogućava otvoreno povezivanje sistema sa sedam nivoa tj. slojeva. Ti nivoi su od najnižeg prema najvišem kako slijedi:

1. fizički nivo protokola,

2. data link protokol,
3. mrežni protokol,
4. transportni protokol,
5. sesioni protokol,
6. prezentacioni protokol,
7. aplikacioni protokol.

Nivoi 1,2,3 i 4 nazivaju se otpremni nivoi, a nivoi 5,6 i 7 prijemni, tj. korisnički nivoi.

Fizički nivo protokola 1. definiše električno i mehaničko povezivanje na fizikalne medije, uključujući hardware kao što su modemi, I/O vrata, komunikacione linije, konektori, itd.

Glavni zadatak protokola na drugom nivou je detekcija i korekcija greške te osiguranje sekvencijalnog prenosa podataka.

Treći nivo, mrežni protokol, definiše puteve prenosa, adrese i puteve prenosa poruka. Takođe omogućuje detekciju kvara prenosne linije ili otkaza čvora, te obezbeđuje alternativne puteve prenosa poruka što zavisi od topologije sistema.

Transportni protokol omogućuje pouzdanu razmenu podataka, daljinsko rutiranje, usmjeravanje poruka, određivanje prioritetne strukture, proveru tačnosti prenosa poruka, itd.

Peti nivo protokola povezuje transportni nivo na logičke funkcije ka operativnom sistemu.

Prezentacioni nivo, šesti nivo, omogućava ostvarivanje raznih prezentacionih funkcija kao što je opsluživanje raznih pokazivača, printera, upravljačkih panela, tj. dozvoljava dekodiranje prenešenih podataka preko komunikacionog medija i njihovu prezentaciju u podesnoj formi. Sedmi, aplikacioni, nivo objezbeđuje menadžment funkcije sekvencijalno upravljanje, direktno digitalno upravljanje, tj. raspodjelu resursa sistema.

Da bi svi podsistemi DSAU tj. svi resursi DSAU obavljali svoje funkcije, neophodno je korištenje software koji se naziva operativni sistem. Operativni sistem je program koji upravlja izvršenjem niza zadataka u računarima DSAU, alocirajući raspoložive resurse na odgovarajući način.

## 9. AKTUATORI I IZVRŠNI ORGANI

### 9.1. UVODNA RAZMATRANJA

Izvršni organ je element direktne grane SAU kojim se neposredno mijenja izvršna (upravljачka) vlast. Obično, izvršni organ mijenja intenzitet toka energije ili materijala kroz objekat upravljanja u cilju dostizanja određenih performansi.

Za pokretanje izvršnih organa mehaničkog tipa koristi se izvršni mehanizam mehaničkog tipa koji se kratko naziva aktuator, koji obezbjeđuje zahtjevanu snagu. Postoje razni vidovi aktuatora, što sve zavisi od prirode izvršnog organa koji pokreću, tipa energije koju koriste za svoj rad, tipa upravljačkog signala itd. Pozicioni aktuatori često se zovu i servomotori koji pozicioniraju izvršne organe, npr. manipulativnu polugu kod regulacionog ventila. Servomotori se mogu posmatrati kao konvertori jednog vida energije koji je obično niskog nivoa, u drugi vid energije koji je obično visokog nivoa, a koji je neophodan za uspješno pokretanje izvršnog organa.

Takođe, aktuatori se mogu posmatrati i kao generatori sile ili momenta. Sila ili momenat mogu se izraziti kao proizvod  $F(p)I$ , gdje je  $F(p)$  – racionalni operator, a  $I$  – standardni ulazni signal srazmjeran signalu upravljanja malog energetskog nivoa. U operatoru  $F(p)$  sadržan je zakon preslikavanja ulazne veličine  $I$  u izlaznu veličinu, stanje servomotora, kao i pojačanje servomotora.

Rezultat dejstva sile servomotora na izvršni organ je kretanje izvršnog organa koje može biti karakteristično pomakom (pozicijom), brzinom, ubrzanjem, itd. U tom slučaju, servomotori se mogu smatrati kao izvori kretanja sa određenom unutrašnjom otpornošću.

U svim linearnim sistemima pod otporom, uslovno se definiše odnos ulaznog i izlaznog signala, koji zavisi od elemenata linearnog sistema. Od dvije moguće analogije u elektromehaničkim sistemima: napon – sila i napon – brzina, druga analogija češće se primjenjuje.

Mehanički otpor može se razmatrati kao odnos brzina/sila (ili momenat), tj.

$$Z_M = \left( \frac{\Omega_M}{C_M} \right) \quad (9.1)$$

gdje je:  $\Omega_M$  – maksimalna ugaona brzina,  
 $C_M$  – obrtni momenat pri ugaonoj brzini jednakoj nuli.

Za električne motore bitne su dinamička i statička karakteristika motora. To je obično zavisnost – momenat u funkciji brzine za razne nivoe upravljačkog signala, o čemu će kasnije u odjeljku 1.3 biti više govora.

### 9.2. REGULACIONI VENTILI

U zavisnosti od objekta upravljanja, tj. upravljačke (manipulativne) varijable zavisi i tip izvršnog organa. Kod objekata upravljanja u procesnoj industriji (tehnološki procesi) najčešći izvršni organi su ventili, klapne, leptirice, zasuni, itd. kada je protok – manipulativna varijabla



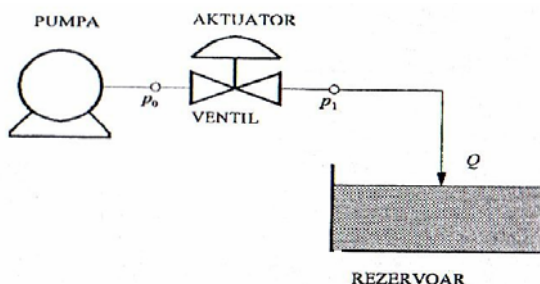
nosilac energije kroz objekat upravljanja. Ako je npr. upravljačka varijabla električna snaga tada izvršni organ može biti elektromehanička sklopka, tiristor(i), tranzistor, itd. S obzirom da je problematika izvršnih organa tretirana u širokoj literaturi, ovdje će biti precizirani samo tipični predstavnici izvršnih organa.

## 9.2.1. Regulatorni ventili

Kada je manipulativna varijabla protok, tada se za regulisanje protoka kroz upravljani objekat koristi regulatorni ventil, koji u zavisnosti od radne tačke, tj. protoka ima određeno pojačanje i linearnost. Kod izbora ovih parametara karakteristike fluida koji protiče kroz regulatorni ventil moraju biti uzete u obzir. Osnovni parametri i veličine koje definišu regulatorni ventil su: koeficijent protoka  $K_V$ , statička karakteristika, protočna karakteristika, nominalni otvor  $NO$ , i nominalni pritisak  $NP$ . Nominalni otvor definisan je u  $mm$ , a nominalni pritisak u barima što je odgovarajućim standardima sankcionisano.

### 9.2.1.1 Koeficijent protoka

Biće razmotren turbulentni protok fluida u sistemu koji sadrži pumpu koja obezbjeđuje protok fluida kroz otvoreni ventil, slika 9.1.



Slika 9.1. - Mjerenje parametara ventila

Neka je fluid obična voda temperature  $15^0\text{ C}$ , a pritisak na izlazu pumpe  $p_o$  pri protoku  $Q$ . Voda prolazi kroz ventil i dolazi u rezervoar sa konstantnim pritiskom  $p_i$ . Pritisak  $p_o$  raste kao funkcija brzine pumpe. Ako se protok  $Q$  izrazi kao

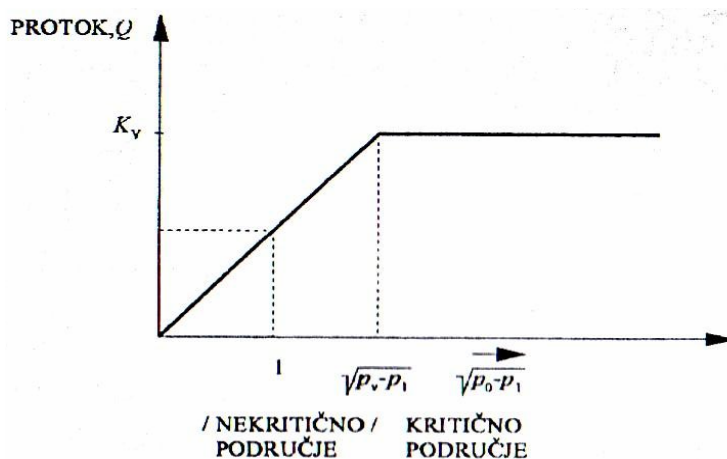
$$Q = K_V \sqrt{p_o - p_i} \quad (9.2)$$

tada, koeficijent protoka  $K_V$ , definisan kao protok vode pri  $15^0\text{ C}$  u kubnim metrima na sat kroz ventil kada je ventil potpuno otvoren i kada je razlika pritiska ispred i iza ventila 1 bar, može se izraziti sljedećom relacijom

$$K_V = \frac{1}{\sqrt{1000}} \sqrt{dQ_M} / \sqrt{\Delta p_M} \quad (9.3)$$

gdje je:  $Q_M$  – volumetrijski protok kroz potpuno otvoren ventil, [ $m^3h^{-1}$ ],  
 $d$  – specifična težina vode pri temperaturi od  $15^0\text{ C}$ ,  
 $\Delta p_M$  – pad pritiska na potpuno otvorenom ventilu, u barima.

Jednačina (9.3) važi samo za protoke bez pojave kavitacije i vaporizacije i kada je nominalni otvor cjevovoda do ventila i iza ventila jednak nominalnom otvoru ventila. Na slici 2. dat je dijagram protoka u funkciji  $\sqrt{p_o - p_i}$ .



Slika 2. – Karakteristika  $Q = f(\sqrt{p_0 - p_1})$

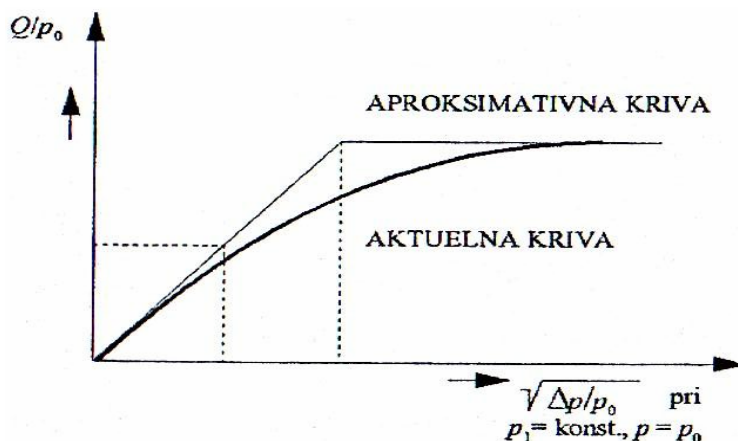
Kriva na slici 9.2. je horizontalna u području kritičnog protoka  $Q_C$ ; za  $p_0 > p_v$ , gdje je  $p_v$  pritisak zasićene pare, protok kroz ventil  $Q_C$  je konstantan. Pri tome, smatra se da je  $p_1$  konstantan.

Sada će biti razmoren fizikalni fenomen u ventilu. Brzina nekompresibilnog fluida poraste kada se presjek cjevovoda smanji budući da protok ostaje konstantan.

Kada se suma kinetičke i potencijalne energije ne mijenja gubitak pritiska troši se na povećanje brzine. Kada dijametar cjevovoda postaje veći, brzina fluida opada i pritisak se lokalno restaurira (povećava). Dio pritiska koji se ne restaurira konvertuje se u internu energiju kroz gubitke.

Pod specifičnim uslovima, vrijednost minimalnog pritiska može dostići vrijednost pritiska zasićene pare. Mjehurići koji se tako formiraju u fluidu manifestuju se kao porast pritiska u fluidu. Vrlo veliki porast pritiska formirajući se u fluidu, dovodi do erozije zidova ventila, što dovodi do destrukcije samog ventila. Ova pojava naziva se kavitacija, i može se izbjeći ograničavanjem maksimalnog pada pritiska  $\Delta p_M$  u jednačini (9.3).

Za gasove, varijacija  $Q$  u funkciji pada pritiska  $\Delta p$  data je na slici 9.3. ova zavisnost veoma je slična zavisnosti za nekompresibilne fluide, slika 9.2, izuzev što je prelaz sa karakteristike sa nagibom na karakteristiku bez nagiba drugačiji.



Slika 9.3. – Protok gasa u finkciji pada pritiska

Koeficijent protoka za gasove definisan je kao

$$K_V = \frac{Q_M}{N p_o \gamma} \sqrt{\frac{M T_o Y Z}{r}} \quad (9.4)$$

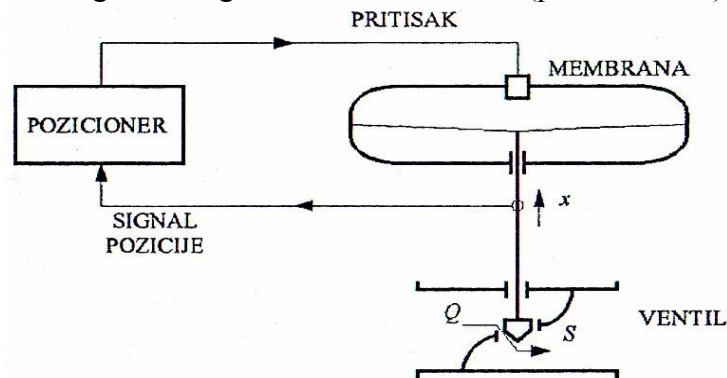
gdje je:  $Q_M$  – zapreminski protok,  $m^3/h$ ,  
 $N$  – bezdimenzionalna konstanta koja uzima u obzir dimenzije,  
 $P_o$  – ulazni apsolutni pritisak,  $Kpa$ ,  
 $M$  – molekularna masa protočnog fluida,  
 $T_o$  – ulazna apsolutna temperatura,  $K$ ,  
 $r$  – odnos diferencijalnog pritiska prema ulaznom pritisku.

Za nekompresibilne fluide, kritični protok  $Q_C$  javlja se radi isparavanja fluida koji ekspandira u ventilu. Za kompresibilne fluide, kritični protok rezultira iz drugih fenomena. Kada brzina dostigne lokalnu brzinu zvuka, javljaju se diskontinuiteti (šok talasi) u protoku fluida. Takvi šok talasi uzrokuju vibracije i šumove u okolini ventila. U nekim radnim uslovima nivo šumova može dostići i 110  $dB$ . Prateće vibracije mogu u tom slučaju da izazovu velike tehnološke i fiziološke štete.

Radi sprječavanja ovih pojava preduzimaju se razne mjere, kao što je upotreba akustičnih apsorbera, podjela protoka na manje protoke, itd.

### 9.2.1.2. Bazna/konstruktivna karakteristika

Na slici 4. data je skica regulacionog ventila sa aktuatorom (pozicionerom) pneumatskog tipa.



Slika 9.4. – Regulacioni ventil sa pozicionerom:  $x$  – pomak manipulativnog vretena ventila,  $Q$  – protok fluida,  $S$  – propusni presjek ventila, protočna površina,  $u$  – upravljački signal

Funkcionalna zavisnost protočne površine  $S$  od pomaka manipulativnog vremena  $x$  data izrazom

$$S = f(x) \quad (9.5)$$

naziva se **bazna** ili **konstruktivna karakteristika**, a ventil koji ima takvu karakteristiku **regulacioni** ventil.

Promjenom protočne površine  $S$  sa pomakom manipulativnog vretena mijenja se protok  $Q$ , a time i reguliše protok materijala ili energije kroz upravljani objekat.

Tip funkcionalne veze  $f(.)$  definiše konstruktivnu karakteristiku. Najčešće susretane konstruktivne karakteristike su:

### 1. LINEARNA

Kod ove karakteristike je

$$\frac{d(S/S_M)}{d(x/x_M)} = K \quad (9.6)$$

Nakon integracije (9.6) ima se da je linearna konstruktivna karakteristika opisana relacijom

$$\bar{S} = K\bar{x} + K_1 \quad (9.7)$$

gdje je:  $\bar{S} = S/S_M$  - normalizirana protočna površina,

$S_M$  - maksimalna protočna površina,

$\bar{x} = x/x_M$  - normalizovani pomjeraj manipulativnog vretena.

Vrijednosti za  $K$  i  $K_1$  određuju se na osnovi početnih uslova za  $S/S_M$  pri  $\bar{x} = 0$ , i  $S/S_M$  pri  $\bar{x} = 1$ .

Veoma važan parametar regulacionog ventila je dijapazon promjene protočne površine, tj.

$$R = \frac{S_M}{S_m} \quad (9.8)$$

gdje je:  $S_m$  - minimalna protočna površina kod koje je protok  $Q$  još vidljiv.

Površina  $S_m$  često se zove i površina curenja.

To je površina koja odgovara vrijednosti  $\bar{x} = 0$ , tj. poziciji  $x$  koja odgovara zatvorenom ventilu u smislu pomjeraja manipulativnog ventila, ali ne i u smislu protočne površine  $S$ .

### 2. RAVNOPROCENTNA (EKSPONENCIJALNA)

Kod ove karakteristike ventila varijacija pozicije manipulativnog vretena daje istu varijaciju protočne površine, što se može napisati u diferencijalnoj formi

$$\frac{d\left(\frac{S}{S_M}\right)}{d(x/x_M)} = K \left(\frac{S}{S_M}\right) \quad (9.9)$$

Nakon integracije (9.9), izraz za konstruktivnu karakteristiku je

$$\bar{S} = \frac{e^{k\bar{x}}}{k_1} \quad (9.10)$$

gdje je:  $k_1$  - konstanta integracije.

Vrijednosti za  $k$  i  $k_1$  određuju se iz konturnih uslova, tj. definišu se protočne površine za  $\bar{x} = 0$  i  $\bar{x} = 1$ .

### 3. HIPERBOLNA KARAKTERISTIKA

Relacija koja opisuje konstruktivnu karakteristiku u diferencijalnom obliku je u ovom slučaju opisana sa

$$\frac{d(\bar{S})}{d\bar{x}} k\bar{S}^2 \quad (9.11)$$

Nakon integracije (9.11) dobija se izraz za konstruktivnu karakteristiku

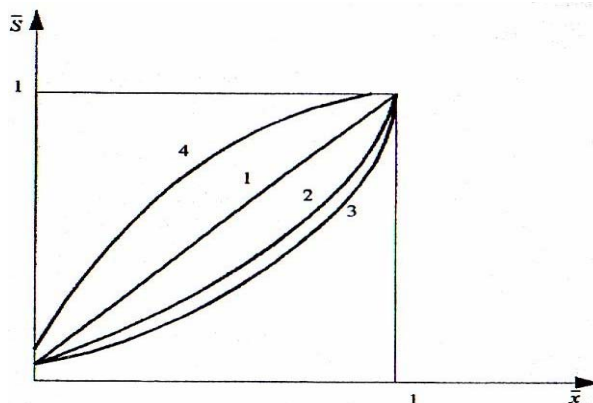
$$\bar{S} = -\frac{1}{k\bar{x} + k_1} \quad (9.12)$$

Neka je za  $\bar{x} = 0$ ,  $\bar{S} = 0,02$  i za  $\bar{x} = 1$ ,  $\bar{S} = 1$ , tada se ima da je statička karakteristika

$$\bar{s} = \frac{1}{50 - 49\bar{x}} \quad (9.13)$$

Pored ovih karakteristika postoje i druge, ali su linearna i ravnoprocenatna karakteristika, najčešće susretane u tehničkoj praksi.

Na slici 9.5. grafički su prikazane konstruktivne karakteristike.



Slika 9.5. – Konstruktivne karakteristike regulacionih ventila: 1. Linearna; 2. Eksponencijalna; 3. Hiperbolna; 4. Korijenska

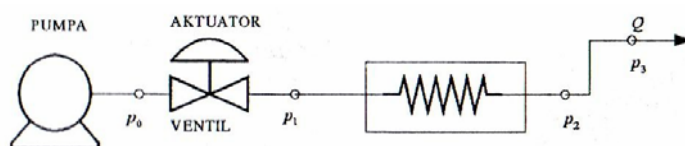
### 9.2.1.3. Protočna karakteristika

Funkcionalna zavisnost protoka  $Q$  od položaja manipulativnog vretena  $x$  naziva se statička ili protočna karakteristika regulacionog ventila. Izbor regulacionog ventila koji najbolje odgovara datom sistemu zavisi od njegovog koeficijenta protoka  $K_V$ . Neophodno je znati vrijednost maksimalnog protoka  $Q_M$  i pada pritiska  $p_M$  na potpuno otvorenom ventilu u radnim uslovima – tj. u slučaju kada je regulacioni ventil dio industrijskog sistema koji treba da bude upravljani. Protočna karakteristika opisana je relacijom

$$\bar{Q} = f(\bar{x}) \quad (9.14)$$

gdje je:  $\bar{Q} = \frac{Q}{Q_M}$  - normalizovani protok.

Određivanje relacije (9.14) biće urađeno na primjeru sistema sa fiksnim padom pritiska, slika 9.6.



Slika 9. 6. – Sistem sa fiksnim padom pritiska;  $p_2 - p_3$  – statički pad pritiska između izlaza procesa i izlaza,  $p_0$  – pritisak pumpe

Dinamički pad pritiska generisan protokom kroz proces može se izraziti kao

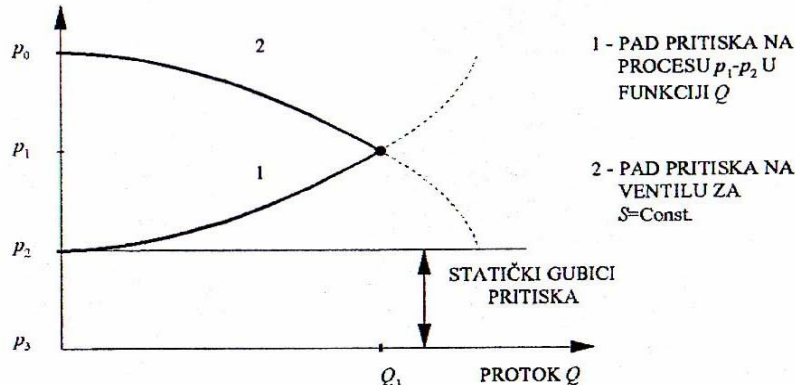
$$p_1 - p_2 = KQ^2 \quad (9.15)$$

gdje je:  $K$  – protočni koeficijent koji zavisi od strukture procesa.

Pad pritiska na regulacionom ventilu genesrisan promjenljivom protočnom površinom ventila dat je izrazom

$$p_1 - p_2 = K' (S_M/S)^2 Q^2 \quad (9.16)$$

Podjela pada pritiska u sistemu sa slike 9.6. data je na slici 9.7.



Slika 9.7. – Raspodjela pada pritiska

Slika 9.7. predstavlja krive padova pritiska u funkciji protoka  $Q$  kroz sistem. Pritisak  $p_o - p$  dodat je na statički pritisak, a  $p_1 - p_2$  oduzet je od  $p_o$ .

Neka bude razmotren izraz  $\frac{Q}{Q_M}$  u funkciji  $S/S_M$ .

Polazeći od toga da je  $Q_1$  sa dijagrama 9.7. maksimalni protok kroz ventil, izabrani ventil mora ispuniti sljedeće uslove:  $Q_M = Q_1$  i  $\Delta p_M = p_o - p_{1M}$ , a protočni koeficijent je

$$K_V = \frac{1}{\sqrt{1000}} \sqrt{dQ_1} / \sqrt{p_o - p_{1M}} \quad (9.17)$$

Maksimalni pritisak  $p_{1M}$  je

$$p_{1M} = p_2 + KQ_1^2 \quad (9.18)$$

Polazeći od relacija (1.15), (1.16), (1.18) i činjenice da je na osnovi (1.16) za  $S = S_M$ ,  $Q = Q_M$ , te

$$p_o - p_{1M} = K'(1)^2 Q_M^2 \quad (9.19)$$

može se napisati sljedeća relacija za normalizacioni protok  $Q/Q_M$

$$\left( \frac{Q}{Q_M} \right)^2 = \frac{K + K'}{K + K' * (S_M/S)^2} = \frac{(K + K')(S/S_M)^2}{K(S/S_M)^2 + K'} \quad (9.20)$$

Ako se definiše koeficijent  $\alpha$  kao

$$\alpha = \frac{\text{pad pritiska na potpuno otvorenom ventilu}}{\text{pad pritiska na ventilu i procesu kod minimalnog protoka}} \quad (9.21)$$

ili

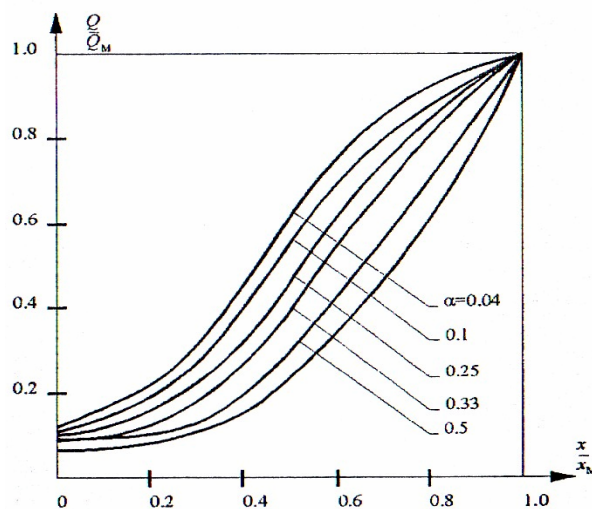
$$\alpha = \frac{p_o - p_{1M}}{p_o - p_2} = K' \frac{Q_M^2}{p_o - p_2} \quad (9.22)$$

U zavisnosti od toga o kojoj se konstruktivnoj karakteristici radi  $S / S_M = f(x / x_M)$ , relacija se može napisati u vidu

$$\frac{Q}{Q_M} = f(x / x_M) \left[ \alpha + (1 - \alpha)(f(x / x_M))^2 \right]^{-1/2} \quad (9.23)$$

i zove se protočna ili realna karakteristika regulacionog ventila.

Na dijagramu 9.8. data je protočna, instalirana, karakteristika regulacionog ventila sa ravnoprocentnom konstruktivnom karakteristikom, za razne vrijednosti koeficijenta  $\alpha$ .



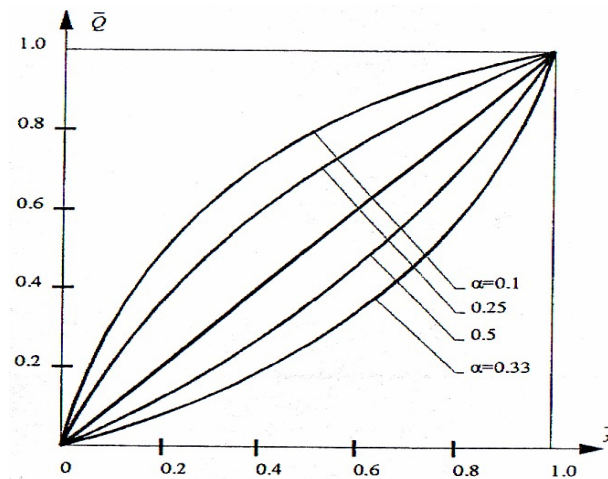
Slika 9.8. – Protočna karakteristika ravnoprocentnog ventila

Iz ovog dijagrama vidi se da je karakteristika za  $\bar{x} > 0,5$  približno linearna kada je  $\alpha = 0,33$  i da nije u tom opsegu potrebna linearizacija protočne karakteristike.

Često se u tehničkoj praksi susreće modifikovana procentna konstruktivna karakteristika. Njen analitički izraz dat je u obliku

$$\bar{S} = \bar{x} \left[ 2 - 2\bar{x}^2 \right]^{-1/2} \quad (9.24)$$

Protočna karakteristika, u tom slučaju, za razne vrijednosti koeficijenta  $\alpha$ , data je na slici 9.9.



Slika 9.9. – Protočna karakteristika ventila sa modifikovanom procentnom konstruktivnom karakteristikom

Iz ovog dijagrama vidi se da je za  $\alpha = 0,33$  karakteristika linearna pa nije potrebna njena linearizacija, ili preodešavanje regulatora za razna područja rada. Glavni cilj izbora regulacionog ventila i njegovo smještanje u hidruličku liniju od kojeg zavisi parametar  $\alpha$  je dobiti linearnu ili njoj veoma blisku, protočnu karakteristiku u čitavom opsegu primjene protoka.

Opseg promjene protoka definisan je izrazom

$$R' = \frac{Q_M}{Q_m} \quad (9.25)$$

gdje je:  $Q_m$  – minimalni protok kroz regulacioni ventil.

Nakon odgovarajućih smjena može se dobiti da je

$$R' = \left[ \alpha + (1 - \alpha) \frac{S_m}{S_M} \right]^{\frac{1}{2}} \left( \frac{S_m}{S_M} \right) \quad (9.26)$$

ili nakon korišćenja relacije (1.6) dobija se da je opseg promjene protoka u funkciji opsega promjene protočne površine dat izrazom

$$R' = (R^2 \alpha + 1 - \alpha)^{\frac{1}{2}} \quad (9.27)$$

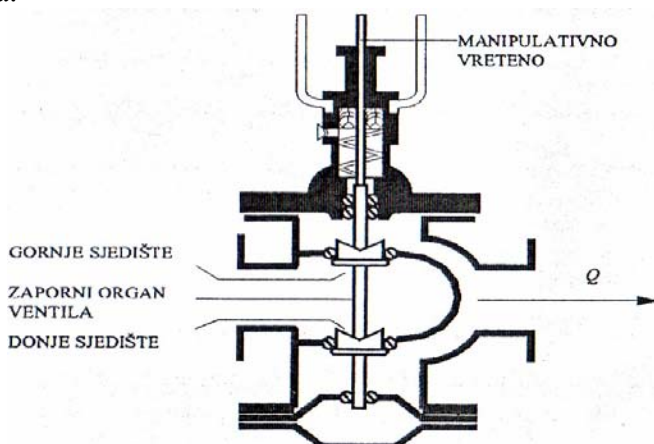
Izbor regulacionog ventila veoma je važan kod projektovanja SAU. Maksimalni protok  $Q_M$  bira se tako da se pri tom protoku ima oko jedna trećina pada pritiska  $p_o - p_2$ .

Kod manjeg pada pritiska, što uvijek zavisi od konkretnog slučaja, protočna karakteristika postaje nelinearna, što vodi u sve one probleme koje unosi nelinearnost u SAU.



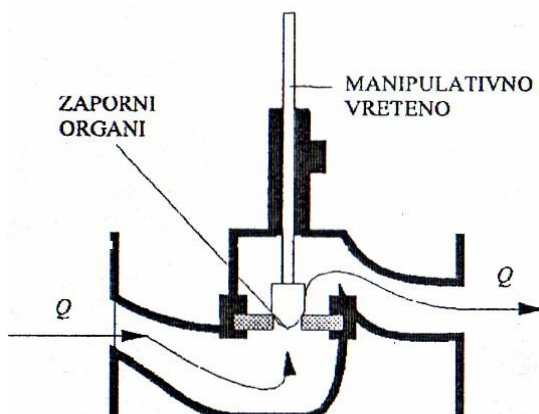
#### 9.2.1.4. Osnovne konstrukcije ventila

Postoje razne konstruktivne izvedbe regulacionih ventila i njima primjerenih aktuatora koji nekada čine i jedinstvenu cjelinu. Jedan tipičan dvosjedi regulacioni ventil dat je na slici 9.10. sa glavnim dijelovima.



Slika 9.10. – Regulacioni ventil, dvosjedi

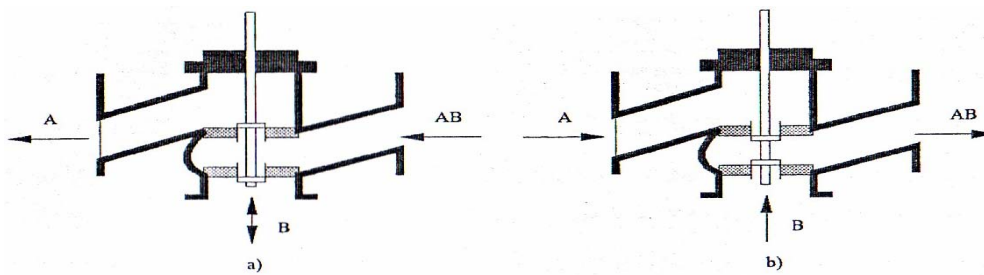
Na slici 9.11. dat je jednosjedi regulacioni ventil koji je jednostavan za projektovanje. U zavisnosti od oblika zapornog organa određuje se i zavisnost propusnog predjeka  $S$  od pomaka manipulativnog vretena.



Slika 9.11. – Jednosjedi regulacioni ventil

Za razliku od dvosjednog regulacionog ventila čiji je uprošćen izgled dat na slici 9.10., kod kojeg se sile, koje se stvaraju na manipulativnom vretenu usljed djelovanja protoka poništavaju, jednosjedi regulacioni ventil ima silu na manipulativnom vretenu koja je rezultat djelovanja protoka  $Q$  na manipulativno vreteno, što je nepovoljno za aktuator koji pomjera vreteno. Pri tome, aktuator mora i tu silu da savlada.

Kada se negdje u procesu želi dijeljenje ili sumiranje dva protoka koriste se trokraki ventili, slika 9.12., a i b. Ovi ventili koriste se samo kada su fluidi čisti, tj. kada nemaju čvrstih dijelova.

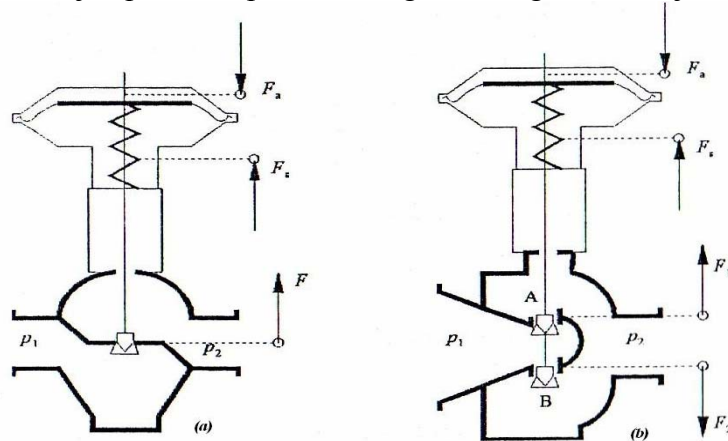


Slika 9.12. – Trokraki ventili

Za pokretanje vretena ventila, tj. za otvaranje ili zatvaranje regulacionog ventila koriste se aktuatori.

Ako aktuator ima povratnu spregu po poziciji svog izlaza onda se on zove pozicioner. Pored aktuatora i pozicionera, za pogon regulacionog ventila koriste se i servomotori koji mogu da budu izvedeni u raznim tehnologijama.

Na slici 9.13., a i b data je uprošćena predstava regulacionog ventila zajedno sa aktuatorom.



Slika 9.13. – Regulacioni ventil u spoju sa aktuatorom: a) jednosjedi ventil; b) dvosjedi ventil

Jednosjedi regulacioni ventil ima samo jedan zaporni organ, i odatle samo jednu propusnu površinu  $S$  kroz koju može teći fluid. Ova izvedba ima svoje prednosti; jednostavna je konstrukcija vratila i lako zatvaranje.

Osnovni nedostatak jednosjedog ventila, slika 9.13.a, je sila, koja se usljed protoka kroz ventil javlja na manipulativno vreteno, i raste sa padom pritiska na ventilu. Ta sila data je izrazom

$$F_a = F_s + (p_1 - p_2) S \quad (9.28)$$

gdje je:  $F_a$  – sila koju formira membrana aktuatora; ako se radi o pneumatskom aktuatoru, onda je ta sila srazmjerna pritisku upravljačkog signala i površini membrane aktuatora;

$F_s$  – sila kontraopruge;

$p_1 - p_2$  – pad pritiska na regulacionom vreteno usljed protoka  $Q$ ;

$S$  – propusna površina regulacionog ventila.

Kod velikih padova pritiska zahtjeva se i velika snaga aktuatora kako bi mogla savladati kontra silu.

U slučaju dvosjedog regulacionog ventila, slika 13.b, njegova prednost je što pad pritiska ne stvara značajniju silu na ventilu. Tada se za silu može napisati izraz

$$F_1 = F_2 = (p_1 - p_2) S \quad (9.29)$$

Aktuator mora da savlada samo kontra silu opruge  $F_s$ .

Nedostatak dvosjedog regulacionog ventila je što je složeniji i ne može se obezbijediti dobro zatvaranje obiju propusnih površina simultano.

### 9.3 IZVRŠNI MEHANIZMI

Za pokretanje tipova izvršnih organa mehaničkog ili drugog tipa koriste se razni tipovi izvršnih mehanizama. Na osnovi definicije izvršnog mehanizma kao i uvedene klasifikacije u Tabeli 1. daju se osnovne karakteristike najčešće korišćenih izvršnih mehanizama.

S obzirom na veliki broj različitih tipova aktuatora, ovdje će biti opisani samo oni tipični koji se danas sve više i češće susreću u tehničkoj praksi sistema upravljanja. Pri tome, ovi elementi SAU biće razmatrani sa upravljačke tačke gledišta a neće detaljnije biti razmatrani fizikalni fenomeni rada.

#### 9.3.1 Jednosmjerni motor sa nezavisnom pobudom

Izvršni mehanizmi na bazi istosmjernog motora sa nezavisnom pobudom veoma su često zastupljeni u tehničkoj praksi. Šematski dijagram ovog motora koji se često naziva i jednosmjerni motor upravljani strujom armature, dat je na slici 9.14.

Jednosmjerni motor sa konstantnom nezavisnom pobudom često se koristi kao izvršni mehanizam kada se zahtjeva određena snaga na njegovom izlazu koja treba da savlada neki teret karakterisan momentom inercije i ekvivalentnim viskozno-frikcionim trenjem  $f$ .

Neka bude razmoren jednosmjerni motor sa slike 14. sa upravljanim strujom armature  $i_a$ . Oznake sa slike 9.14. su:

Tabela 1. - Karakteristike najčešće korištenih izvrsnih mehanizama (servomotora)

| TIP              | KONSTRUKCIJA                               | ULAZNI SIGNAL                | D/A KONVERTOR    | PRETVARAČ ULAZNOG SIGNALA    | VREMENSKA KARAKTERISTIKA              | TIPIČNA SNAGA (W) | VRIJEME HODA, s | $u_k$ | $i$ | $u_A$ |
|------------------|--|------------------------------|------------------|------------------------------|---------------------------------------|-------------------|-----------------|-------|-----|-------|
| PNEUMATSKI       | MEMBRANSKI SA OPRUGOM                      | PRITISAK VAZDUHA 0,2-1,0 bar | D/A              | ELEKTRO-PNEUMATSKI           | PROPORCIONALNA SA VREMENSKOM ZADRŠKOM | 0,1-2000          | 1-10            |       |     |       |
|                  | VENTIL BEZ MEHANIČKE POVRATNE SPREGE       | PRITISAK ULJA                | D/A              | ELEKTRO-HIDRAULIČKI          | INTEGRALNA                            | 100-750000        | 1-10            |       |     |       |
| ELEKTROMECHANIKI | VENTIL SA MEHANIČKOM POVRATNOM SPREGOM     | PROMIENLJIVI NAPON ARMATURE  | D/A              | ELEKTRONSKI POJAČAVAČ        | PROPORCIONALNA SA VREMENSKOM ZADRŠKOM | 100-750000        | 1-10            |       |     |       |
|                  | ISTOSMJERNI MOTOR SA PARALELNOBUDOM        | PROMIENLJIVI NAPON           | D/A              | BLOK UPRAVLJANJA             | INTEGRALNA SA REGULISANOM BRZINOM     | 10-4000           | 0,01-60         |       |     |       |
|                  | DVOFAZNI MOTOR IZMIJENIČNE STRUJE          | PROMIENLJIVI NAPON POBUDE    | BLOK UPRAVLJANJA | TROPOZICIONI RELEJ           | INTEGRALNA SA KONSTANTNOM BRZINOM     | 10-4000           | 1-60            |       |     |       |
|                  | ISTOSMJERNI MOTOR SA PROMIENLJIVOM POBUDOM | PROMIENLJIVI NAPON POBUDE    | D/A              | ELEKTRONSKI POJAČAVAČ        | INTEGRALNA SA REGULISANOM BRZINOM     | 10-4000           |                 |       |     |       |
|                  | KORAČNI MOTOR (STEP MOTOR)                 | NAPONSKI IMPULS              |                  | UPRAVLJAČKI BLOK STEP MOTORA | PROPORCIONALNO STEPENASTOG TIPA       |                   | 0,02-60         |       |     |       |
|                  |  |                              |                  |                              |                                       |                   |                 |       |     |       |

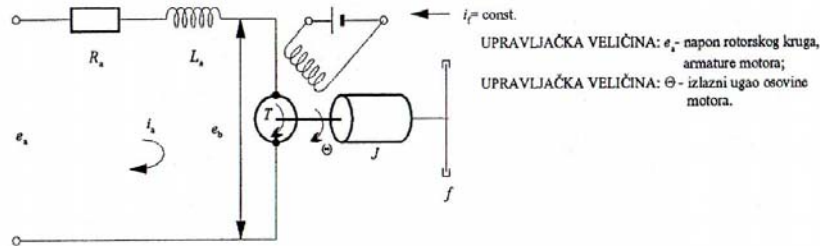
$u_k$  - UPRAVLJANJE, IZLAZ IZ REGULATORA,  $u_A$  - IZLAZ AKTUATORA, STANJE AKTUATORA

$R_a$  – otpor namotaja rotora, armature  
 $L_a$  – induktivnost armature,  
 $i_a$  – struja armature,  
 $i_f$  – struja pobude,

$e_a$  – napon armature, upravljački signal,  
 $e_b$  – kontraelektromotorni napon,  
 $\theta$  - ugao zaokreta izlazne osovine motora,  
 $T$  – obrtni momenat koji razvija motor,  
 $J$  – ekvivalentni momenat inercije motora i opterećenja sveden na osovinu motora,  
 $f$  – koeficijent ekvivalentnog viskozno-frikcionog trenja motora i opterećenja sveden

na

osovinu motora.



Slika 9.14. – Šematski dijagram istosmjernog motora sa konstantnom pobudom

Obrtni momenat motora  $T$ , proporcionalan je proizvodu struje armature  $i_a$  i magnetnog fluksa u vazдушnom zazoru koji je srazmjernan struji pobude

$$\psi = K_f i_f \quad (9.30)$$

gdje je:  $K_f$  – konstanta.

Momenat  $T$  može biti izražen sa

$$T = K_f i_f K_l i_a \quad (9.31)$$

gdje je:  $K_l$  – konstanta.

Kod istosmjernog motora upravljanog strujom armature, struja pobude održava se konstantom. Kada je struja konstanta tada je i fluks konstantan, pa je obrtni momenat direktno proporcionalan struji armature tako da se ima

$$T = K i_a \quad (9.32)$$

gdje je:  $K = K_l K_f$  – konstanta motora.

Kada rotor (armatura) rotira, tada se na krajevima rotora inducira napon proporcionalan proizvodu fluksa i ugaone brzine. Za konstantan fluks, inducirani napon  $e_b$  direktno je proporcionalan ugaonoj brzini. Odatle je

$$e_b = K_b \frac{d\theta}{dt} \quad (9.33)$$

gdje je:  $K_b$  – konstanta.

Brzina ovakvog motora kontrolisana je naponom armature  $e_a$ . Napon  $e_a$  dobija se iz pojačivača ili iz generatora, tj. odgovarajuće upravljačke strukture. Za rotorski krug važi diferencijalna jednačina koja opisuje električnu ravnotežu

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + e_b = e_a \quad (9.34)$$

Struja armature proizvodi momenat koji treba da savlada opterećenje, ili

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + f \frac{d\theta}{dt} = T = K i_a \quad (9.35)$$

Uz pretpostavku da su svi uslovi jednaki nuli, uzimanjem Laplac-ove transformacije jednačina (1.33), (1.34) i (1.35) dobija se sistem jednačina

$$K_b s \theta(s) = E_b(s) \quad (9.36)$$

$$(L_a s + R_a) I_a(s) + E_b(s) = E_a(s) \quad (9.37)$$

$$(J s^2 + f s) \theta(s) = T(s) = K I_a(s) \quad (9.38)$$

Uzimajući da je  $e_a$  ulazni, upravljački, signal, a  $\theta$  ugao pozicija motora, funkcija prenosa

$$\frac{\theta(s)}{E_a(s)} = \frac{K}{s [L_a J s^2 + (L_a f + R_a J) s + R_a f + K K_b]} \quad (9.39)$$

Kako je induktivnost  $L_a$  obično mala, to ona može biti zanemarena pa relacija (1.39) može biti napisana kao

$$\frac{\theta(s)}{E_a(s)} = \frac{K_m}{s(T_m s + 1)} \quad (9.40)$$

gdje je:  $K_m = K / (R_a f + K K_b)$  – pojačanje motora, i  
 $T_m = R_a J / (R_a J + K K_b)$  – vremenska konstanta motora.

Iz jednačina (1.39) i (1.40) vidi se da funkcija prenosa sadrže član  $1/s$  što govori da je motor integrator u odnosu na ugaonu poziciju.

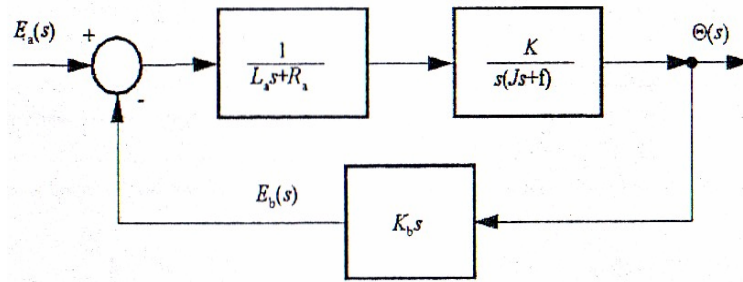
Množeći sa  $s$  lijevu i desnu stranu (1.40), dobija se da je

$$\frac{s\theta(s)}{E_a(s)} = \frac{K_m}{(T_m s + 1)} \quad (9.41)$$

Kako je  $s\theta(s) = \dot{\theta}(s)$ , to prethodna relacija opisuje funkciju prenosa po brzini. Blok dijagram analiziranog motora dat je na slici 9.15.

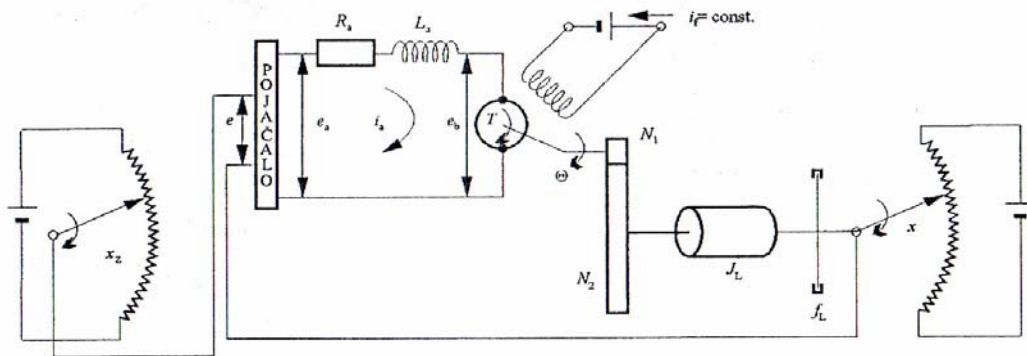
Sada će biti izložen pozicioni servosistem (pozicioner) po uglu na bazi istosmjernog motora sa nezavisnom pobudom. Šematski dijagram dat je na slici 9.16, što predstavlja pozicioni servosistem. Opterećenje koje je predstavljeno sa momentom inercije  $J_L$  i koeficijentom viskozno-frikcionog trenja može za koordinatu stanja imati ugao  $x$  ili poziciju. Kada se radi o





**Slika 9.15.** – Blok dijagram motora sa nezavisnom pobudom

izlaznoj poziciji, tada mora postojati na izlaznoj osovini motora konvertor ugaonog kretanja u linerano kretanje, što se može ostvariti pužastim prenosom, zupčastom letvom itd.



**Slika 9.16.** – Pozicioni servosistem

Da se nađe funkcija prenosa pozicionog servosistema sa slike 16. neka budu dinamički opisani sljedeći podsistemi:

Potenciometarski detektor greške može se u  $s$  domenu opisati sljedećom jednačinom:

$$E(s) = K_1 [X_z(s) - X(s)] \quad (9.42)$$

gdje je:  $K_1$  – pojačanje potenciometarskog detektora greške.

Pojačalo se može opisati jednačinom

$$E_a(s) = K_p E(s) \quad (9.43)$$

gdje je:  $K_p$  – pojačanje pojačala.

Ekvivalentni moment inercije motora i opterećenja sveden na osovину motora je

$$J = J_m + n^2 J_L \quad (9.44)$$

gdje je:  $J_m$  – moment inercije motora,

$n = N_1 / N_2$  – prenosni odnos reduktora broja obrtaja.

Ekvivalentni koeficijent vikožno-frikcionog trenja motora i opterećenja sveden na osovину motora je

$$f = f_m + n^2 f_L \quad (9.45)$$

Polazeći od relacije (9.40), funkcija prenosa motora je

$$\frac{\theta(s)}{E_a(s)} = \frac{K_m}{s[T_m s + 1]} \quad (9.46)$$

gdje je:  $K_m = K / (R_a f + K K_b)$ , a  $T_m = R_a J / (R_a f + K K_b)$ .

Prenosni odnos izlaznog zupčastog reduktora sa  $N_1$  i  $N_2$  zubaca je

$$n = N_1 / N_2, \quad N_2 > N_1 \quad (9.47)$$

pa se ulazni ugao  $x$  može napisati kao

$$x = n\theta \quad (9.48)$$

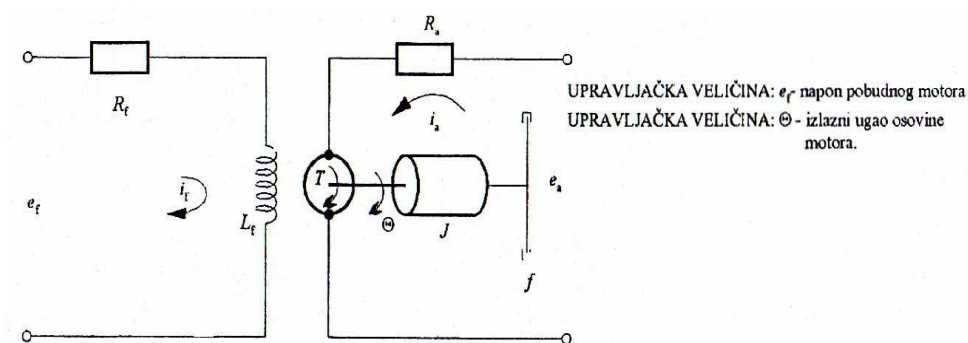
Na osnovu relacija (1.42), (1.43), (1.46) do (1.48), može se za funkciju prenosa u zatvorenom za pozicioni sistem sa slike 16, napisati izraz

$$X(s) = X_z(s) \frac{nK_1 K_m K_p}{[T_m s^2 + s + nK_1 K_m K_p]} \quad (9.49)$$

na osnovi kojeg se može vršiti analiza odziva sistema na razne ulaze, frekventna propusnost, statistička greška, itd.

### 1.3.2. Jednosmjerni motor sa upravljansom pobudom

Šematski dijagram istosmjernog motora sa upavljanom pobudom dat je na slici 9.17.



Slika 9.17. – Jednosmjerni motor upravljansom pobudom

Oznake na slici 9.17. su iste kao i na slici 9.14., uz dodatak da je upravljačka veličina  $e_f$  – napon pobudnog namotaja, a  $R_f$  – otpor pobudnog namotaja i  $L_f$  – induktivitet pobudnog namotaja. Napon  $e_f$  dobija se iz odgovarajućeg pojačala koje daje snagu pobude. Struja rotora  $i_a$  održava se konstantnom. Ovo se postiže izvorom konstantnog napona  $e_a$  i ubacivanjem velikog serijskog otpora u seriju sa otporom  $R_a$ . Ako je pad napona na tom otporu veliki u poređenju sa indukovanim naponom  $e_b$ , tada je efekat  $e_b$  mali. Stepem iskorišćenja ovakvog motora mali je, međutim, ovakav motor koristi se u sistemima za upravljanje brzine. Održavanje konstantne struje armature  $i_a$  složeniji je problem od održavanja konstantne struje pobude  $i_f$  radi toga što se ima uticaj indukovano napona  $e_b$ , jer njegov iznos zavisi od brzine motora.

Obrtni momenat  $T$  koji razvija motor, proporcionalan je proizvodu magnetnog fluksa  $\psi$  i struje rotora

$$T = K_1 \psi i_a \quad (9.50)$$

gdje je:  $K_1$  – konstanta.

Budući da je  $i_a$  konstantan, fluks  $\psi$  je samo funkcija struje pobude  $i_f$ , pa se izraz za obrtni momenat može napisati u vidu



$$T = K_2 i_f$$

gdje je:  $K_2$  – konstanta.

Jednačine koje opisuju kretanje električnog i mehaničkog podsistema imaju oblik

$$L_f \frac{di_f}{dt} + R_f i_f = e_f \quad (9.51)$$

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + f \frac{d\theta}{dt} = t = K_2 i_f \quad (9.52)$$

Uzimanjem Laplace-ove transformacije prethodnih jednačina uz nulte početne uslove, može se napisati funkcija prenosa

$$\frac{\theta(s)}{E_f(s)} = \frac{K_2}{s(L_f s + R_f)(Js + f)} = \frac{K_m}{s(T_f s + 1)(T_m s + 1)} \quad (9.53)$$

gdje je:  $K_m = K_2 / (R_f f)$  – pojačanje motora,

$T_f = L_f / R_f$  – vremenska konstanta pobudnog kruga, električna,

$T_m = J / f$  – vremenska konstanta motora, mehanička.

Kako vremenska konstanta pobudnog kruga  $T_f$  nije zanemarljiva, funkcija prenosa istosmjernog motora upravljanog pobudom je trećeg reda.

Prednost motora upravljanog pobudom je u tome što je snaga pojačivača pobude mala jer je i snaga pobude mala. Međutim, zahtjev da struja pobude  $i_f$  bude konstantna je ozbiljan nedostatak, u odnosu na obezbjeđenje izvora konstantnog napona. Jednosmjerni motori upravljeni pobudom imaju niz nedostaka u odnosu na istosmjerne motore upravljane strujom rotora. Kod motora upravljanog strujom rotora indukovani napon  $e_b$  djeluje prigušujuće na kretanje motora, dok u slučaju rotora indukovani napon  $e_b$  djeluje prigušujuće na kretanje motora, dok u slučaju motora upravljanog pobudom gušenje se mora obezbijediti motorom i opterećenjem. Radi toga, motori upravljeni pobudom imaju manji stepen korisnog dejstva i generišu veće toplotne gubitke u rotoru.

Vremenske konstante motora upravljanih pobudom u principu su veće od vremenskih konstanti motora upravljanih strujom rotora. Međutim, kod upoređivanja vremenskih konstanti kod oba motora treba uzeti u obzir i vremenske konstante odgovarajućih pojačivača.

### 9.3.3 Dvofazni servomotor

Dvofazni servomotor, često upotrebljavan u instrumentalnim servomehanizmima, sličan je konvencionalnom dvofaznom (indukcionom) motoru, s tim što ima neke specijalne zahtjeve kao što je mali odnos dijametar/dužina rotora radi minimiziranja momenta inercije i dobijanja dobrih dinamičkih karakteristika.

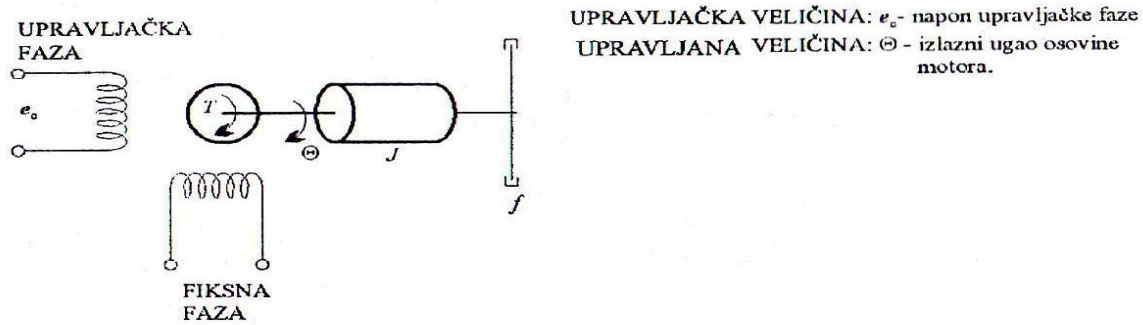
Opseg snage za koju se proizvode ovi motori za razne primjene je od jednog vata do nekoliko stotina vata.

Šematski dijagram dvofaznog motora dat je na slici 9.18.

Fiksna faza motora sa slike 9.18. neprekidno je pobuđivana referentnim naponom, obično frekvence 60, 400 ili 1000 Hz.

Druga, upravljačka faza, napajana je upravljačkim naponom koji je vremenski pomaknut za  $90^\circ$  u odnosu na referentni napon. Pri tome, upravljački napon  $e_c$  ima promjenljivu amplitudu i polaritet. Namotaji fiksne faze smješteni su u odnosu na namotaje upravljačke faze pod uglom od  $90^\circ$ .

Kod dvofaznog servomotora, polaritet napona određuje smjer rotacije. Trenutna vrijednost upravljačkog napona  $e_c(t)$  ima oblik



Slika 9.18. – Šematski dijagram dvofaznog servomotora

$$e_c(t) \begin{cases} = E_c(t) \sin \omega t & E_c(t) > 0 \\ = |E_c(t)| \sin(\omega T + \pi) & E_c(t) < 0 \end{cases} \quad (9.54)$$

Ovo znači da izmjena u znaku  $E_c(t)$  mijenja fazu za  $\pi$  radijana. Odatle, promjena u znaku  $E_c(t)$  mijenja smjer rotacije motora. Kako je referentni napon konstanta, obrtni moment  $T$  i ugaona brzina  $\theta$ , funkcije su upravljačkog napona  $E_c(t)$ . Ako su promjene napona  $E_c(t)$  spore u poređenju sa frekvencom izmjeničnog napajanja, obrtni moment koji razvija motor proporcionalan je sa  $E_c(t)$ . Ovo je dato na slici 9.19a.

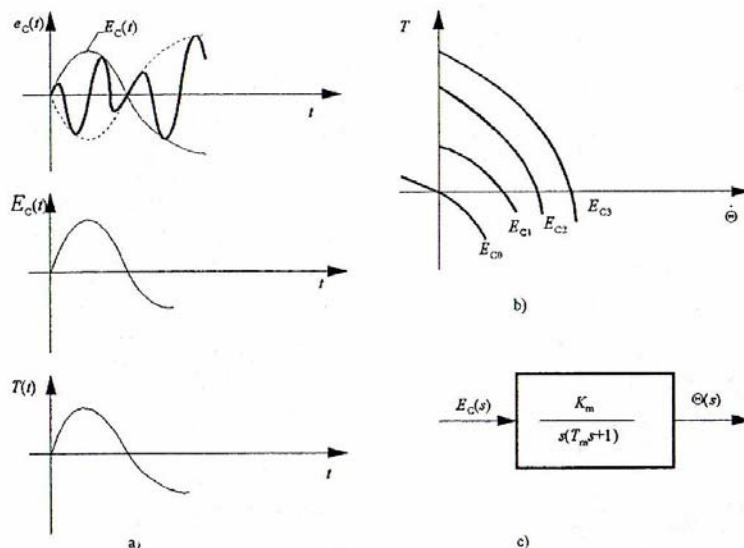
U stacionarnom stanju ugaona brzina  $\theta$  proporcionalna je upravljačkom naponu  $E_c(t)$ .

Familija krivih momentat-brzina, za razne vrijednosti upravljačkog napona i stalnu vrijednost napona napajanja fiksne faze data je na slici 9.19b. Generalno, ove krive su paralelne za relativno širok opseg brzine, ali one ne mogu biti ekvidistantne. Za datu brzinu, momentat ne varira linearno sa upravljačkim naponom. U području malih brzina, krive momentat-brzina obično su prave linije i ekvidistantne u području malih upravljačkih napona. Budući da motor rijetko radi na visokim brzinama, linearni djelovi momentne karakteristike mogu biti prošireni na područje visoke brzine. Uz pretpostavku da su sve krive ekvidistantne za sve upravljačke procese, ovaj servomotor se može razmatrati kao linearni sistem.

Sa slike 9.19b. vidi se da ovaj motor obezbjeđuje obrtni momentat i pri brzini jednakoj nula. Sa iste slike se vidi da je obrtni momentat koji generiše motor dat relacijom

$$T = -K_n \dot{\theta} + K_c E_c \quad (9.55)$$

gdje su:  $K_n$  i  $K_c$  – pozitivne konstante.



Slika 9.19. – a)  $e_c(t)$ ,  $E_c(t)$ ; b) karakteristike momenata – brzina motora za razne vrijednosti  $E_c$ ;  
c) blok dijagram servomotora

S druge strane, obrtni momenat  $T$  mora da savlada odgovarajuće reaktivne momente

$$J\ddot{\theta} + (f + K_n)\dot{\theta} = K_c E_c \quad (9.56)$$

Polazeći od toga da je upravljački napon  $E_c$ , a izlaz ugao zakreta osovine motora  $\theta$ , funkcija prenosa je data izrazom

$$\frac{\theta(s)}{E_c(s)} = \frac{K_c}{Js^2 + (f + K_n)s} = \frac{K_m}{s(T_m s + 1)} \quad (9.57)$$

gdje je:  $K_m = K_c / (f + K_n)$  – pojačanje motora,  
 $T_m = J / (f + K_n)$  – vremenska konstanta motora.

Koeficijent  $(f + K_n)$  predstavlja ekvivalentni koeficijent viskoznog trenja motora i opterećenja. Ako je momenat inercije rotora dovoljno mali, tada se za veći dio frekventnog opsega motora može smatrati da je  $|T_m s| \ll 1$ , pa se motor može smatrati integratorom.

Funkcija prenosa motora data sa (9.58) izvedena je uz pretpostavku da je motor linearan što u praksi nije slučaj. Vrijednost  $K_n$  nije konstantna, a  $K_m$  i  $T_m$  takođe nisu konstantne i variraju sa upravljačkim naponom  $E_c$ .

Pored održavanja pozicije, mnogi industrijski procesi zahtjevaju promjenljive brzine izvršnih mehanizama. Savremeni sistemi grijanja svoj rad baziraju na promjeni protoka tople vode kroz grejna tijela uz konstantan pad temperature na grejnim tijelima. U tom slučaju, promjenljivi protok tople vode obezbjeđuje se centrifugalnim pumpama sa promjenljivom brzinom okretanja. U tehničkoj praksi za izvršne organe sa promjenljivom brzinom sve se više koriste asinhroni motori upravljani po brzini koji zamjenjuju odgovarajuće istosmjerne mašine ili hipersinhronne kaskade za sisteme velike snage. Ograničenja kao što su korišćenje u eksplozivno opasnim sredinama, velike brzine, velika snaga, itd. vodila su razvoju brzih

varijatora brzine na bazi izmjeničnih motora i specijalnih indukcionih mašina koje su robusne, a veoma jeftine.

Razvoj komponenti energetske elektronike (tristori, tranzistori snage, triaci, itd.) promovisao je poboljšane statičke konvertore za napajanje motora izmjenične struje. Brzi razvoj digitalne tehnike upravljanja i specijalno mikroprocesora, omogućio je razvoj i primjenu veoma sofisticiranih algoritama upravljanja, koji osiguravaju rad saglasno ograničenjima upravljanog procesa.

Do sada su razvijene mnoge metode i sistemi upravljanja brzine izmjeničnih indukcionih mašina, koje predstavljaju posebnu oblast upravljanja električnih mašina, te ovdje neće biti ni razmatrane. Ova problematika razmatrana je u veoma širokoj literaturi.

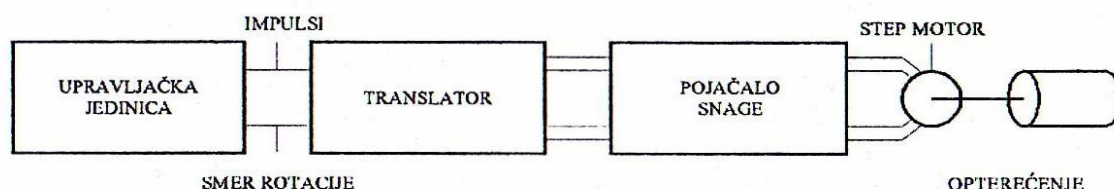
### 9.3.3. Step motor

Step motor je elektromehanički inkrementalni aktuator koji konvertuje digitalne ulazne impulse u pomak izlazne osovine motora. Svaki ulazni impuls proizvodi elementarni pomak rotora koji se naziva step odakle i potiče naziv – step motor.

Većina električnih motora ima rotor koji kontinualno rotira kada je napajan električnom energijom, i postoji direktan odnos između brzine rotacije i parametra napajanja (napon, struje, frekvenca). Rotor može biti stacionaran samo ako je ostvareno upravljanje sa povratnom spregom. Nasuprot tome, kod step motora postoji direktan odnos između fiksne, stabilne pozicije rotora i konfiguracije napajanja. Pomak između dvije stabilne pozicije postiže se sa jednom ili više modifikacija napajanja namotaja motora. Kod ovog motora, dakle, moguće je upravljanje pozicije i brzine u otvorenoj petlji, bez povratne sprege, ulaznim upravljačkim impulsima. Struktura motora i konfiguracija napajanja određuju broj ravnotežnih stanja, pozicija, rotora motora. Broj ravnotežnih stanja u jednom obrtaju može biti veoma velik (12, 24, 48, 100, 200, 800, itd.) i veći od ovog broja. Greška u poziciji nije kumulativna, tako da je step motor podesan za numeričko upravljanje alatnih mašina i robota. Radi toga što savremeni SAU često imaju potrebu za inkrementalnim kretanjem, step motori postaju sve važniji aktuatori. Inkrementalno kretanje susreće se kod svih tipova periferijske opreme računara kao što su printeri, trake, diskovi, zatim sistemi procesnog upravljanja, itd. Postoje razni tipovi step motora, zavisno od principa rada. U tehničkoj praksi susreću se dva tipa motora: motor sa promjenljivom reluktansom i motor sa permanentnim magnetom. Matematička analiza ovih motora veoma je kompleksna, budući da su ovi motori jako nelinearni.

Za razliku od jednosmjernih i asinhronih motora, linearna predstava step motora je nerealna. Radi toga će se neće razmatrati ova problematika.

Na slici 9.20. daje se blok šema sistema upravljanja step motora.



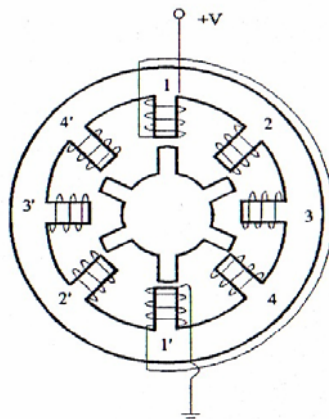
*Slika 9.20. - Blok šema upravljanja step motora*

Upravljačka jedinica koja je obično mikroprocesorski bazirana, proizvodi upravljačke impulse i signale za smjer rotacije saglasno datom broju stepova (koraka) ili brzini. Translator transformiše ulazne informacije u logičku kombinaciju koja onda određuje odgovarajuću

konfiguraciju napajanja. Pojačalo snage direktno napaja namotaje motora sa odgovarajućim naponima ili strujama.

Funkcija translatora može se realizovati pomoću logičkih digitalnih modula. Primjećuje se da koračni motor nema povratnu spregu po poziciji, međutim on omogućava i bez povratne snage, precizno pozicioniranje. Ovakav rad motora bez informacije o trenutnom položaju vratila motora, moguć je samo ako su promjene opterećenja neznatne. Tada brzina ponavljanja upravljačkih impulsa motora mora biti usaglašena sa prelaznim procesom u svakom koraku.

Da se poboljša dinamički rad step motora, uvodi se digitalna povratna sprega po poziciji vratila step motora. Osnovna korist od ovakve povratne sprege ogleda se u mogućnosti da se motor okreće brzinom koja je u sinhronizaciji sa trenutnom brzinom obrtaja. U prisustvu povratne sprege motor će raditi uspješno i u uslovima znatnih promjena opterećenja na izlaznom vratilu. Prisustvo digitalne povratne sprege omogućava daleko bolje karakteristike, jer se tada brzina ponavljanja upravljačkih impulsa podešava automatski u zavisnosti od trenutne brzine motora i karakteristika opterećenja. Takođe, povratna sprega omogućava maksimalnu brzinu ponavljanja upravljačkih impulsa u toku procesa ubrzavanja motora i u toku regulacije neke konstantne brzine obrtanja vratila motora.



**Slika 9.21.** – Step motor sa promjenljivom reluktansom

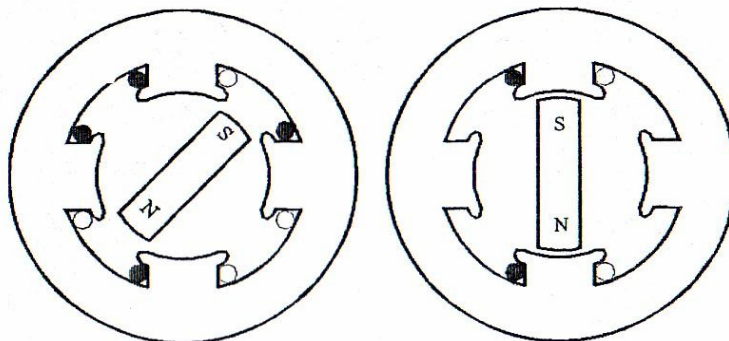
Step motor sa promjenljivom reluktansom dat je na slici 9.21. na statoru ima  $Z_s$  zubaca, a na rotoru  $Z_r$ ,  $Z_s \neq Z_r$ . Upravljački namotaji postavljeni su prema slici na dijametralne zupce statora. Kada se dovede napon napajanja  $V$ , rotor motora rotira sve dok se ne postavi u poziciju najmanjeg magnetnog otpora (poklope se ose odgovarajućih zubaca statora sa odgovarajućim zubcima rotora). Slika 21. pokazuje poprečni presjek jednog reluktantnog step motora za  $Z_s = 8$  i  $Z_r = 6$ . Ravnotežni položaj ovog motora ima se kada teče struja kroz namotaj  $j$  i  $j'$ ,  $j, j' \in \{1, 2, 3, 4\}$ , a u ovom slučaju to je struja  $I_1$  koja teče kroz namotaj 1 i 1'. Kada je  $I_1 = 0$ , tada teče samo  $I_2$  i rotor step motora zaokrene se za korak (mehanički step ugla).

$$\theta_p = 2\pi (Z_r - Z_s) / Z_r Z_s \quad (9.58)$$

Za ovaj slučaj je  $\theta_p = 15^\circ$ . Za vrijeme rotacije rotora, mijenjaju se reluktansa i induktivnost namotaja. Ove varijacije utiču na moment koji razvija motor.

Step motori sa promjenljivom reluktansom imaju visok broj koraka po obrtaju i mali moment inercije, ali njihovi vazdušni zazori moraju biti veoma mali kako bi se dobio veliki moment. Odatle, njihova konstrukcija je složena, a izrada skupa, pa imaju ograničenja u primjenama.

Step motor sa permanentnim magnetom izveden je iz sinhronog motora. Rotirajuće manetno polje formirano je statorskim namotajima i magnet rotora rotira usmjeravajući se prema polju statora. Uprošćena slika step motora sa permanentnim magnetom data je na slici 9.22.



*Slika 9.22. – Step motor sa permanentnim magnetom*

U cilju da se dobije veći broj koraka po obrtaju, koriste se višepolni rotori čime se broj koraka dobija kao multipl para polova. Ako se ima motor sa 5, 12 ili 24 pari polova, broj koraka po obrtaju je 20, 48 ili 96, respektivno.

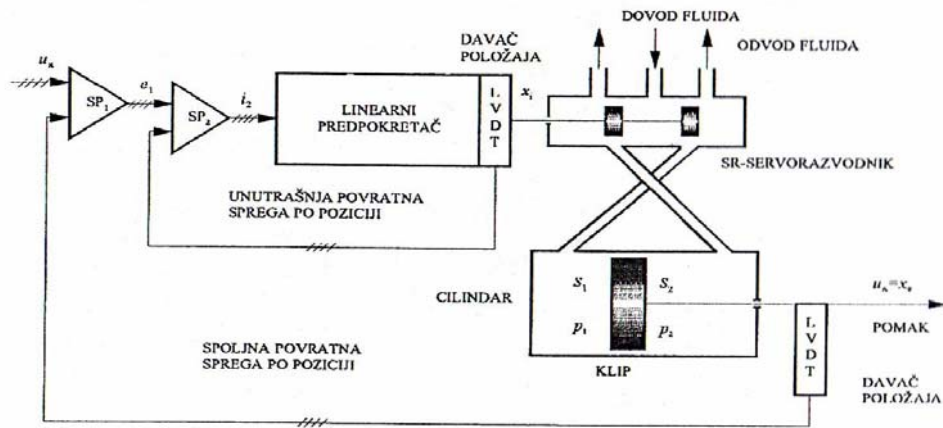
Za pokretanje regulacionih ventila kako je već rečeno koriste se i pneumatski i elektropneumatski pozicioneri i servomotori.

### 9.3.5 Hidraulički pokretač sa linearnim pretpokretačem

Kada se zahtjevaju veće snage za pokretanje izvršnih organa kao što su komandne površine na savremenim borbenim i putničkim avionima, kao pokretači se koriste elektroservohidraulički pokretači, koje karakteriše kompaktnost i velika gustina snage po jedinici volumena. Pri tome, u praksi se susreću različite izvedbe.

Za pokretanje komandnih površina u poslednje vrijeme koriste se aktuatori koji se satoje iz dva dijela: linearnog pretpokretača koji ulazni električni signal (koji je obično višestruk) pretvara u pomak, i hidrauličkog pojačivača koji pomak klipića servorazvodnika pretvara u izlazni pomak hidrauličkog pojačivača uz generisanje neophodne snage na svom izlazu. Blok šema takvog jednog pokretača data je na slici 9.23. Ovaj pokretač namijenjen je sistemima električnih komandi kod savremenih aviona (tzv. Fluy-By-Wire (FBW sistemi).

Upravljački signal koji je naponski upoređuje se sa signalom iz davača položaja pomaka klipa glavnog cilindra i razlika se obrađuje po nekom zakonu u servopojačivaču  $SP_1$ . Signal iz  $SP_1$ ,  $e_1$  upoređuje se sa signalom iz davača pozicije lineranog pretpokretača i nakon upoređivanja i dinamičke obrade, dobija se strujni signal  $i_2$ . Linearni pretpokretač je elektromehanički konvertor koji na svom ulazu ima strujni signal, a na izlazu daje silu koja je praćena pomakom  $x_1$ .



**Slika 9.23.** – Elektrohidraulički pokretač sa elektromehaničkim lineranim pretpokretačem

Ta sila može se izraziti u vidu

$$F_1 = Bli_2N \quad (9.59)$$

gdje je:  $B$  – jačina magnetnog polja linearnog pretpokretača (elektromehaničkog konvertora)

$N$  – broja namotaja  $i$

$l$  – dužina namotaja u magnetnom polju.

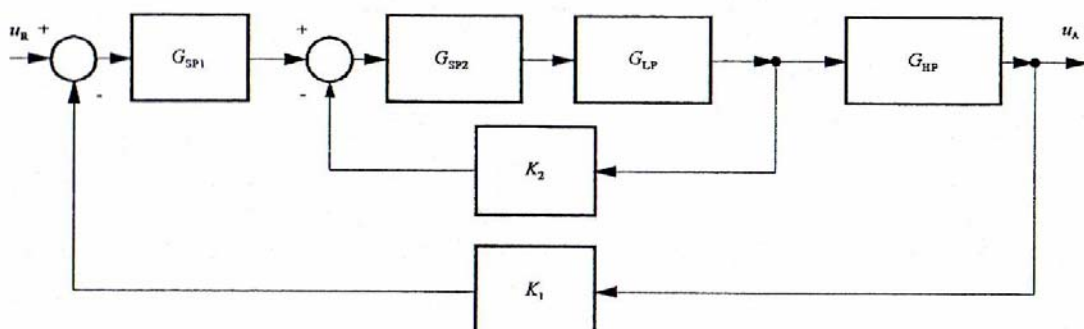
Magnetno polje  $B$  ostvaruje se pomoću permanentnog magneta na bazi rijetkih zemalja radi veće gustine magnetene energije.

Radi zahtjevane pouzdanosti ovakvih sistema na avionima (intenzitet otkaza za mehaničke komande leta je  $\lambda = 10^{-7}$  otkaza/sat) da bi se imala pouzdanost električnog sistema komandi, neophodno je da sistem bude četverostruk, jer električni sistem ima intenzitet otkaza  $0,25 \cdot 10^{-7}$  otkaza/sat. Zbog istog zahtjeva su i prenosni putevi ostalih električnih signala četverostruki, što je na slici 9.23. označeno sa 4 kose crte na svakom prenosnom putu signala.

Informacije o poziciji linearnog pretpokretača i pozicije hidrauličkog cilindra dobijaju se pomoću linerno varijabilnog diferencijalnog transformatora (LVDT).

Blok šema pokretača sa slike 9.23. data je na slici 9.24.

Strogo razmatranje hidrauličkog pokretača (servorazvodnik sa hidrauličkim cilindrom), složeno je i kompleksno, i vodi do nelinearnih diferencijalnih jednačina. Međutim, za dovoljno mali opseg promjena ulaza  $x_i(t)$  i izlaza  $x_o(t)$ , hidraulički pokretač može se aproksimirati linearnim modelom.





Slika 9.24. - Blok šema elektrohidrauličkog servopokretača sa linearnim pretpokretačem;  $G_{SP1}$  – funkcija prenosa  $SP1$ ,  $G_{SP2}$  – funkcija prenosa  $SP2$ ,  $G_{LP}$  – funkcija prenosa linearnog pretpokretača,  $G_{HP}$  – funkcija prenosa hidrauličkog pokretača,  $K_2$  – funkcija prenosa davača pozicije,  $K_1$  – funkcija prenosa davača pozicije

Sila pritiska  $f_p = p_1 S_1 - p_2 S_2$ , koja djeluje na klip glavnog cilindra, funkcija je pada pritiska fluida na klip, odnosno protoka fluida kroz cilindar. Ako je fluid nestišljiv, njegov protok kroz cilindar uglavnom zavisi od promjenljive  $x_i(t)$ , i brzine kretanja klipa  $x_o(t)$ . Radi toga je i sila pritiska na klip funkcija ove dvije promjenljive

$$f_p = f(x_i, x_o) \quad (9.60)$$

U linearnom režimu rada ova sila može se napisati u obliku

$$f_p(t) = a_1 x_i(t) - a_2 x_o(t) \quad (9.61)$$

gdje su:  $a_1$  i  $a_2$  – pozitivne konstante.

Jednačina dinamičke ravnoteže sila koja djeluje na klip ima oblik

$$m\ddot{x}_o(t) = f(x_i, x_o) - f_x(t) \quad (9.62)$$

gdje je:  $f$  – koeficijent viskoznog trenja klipa,  
 $m$  – masa klipa i opterećenja ako postoji.

Ako opterećenje posjeduje i elemente krutosti, onda to, preko odgovarajućeg koeficijenta krutosti treba uzeti u obzir.

Za male vrijednosti  $x_i(t)$  i  $x_o(t)$  u okolini  $x_i(t) = 0$  i  $x_o(t) = 0$ , i na osnovu jednačine (1.61), može se jednačina (1.62) napisati u obliku

$$m\ddot{x}_o(t) \approx a_1 x_i(t) - a_2 x_o(t) - f_x(t) \quad (9.63)$$

Funkcija prenosa je onda

$$G_{HP}(s) = \frac{a_1}{ms^2 + (a_2 + f)s} = \frac{a_1}{s[ms + (a_2 + f)]} \quad (9.64)$$

U slučaju da se mase koje učestvuju u kretanju mogu zanemariti,  $m \approx 0$ , funkcija prenosa tada je

$$G_{HP}(s) = \frac{a_1}{(a_2 + f)s} = \frac{1}{\left(\frac{a_2 + f}{a_1}\right)} = \frac{2}{T_1 s} \quad (9.65)$$

pa se tada hidraulički pojačivač može smatrati integratorom, a integralno vrijeme je

$$T_1 = (a_2 + f) / a_1.$$

Prenosne funkcije  $G_{SP1}$  i  $G_{SP2}$  biraju se iz uslova da sistem bude pozicioni sa odgovarajućom statičkom i dinamičkom karakteristikom, tj. frekventnom propusnošću.



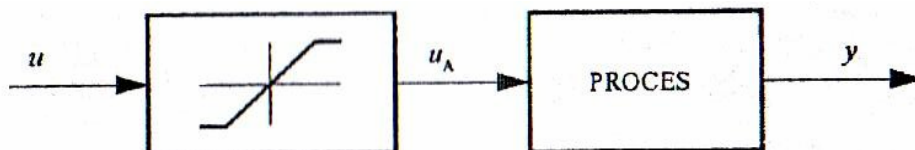
U cilju sprječavanja lijepljenja klipića servorazvodnika, na signal  $i_2$  koji je sporopromjenljiv (odgovara dinamici  $u_R$ ), superponira se jedan visokofrekventni šum koji se naziva signal podrhtavanja, s ciljem da se spriječi zalijepljivanje klipića. Amplituda tog signala je reda nekoliko procenata od  $i_2$ , a frekvencija je reda 1-2 KHz.

Sistem nadgledanja i «glasanja» više kanala komande ovdje nije elaboriran ali on, u konkretnim tehničkim rješenjima, igra značajnu ulogu.

## 9.4 POVEZIVANJE AKTUATORA SA UPRAVLJAČKIM STRUKTURAMA I REGULATORIMA

Većina metoda za projektovanje SAU bazirana je na pretpostavci da proces upravljanja može biti opisan linearnim modelom. Mada linearna teorije ima veliku primjenljivost, veoma često egzistiraju neke nelinearnosti koje moraju biti uzete u obzir. Na primjer, skoro uvijek aktuatori su nelinearni kako je pokazano na slici 25. regulacioni ventil se takođe može smatrati nelinearnim elementom tipa zasićenja, gdje granicama odgovara potpuno otvoren ili potpuno zatvoren ventil. Sistem prikazan na slici 25. je linearan samo kada se imaju velike promjene signala upravljanja  $u$ . Tada se javljaju mnoge teškoće u SAU za vrijeme startovanja i zaustavljanja procesa, ili kod velikih promjena upravljanja. Tipičan primjer za to je zasićenje integratora u regulatoru.

Radi toga neophodno je detaljno razmotriti uticaj nelinearnosti na SAU. Poteškoće se javljaju što je regulator dinamički sistem. Kada je upravljanje u zasićenju, potrebno je biti siguran da se izlaz regulatora ponaša odgovarajuće. Za prevazilaženje ovog problema postoje razni načini.



Slika 9.25. – Blok šema procesa sa nelinearnim aktuatorom

### 1.4.1. Uticaj zasićenja upravljanja na aktuator

Da bi se analizirao ovaj problem neka bude razmotren problem upravljanja s povratnom spregom sa zadavanjem polova. Projektovanje SAU sa zadavanjem polova može se posmatrati kao proširenje klasičnog modela korijenskog hodografa. Svrha je da se odredi pojačanje povratne snage tako da svi polovi zatvorenog sistema imaju unaprijed definisane vrijednosti. Pretpostavlja se da su sve varijable stanja dostupne.

Neka je proces koji treba da bude upravljen, opisan jednačinom

$$\frac{dx}{dt} = A \cdot x + B \cdot u \quad (9.66)$$

gdje  $x$  predstavlja koordinatu stanja,  $u$  je upravljanje, a  $A$  i  $B$  su konstantne matrice. Sistem (9.66) se nakon diskretizacije može napisati u vidu

$$x(k+1) = \Phi x(k) + \Gamma u(k) \quad (9.67)$$

gdje su matrice  $\Phi$  i  $\Gamma$  date izrazima

$$\Phi = e^{AT}$$

$$\Gamma = \left( \int_0^T e^{As} ds \right) B$$

Dalje, pretpostavlja se da smetnja može biti predstavljena u vidu početnog uslova.

Regulacioni problem sastoji se u tome da se obezbijedi da sistem iz početnog stanja pređe u nultu stanje. Brzina približavanja nultom stanju, specificira se rasporedom polova zatvorenog sistema.

Neophodno je specificirati informacije koje su na raspolaganju u cilju dobijanja signala upravljanja. Kako su osobine sistema definisane rasporedom polova, zatvoreni sistem mora biti linearan. Povratna sprega mora takođe biti linearna. Ako se pretpostavi da su sva stanja dostupna i mjerljiva, dopustivo upravljanje može biti izraženo kao

$$u(k) = -L x(k) \quad (9.68)$$

Parametri koji se biraju u procesu projektovanja su period uzorkovanja i željeni raspored polova. Međutim, rijetko je korisnik u stanju da specificira ove parametre. Projektant mora da bude u stanju da neke druge parametre korelira sa ovim parametrima. Ti drugi parametri su oblik prelaznog procesa, koordinata stanje, vrijeme smirenja, preskok, itd.

Rijetko je moguće, međutim, pretpostaviti da su sve koordinate stanja i smetnje, dostupne i mjerljive. Ako je matematički model sistema na raspolaganju, moguće je neka nedostupna stanja sračunati (dobiti) iz dostupnih ulaza i izlaza.

Neka je diskretizirani sistem opisan sa

$$x(k+1) = \Phi x(k) + \Gamma u(k)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (9.69)$$

Sada će biti razmotren problem sračunavanja  $x(k)$  na osnovu izlaznog niza  $y(k), y(k-1), \dots$  i ulaznog niza  $u(k), u(k-1), \dots$

Neka se pretpostavi da stanje  $x(k)$  treba aproksimirati stanjem  $\hat{x}$  modela

$$\hat{x}(k+1) = \Phi \hat{x}(k) + \Gamma u(k) \quad (9.70)$$

koji ima isti ulazni signal kao i sistem (1.69). Ako je model opisan sa (1.70) identičan procesu (1.69) i ako su isti početni uslovi, tada će i  $\hat{x}$  biti identično sa  $x$ . Ako su početni uslovi ova dva sistema različiti  $\hat{x}$  će konvergirati ka  $x$  samo ako je sistem (1.69) asimptotski stabilan.

Rekonstrukcija u (1.70) ne koristi informaciju o mjerenom izlazu. Ova rekonstrukcija može biti poboljšana uvođenjem razlike između mjerene i ocijenjene vrijednosti,  $y - C\hat{x}$ , kao povratna sprega se dobije

$$\hat{x}(k+1/k) = \Phi \hat{x}(k/k-1) + \Gamma u(k) + K [y(k) - C\hat{x}(k/k-1)] \quad (9.71)$$

Notacija  $\hat{x}(k+1/k)$  znači da je ocjena, ili predikacija, signala  $x(k+1)$  bazirana na mjerenjima raspoloživim u trenutku  $k$ . Neka bude uvedena greška rekonstrukcije

$$\tilde{x} = x - \hat{x} \quad (9.72)$$

Oduzimanjem relacije (1.71) od (1.69) dobija se

$$\tilde{x}(k+1/k) = \Phi\tilde{x}(k-k-1) - K[y(k) - C\tilde{x}(k/k-1)] = [\Phi - KC]\tilde{x}(k/k-1) \quad (9.73)$$

Matrica  $K$  bira se tako da sistem (1.73) bude asimptotski stabilan i da uvijek konvergira nuli. Na taj način, uvodeći povratnu spregu po mjerenjima u rekonstrukciju, moguće je grešku svesti na nulu čak i kad je sistem opisan sa (1.69) nestabilan. Sistem opisan sa (1.71) naziva se observer sistema opisanog sa (1.72) radi toga što on proizvodi, daje, stanja sistema na osnovu mjerenja ulaza i izlaza.

Postoji mnogo varijanti observera (1.72). observer ima kašnjenje, tj.  $\hat{x}(k/k-1)$  zavisi samo od mjerenja u trenutku vremena  $k-1$ . Da se izbjegne ovo, sljedeći observer se može upotrijebiti

$$\begin{aligned} \hat{x}(k/k) &= \Phi\hat{x}(k-1/k-1) + \Gamma u(k-1) + K[y(k) - C(\Phi\hat{x}(k-1/k-1) + \Gamma u(k-1))] = \\ &= [I - KC][\Phi\hat{x}(k-1/k-1) + \Gamma u(k-1)] + ky(k) \end{aligned} \quad (9.74)$$

Greška rekonstrukcije je onda

$$\tilde{x}(k/k) = \tilde{x}(k) - x(k/k) = (\Phi - KC\Phi)\tilde{x}(k-1/k-1) \quad (9.75)$$

Dalje se može napisati da je

$$\begin{aligned} y(k) - C\hat{x}(k/k) &= Cx(k) - C\hat{x}(k/k) = C\tilde{x}(k/k) = \\ &= (C\Phi - CKC\Phi)\tilde{x}(k-1/k-1) = (I - CK)C\Phi\tilde{x}(k-1/k-1) \end{aligned} \quad (9.76)$$

Ako sistem ima  $p$  izlaza, tada je matrica  $I - CK$  dimenzija  $pxp$ . Matrica  $K$  može biti odabrana tako da je  $CK = I$  iako je  $\text{rank}(C) = p$ . Ovo podrazumijeva da je  $Cx(k/k) = y(k)$ , tj. izlazi sistema ocijenjeni su bez greške. Ovo će omogućiti da se iz (1.74) eliminiše  $p$  jednačina, što vodi redukciji reda observera. Reducirani observer ovog tipa nekada se naziva **Lienberger-ov observer**.

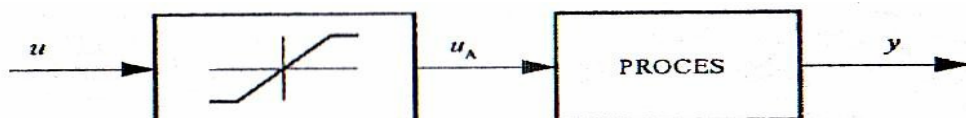
Izrazom (9.68) definisano je upravljanje kada su sva stanja mjerljiva. Kada stanja ne mogu biti mjerena, rezonski je upotrebiti zakon upravljanja.

$$u(k) = -L\hat{x}(k/k+1) \quad (9.77)$$

gdje se  $\hat{x}(k/k-1)$  dobija pomoću observera

$$\hat{x}(k+k/1) = \Phi\hat{x}(k/k-1) + \Gamma u(k) + K[y(k) - C\hat{x}(k/k-1)] \quad (9.78)$$

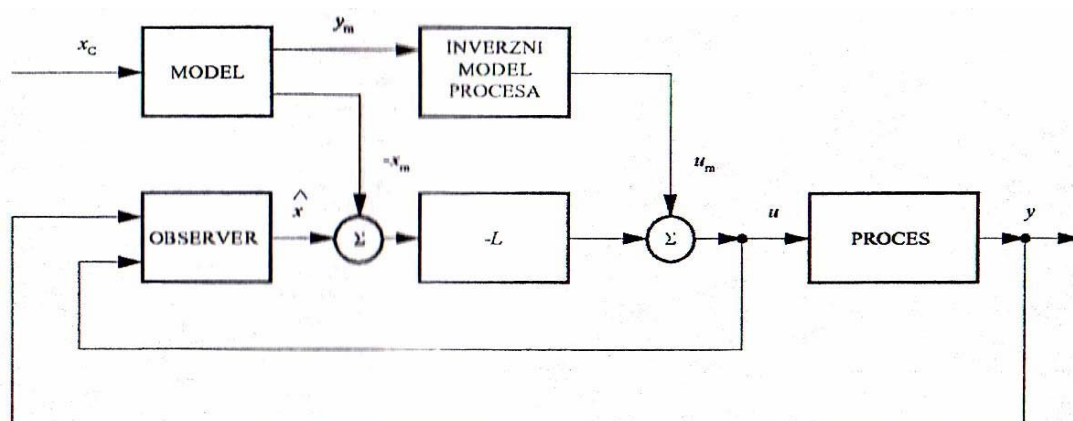
Blok dijagram koji predstavlja sistem opisan sa (9.77) i (9.78) dat je na slici 9.26.



Slika 9.26. – Blok dijagram regulatora dobijen kombinovanjem povratne sprege sa observerom

Struktura regulatora kao servo problema, tj. postojanja referentnog modela data je na slici 27. Neka je referentni model  $n$ -tog reda opisan jednačinom

$$\begin{cases} x_m(k+1) = \Phi_m x_m(k) + \Gamma_m u_x(t) \\ y_m(k) = C_m x_m(k) \end{cases} \quad (9.79)$$



Slika 9.27. – Struktura regulatora sa uvođenjem kombinovanog signala i sa povratnom spregom

Sistem sa slike 9.27. opisan je realcijama

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \Phi x(k) + \Gamma u(k) \\ u(k) &= L[x_m(k) - x(k)] + u_m(k) \\ \hat{x}(k+1/k) &= \Phi \hat{x}(k/k-1) + \Gamma(u(k)) + [y(k) - C\hat{x}(k/k-1)]K \end{aligned} \quad (9.80)$$

Ako izlaz iz aktuatora sa slike 25. nije mjeren, on može biti ocijenjen – obezbjeđujući da je njegova nelinearna karakteristika poznata. Za slučaj linearnosti sa zasićenjem, zakon upravljanja može biti napisan u vidu

$$\begin{aligned} \hat{x}(k/k) &= \hat{x}(k/k-1) + K[y(k) - C\hat{x}(k/k-1)] = \\ &= [A - KC]\hat{x}(k-1/k-1) + B\hat{u}_a(k-1) \\ \hat{u}_a(k) &= \text{sat}[L(x_m(k) - \hat{x}(k/k)) + u_m] \\ \hat{x}(k+1/k) &= A\hat{x}(k/k) + B\hat{u}_a(k) \end{aligned} \quad (9.81)$$

gdje je funkcija zasićenja (saturation) definisana kao

$$\text{sat}(u) = \begin{cases} u_{low} & u \leq u_{low} \\ u & u_{low} < u < u_{high} \\ u_{high} & u \geq u_{high} \end{cases} \quad (9.82)$$

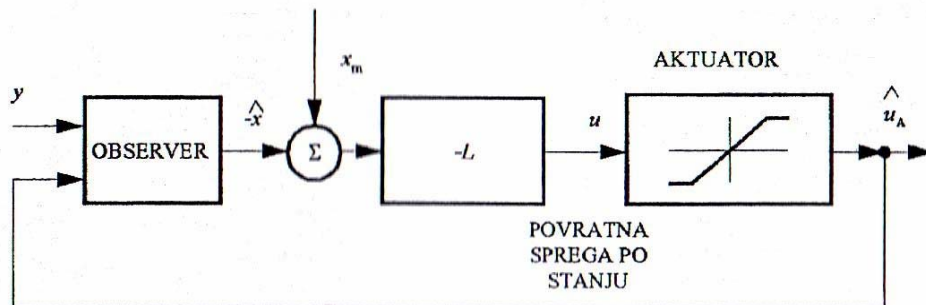
kada je upravljanje skalarno, i

$$\text{sat}(u) = \begin{cases} \text{sat} & u_1 \\ \text{sat} & u_2 \\ \vdots & \\ \text{sat} & u_m \end{cases} \quad (9.83)$$

kada je upravljanje vertikalno.

Veličine  $u_{low}$  i  $u_{high}$  odabiraju se tako da odgovaraju ograničenjima aktuatora. Blok dijagram regulatora sa modelom aktuatora dat je na slici 28.

Stanje sistema u (1.81) će uvijek biti ograničeno, ako je matrica  $(A-KC)$  stabilna. Dalje, jasno je da će  $x$  biti dobro ocijenjeno čak i ako je aktuator u stanju zasićenja, uz uslov da su veličine  $u_{low}$  i  $u_{high}$  odgovarajuće izabrane.



Slika 9.28. – Regulator sa kompenzacijom zasićenja

Polazeći od relacije (7.91)

$$R(q)u(k) = T(q)x_z(k) - S(q)y(k)$$

njen opšti oblik može se napisati u vidu

$$R(q)u(k) = T(q)x_z(k) - S(q)y(k) \quad (9.84)$$

Rearanžirajući jednačinu (1.83) dodajući i lijevoj i desnoj strani iznos  $A_o(q)u(k)$  tako da ona izgleda kao dinamički sistem sa observerom sa tri ulaza, komandovanim signalom  $x_z$ , procesnim izlazom i upravljanjem  $u$ , dobija se:

$$A_o u = T x_z - S y + (A_o - R) u \quad (9.85)$$

gdje je:  $A_o(q)$  – željeni karakteristični polinom observera.

Regulator sa kompenzacijom zasićenja dat je izrazom

$$\begin{aligned} A_o v &= T x_z - S y + (A_o - R) u \\ u &= \text{sat} v \end{aligned} \quad (9.86)$$

Ovaj regulator ekvivalentan je regulatoru (9.84) kada sistem nije u zasićenju. Kada je upravljanje u zasićenju, onda se sistem može interpretirati kao observer sa dinamikom definisanom karakterističnim polinomom observera  $A_o$ .

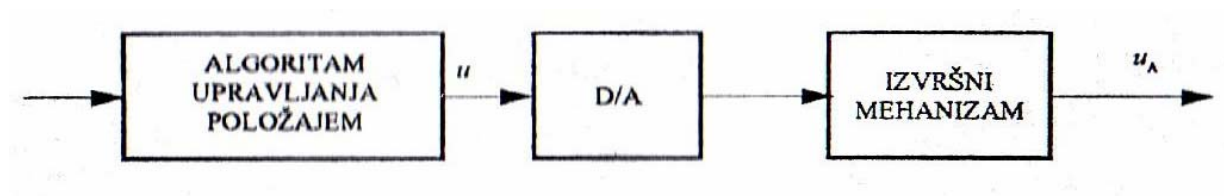
Blok dijagram (9.86) dat je na slici 9.29.

Treći način rješenja problema zasićenja regulatora može se ilustrovati kroz primjer predstavljen u prostoru stanja. Neka je funkcija prenosa PI regulatora data u diskretnom obliku

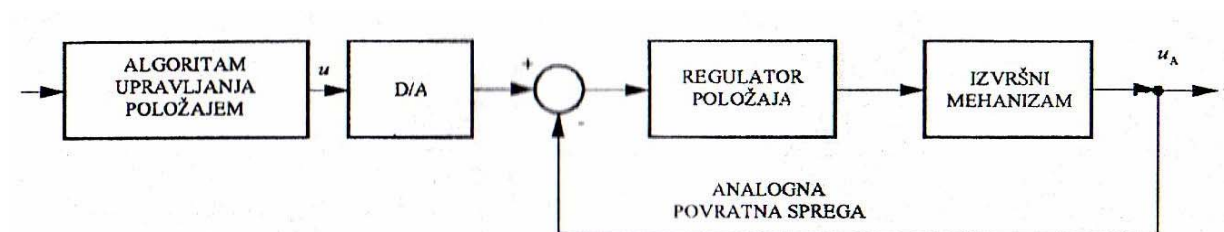
#### 9.4.2 Način povezivanja izvršnih mehanizama sa upravljačkom strukturom

Postoji više načina upravljanja izvršnim organima, tj. njihovog povezivanja sa regulatorom. Na slici 9.30. daje se direktno upravljanje položajem.

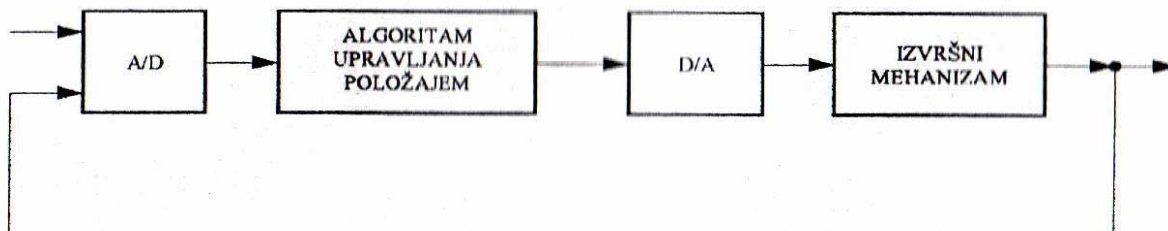
Na slici 9.31. dat je primjer upravljanja izvršnim mehanizmom sa povratnom spregom po položaju.



Slika 9. 30. – Direktno upravljanje položajem



Slika 9.31. – Upravljanje sa neprekidnom povratnom spregom po položaju



Slika 9. 32. – Upravljanje sa diskretnom povratnom spregom po položaju

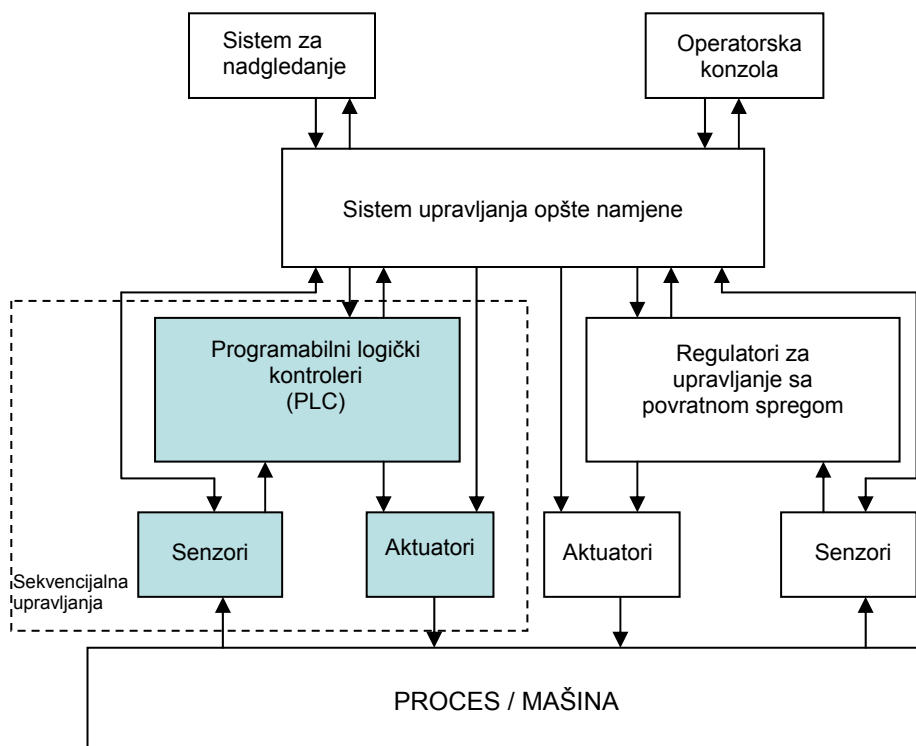
Na slici 9.32. data je blok šema upravljanja sa diskretnom povratnom spregom po položaju. Pri tome, algoritam upravljanja položajem je realizovan digitalno.

## 10. Sekvencijalni sistemi automatskog upravljanja

Kada se u praksi sriječemo sa ON/OFF funkcijama ili ON/OFF stanjima neke opreme u procesima kojima upravljamo, takav tip upravljanja se naziva logičko ili prekidačko upravljanje. Stanju ON najčešće odgovara logička 1, a stanju OFF logička 0. Jednostavnost ovakvog tipa upravljanja ga čini pogodnim za upotrebu u upravljanju automatskih mašina i procesa u kojima se zahtijeva da proces ili mašina slijede sekvencu operacija. Primjena logičkog upravljanja u sekvencama rada dovela je do termina sekvencijalno upravljanje.

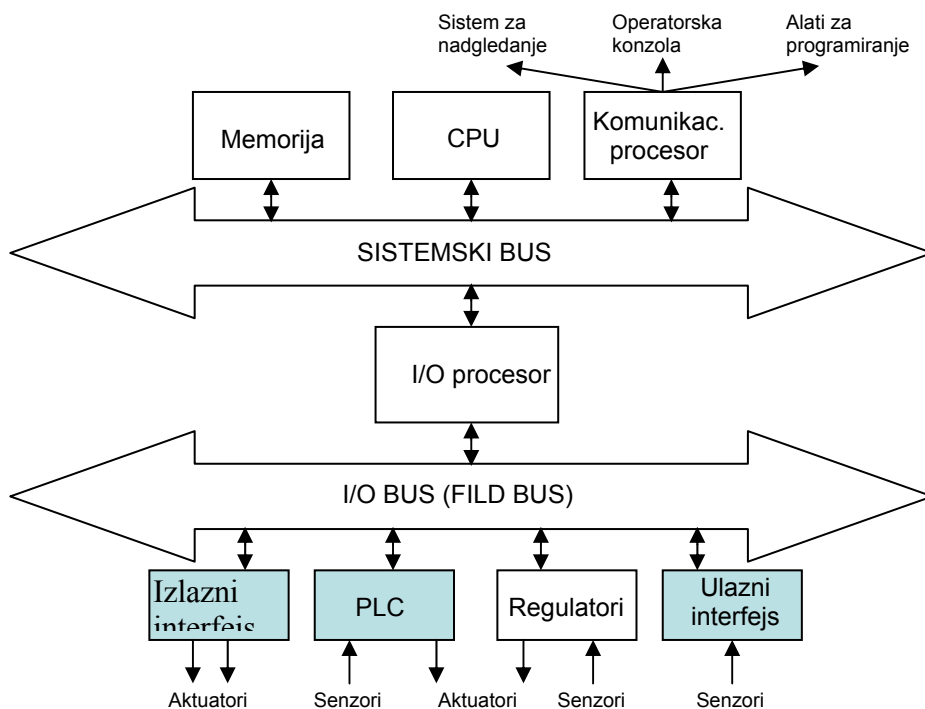
Sekvencijalno upravljanje može da se realizuje pomoću elektromehaničkih releja, raznih pneumatskih i fluidičkih komponenti, opreme na bazi poluprovodnika (tranzistori, mikroprocesori...) i naravno presonalnih računara. Računari specijalne namjene koji se koriste za realizaciju sekvencijalnog upravljanja se zovu programabilni logički kontroleri- PLC.

### 10.1 Sistem upravljanja opšte namjene



Glavna odgovornost sistema upravljanja opšte namjene je da koordinirano upravlja jednim ili više procesa ili mašina. Sistem upravljanja opšte namjene obavlja sledeće funkcije:

1. Izvršava komande i prima informacije o statusu PLC i lokalnih regulatora regulatora za upravljanje u povratnoj sprezi individualnih mašina/procesa, kao i informacije o procesnim varijablama poput brzine, pozicije, temperature....
2. Da izdaje komande i prima informacije o statusu aktuatora i senzora bilo da oni opslužuju PLC ili pojedinačne regulatore za upravljanje u povratnoj sprezi
3. Prijem komandi iz i slanje status informacija u operatorsku konzolu za potrebe operatora procesa ili mašine
4. prijem komandi iz i slanje status informacija u ručnu komandu i automatski sistem za nadgledanje rada čitavog sistema ili dijelova sistema unutar zaokruženog procesa ili grupe mašina.
5. Izmjena informacija o statusu unutar samog sistema opšte namjene između delova sistema i podsistema.



Sl. 10.1. Tipična arhitektura sistema upravljanja opšte namjene

**Memorija** obezbeđuje storišanje programa i uvođenje podataka u sistem preko komunikacionog procesora.

**Centralna procesorska jedinica (CPU)** generiše upravljačka dejstva izvršavanjem programa i vrši koordinaciju drugih funkcija.

**Ulazno-izlazni procesor (I/O procesor)** obezbeđuje da CPU izdaje komande i prima informacije o statusu opreme i signala iz PLC i regulatora i razmjenjuje podatke neophodne za upravljačka dejstva preko ulaznog i izlaznog interfejsa.

**Komunikacioni procesor** prikuplja komande iz procesa i obezbeđuje status informacija za sistem nadgledanja i operatorsku konzolu i omogućava interakciju sa razvojem programa i konfiguracionih alata.

Sekvencijalno upravljanje ima sve veći značaj u upravljanju "kontinualnih" procesa, jer oni nijesu stvarno kontinualni. Oni moraju startovati i zaustavljati se sa prethodno precizno definisanim sekvencama akcija. Primjer za ovo je startovanje termoelektrane koja radi na ugalj ili mazut, za čije je puno opterećenje potrebno vrijeme od nekoliko sati. Taj prelazni režim, ili režim ili režim upuštanja termoelektrane od stanja mirovanja do punog funkcionisanja vodi se sekvencijalnim sistemom upravljanja. Isti je slučaj kada se elektrana zaustavlja; jednostavno mora biti ispunjen veliki broj sekvenci upravljanja prema tačno definisanom redosledu i programu.

Porast značaja sekvencijalnog upravljanja doveo je do povećane potrebe za grafičkim programiranjem i tehnikama dokumentovanja velikih i kompleksnih planova sekvencijalnih upravljanja.

Međunarodna Elektrotehnička Komisija (IEC) je standardizovala sekvencijalne funkcionalne karte/dijagrame (SFC) za predstavljanje tih planova. Svaka SFC komponovana je na osnovu tri bazična elementa i to: korak, akcija i tranzicija.

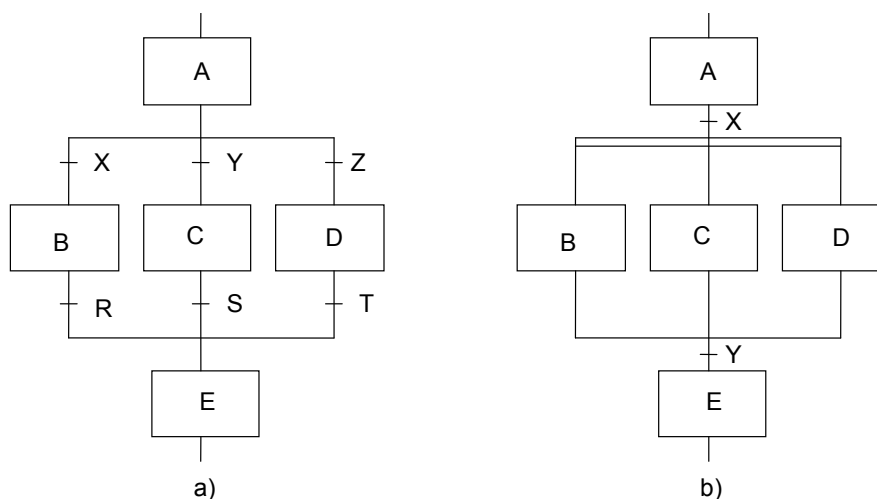


**Korak** predstavlja tekuće stanje PLC i upravljanog sistema unutar sekvencijalnog plana upravljanja. Na svakom koraku odvija se skup **akcija**. Uslov **prelaza/tranzicije** određuje se kada stanje PLC i upravljanog sistema evoluira u sledeći korak ili korake.

Kod SFC se razlikuju dva slučaja:

1. izbor-selekcija jednog broja alternativnih nasljednika na sljedeći korak bazirano na uslovima
2. inicijalizacija dvije ili više nezavisnih sekvenci na izvršavanje bazirano na uslovu tranzicije (paralelno odvijanje sekvence)

Svala sekvenca mora imati svoj početak, koga označavamo sa „Start“.



Sl 10.2. Sekvencijalni funkcionalni dijagrami; a) izbor koraka i konvergencija na korak E; b) Paralelne sekvence (koraci B,C i D) i konvergencija u korak E; na slici X,Y,Z su tranzicije iz jednog koraka u drugi

## LEDDER DIJAGRAMI

Sekvencijalni sistemi upravljanja obično su projektovani upotrebom LEDDER (lestvičastih) dijagrama, zbog široke primjene elektromehaničkih releja. Mnogi PLC imaju mogućnost programiranja sa ladder dijagramima. Ladder dijagrami uvedeni od programera, transliraju se u ekvivalentne Boolove jednačine sa PLC tako da logičke funkcije mogu biti realizovane.

*Upravljački releji-* namotaj releja sadrži pokretno jezgro i elektromagnet. Obično relej ima dva para kontakata, jedan je zatvoren a drugi otvoren, u zavisnosti od toga ima li napona na namotajima ili nema. Obično je kontakt releja normalno otvoren kada je namotaj pod naponom a normalno zatvoren kada je namotaj bez napona.

*Solenoid.* Solenoid je elektromagnetni aktuator. Obično se koristi za akucaciju, pokretanje pneumatskih i hidrauličkih ventila koji kontrolišu protok fluida u cilindrima.

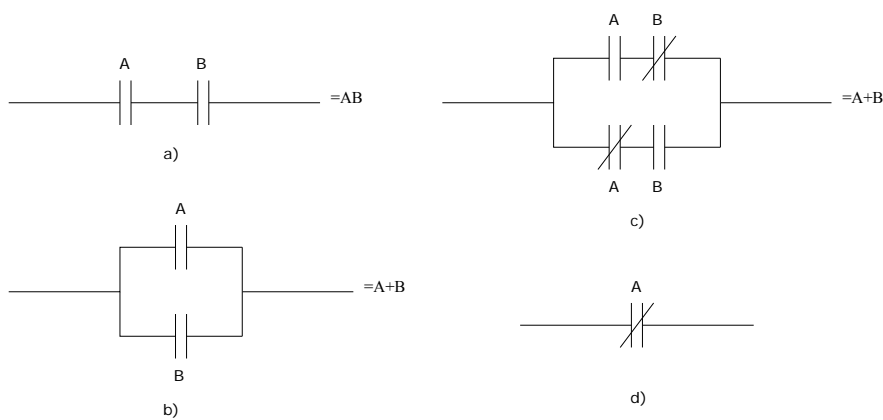
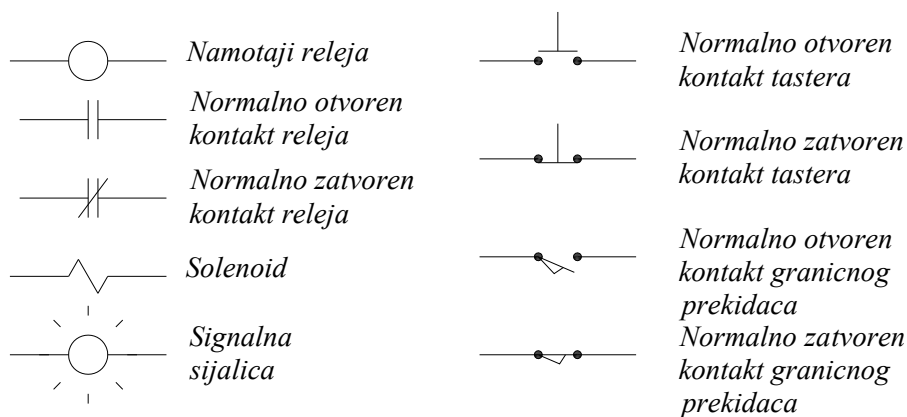
*Sijalica, led dioda.* Sijalica ili led dioda često se koriste u sekvencijalnim sistemima upravljanja da indiciraju operatoru stanje mašine ili procesa.

*Prekidači.* Kontaktni prekidači dopuštaju da neki električni krug bude otvoren ili zatvoren. Normalno otvoreni prekidač (taster) zatvara krug između dva kraja kada se prekidač otpusti.

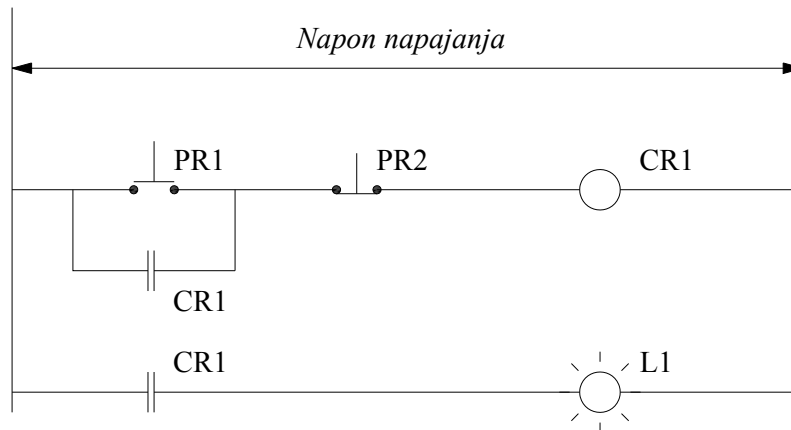
*Granični prekidač.* Drugi tip prekidača je granični prekidač koji je aktiviran mehaničkim kontaktom sa manipulativnom polugom. Normalno otvoren granični prekidač uspostavlja krug između dva kraja kada je prekidač aktiviran i otvara krug kada je prekidač deaktiviran.

Električni dijagrami za klasičnu relejnu logiku mogu biti konstruisani crtanjem dvaju vertikalnih linija koje predstavljaju električne provodnike (sabirnice) sa kontrolnim naponom priključenim između njih. Horizontalne linije koje se pojavljuju na dijagramu rezultat su različitih komponenti pomoću kojih se realizuje određena funkcija. Rezultat realizacije tih logičkih funkcija je Ladder (ljestvičasti) dijagram, jer podsjeća na ljestve.

*Logičke funkcije.* Logičke funkcije koje se realizuju relejnom logikom određene su kontaktima prekidača tj. konfiguracijom kontakata u Ladder dijagramu.



Sl 10.3. Konfiguracija kontakata za razne logičke funkcije; a) AND; b) OR; c) EXCLUSIVE; d) NOT



Sl. 10.4 Indikatorska sijalica (L1) upravljana sa dva tastera/prekidača (predstava pomoću ladder dijagrama)

Dakle, iz odgovarajućeg ladder dijagrama mogu se dobiti Boolove jednačine. U slučaju da se, umjesto relejnog sistema, želi koristiti PLC za realizaciju logičkih algoritama, ova konverzija ladder dijagrama može se automatski izvršiti od strane PLC-a koji dopušta direktno uvođenje ladder dijagrama, ali se mora postići provjerom konfiguracije kontakata.

Kao što se vidi iz ladder dijagrama, on opisuje aktiviranje upravljačkog releja CR1 i sijalice L1. Krug za CR1 ima normalno otvoren kontakt CR1 u OR konfiguraciji. Ova grupa je u rednoj vezi i stoga formira AND funkciju sa normalno zatvorenim tasterom  $\overline{PR2}$  (NOT funkcija)

Boolova jednačina koja opisuje ovaj krug je

$$CR1 = (CR1 \cdot PR1) \cdot \overline{PR2}$$

Jednačina signalnog kruga je

$$L1 = CR1$$

Na siti način kako se može iz ladder dijagrama dobiti Boolovih jednačina, tako se iz Boolovih jednačina može dobiti ladder dijagram.

### Projektovanje sekvencijalnih logičkih sistema upravljanja

Osnovni cilj ovog projektovanja je da se izraze upravljački zahtjevi i relacije u kategorijama Boolovih jednačina.

Postoje tri opšta pristupa u dobijanju Boolovih jednačina. Prvi se zasniva na dobijanju odgovarajućih jednačina iz napisanih izraza prekidačkih/logičkih funkcija koje treba da budu realizovane. Drugi pristup koristi prekidačke tabele, tabele logičkih relacija, koje indiciraju uslove prekidanja izlaza i ulaza za vrijeme sekvencijalnih operacija. Treći pristup bazira se na dijagramima toka ili dijagramima prelaza iz stanja u stanje, koja definišu rad ili operacije mašina ili tokove procesa.

**Memorijska funkcija.** Pri osmišljavanju logike po kojoj će biti realizovano sekvencijalno upravljanje, često se zahtjevaju funkcije koje obezbjeđuju pamćenje/memorisanje poslednjih ulaza i sekvenci, tako da sljedeći korak može biti učinjen u odgovarajućem trenutku.

Npr.

$LAMP = PR1 \cdot PR2$  - promjenjiva LAMP zavisi od promjenjivih PR1 i PR2 ali i od toga šta je bilo na tasteru prilikom njegovog poslednjeg korišćenja.

Razmotrimo sljedeće jednačine

$$A = \overline{B + A[0]}$$

$$B = \overline{A + A[1]}$$

Kada se druga jednačina uvrsti u prvu, dobija se:

$$A = (A + A[1]) \cdot \overline{A[0]}$$

Zavisnost A od A[1] i A[0] data je u tabeli

| A[1] | A[0] | A |
|------|------|---|
| 0    | 0    | A |
| 0    | 1    | 0 |
| 1    | 0    | 1 |
| 1    | 1    | 0 |

Varijabla A može biti 1 samo kada je A[0]=0. Ova karakteristika koristi se često u upravljanju mašina i procesa kada je sigurnije imati izlaz OFF kada na ulazu postoje konfliktne uslovi. (Recimo tasteri STOP i START jednovremeno pritisnuti)

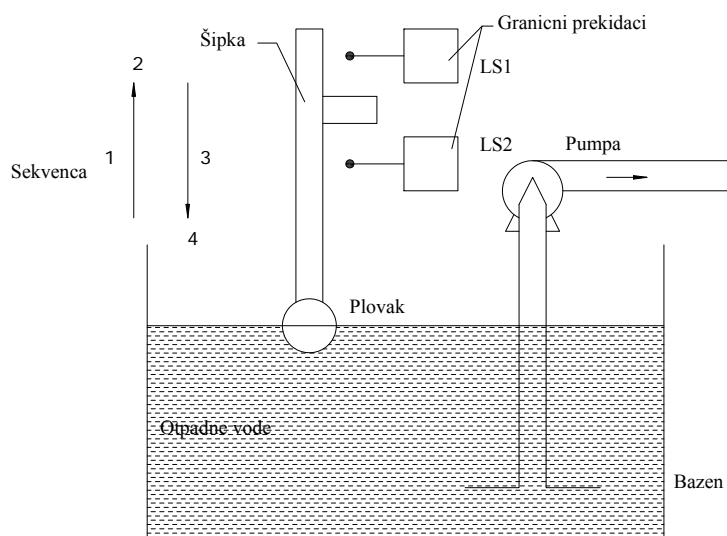
**Tajming funkcije.** Tajming funkcije (povezane sa vremenom) često su zahtijevane u sistemima upravljanja (npr, vremensko kašnjenje u vidu pauze između dva događaja i sl.) Najpoželjniji slučaj je kada tajming oprema daje indikacije o svom stanju. Signal kojim se tajmer kontroliše šalje PLC a ulaz u PLC iz tajmera vraća informaciju da li se ostvarilo željeno vrijeme kašnjenja. Nakon specificiranog vremena kašnjenja  $\Delta t$ , ulaz kontrolera,  $TIMER[\Delta t]$ , mijenja se od 0 do 1.

TIMER može biti vraćen na 0 u bilo kom trenutku bez kašnjenja postavljanjem  $TIMER=0$ .  
 Primjer: ako signalna sijalica treba da bude uključena 10 sekundi poslije aktiviranja prekidača, ako je vrijeme kašnjenja na tajmeru postavljeno na 10 sekundi, tada se logika upravljanja može izraziti jednačinama:

$$TIMER = SWITCH$$

$$LAMP = TIMER[10s]$$

### Projektovanje logičkog sistema.



Na slici je dat primjer bazena otpadnih voda koji povremeno mora pumpom biti ispražnjen, kada otpadne vode u tom sabirnim bazenu dostignu odgovarajući nivo. Detekcija nivoa vode vrši se pomoću nivometra sa plovkom koji pokreće šipku, a za detekciju gornjeg i donjeg

nivoa koriste se prekidači LS1 i LS2. Izlazi sa tih prekidača predstavljaju ulaze u PLC, dok će izlaz iz PLC kontrolisati motor pumpe.

Dakle zadatak je naći Boolovu jednačinu koja definiše izlaz PUMP u funkciji ulaza LS1 i LS2.

Ono što treba da uradi sistem upravljanja zapravo je:

1. Pumpa je uključena ( $PUMP=1$ ) i treba da ostane u tom stanju (ON) sve dok je prekidač LS1 aktivan ( $LS1=1$ ).
2. Pumpa treba da je isključena i ostaje u tom stanju (OFF) sve dok je granični prekidač LS2 aktivan ( $LS2=1$ ).

Dakle,

$$PUMP[1] = LS1$$

$$PUMP[0] = LS2$$

$$PUMP = (PUMP \cdot PUMP[1]) \cdot \overline{PUMP[0]}$$

Sličan slučaj kao u primjeru memorijske funkcije, jer pumpa mora ostati uključena i kada se prekidač LS1 isključi, sve dok se ne uključi prekidač LS2.

Uvrštavanjem se dobija:

$$PUMP = (PUMP + LS1) \cdot \overline{LS2} \text{ što predstavlja Boolovu jednačinu koju smo tražili.}$$

**Prekidačke table.** Kod kompleksnijih sistema, zapis funkcija u vidu iskaza nije praktičan, pa se upravljačke sekvence predstavljaju u podesnjoj formi. Prekidačke table čine preglednijim one ulazne kombinacije koje dovode do promjena u ulazima, a odatle je moguće pisati odgovarajuće Boolove jednačine.

Za već opisani sistem bazena otpadne vode, prekidačka tabela izgleda ovako:

|   | SEKVENCA          | LS1 | LS2 | PUMP | S |
|---|-------------------|-----|-----|------|---|
| 1 | Punjenje bazena   | 0   | 0   | 0    |   |
| 2 | LS1 aktiviran     | 1   | 0   | 1    | * |
| 3 | Pražnjenje bazena | 0   | 0   | 1    |   |
| 4 | LS2 aktiviran     | 0   | 1   | 0    | * |

Za vrijeme koraka 1 ni jedan granični prekidač nije aktiviran i pumpa je isključena.

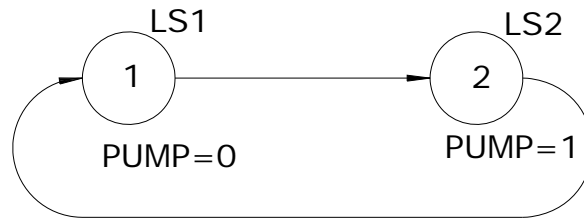
Na koraku 2 LS1 je aktiviran i pumpa je uključena, ON..

Za vrijeme koraka 3 ni jedan prekidač nije uključen, ali pumpa mora da ostane uključena (jer se bazen nije ispraznio dovoljno)

Na koraku 4 prekidač LS2 se uključuje, a pumpa je isključena, OFF.

Sljedeći korak je ponovo korak 1 i počinje novi ciklus.

**Dijagram stanja.** Dijagram stanja omogućava ilustraciju prekidačkih sekvenci i onda kada su moguće mnoge alterativne sekvence. Dijagram stanja za razmetrani primjer izgleda ovako:



Stanja sistema predstavljena su krugovima 1 i 2. Promjena stanja 1 u stanje 2 može se izvršiti samo kada je ispunjen uslov  $LS1=1$ , kao što se sistem može vratiti u stanje 1 samo kada je  $LS2=1$ .

Neka je za proizvoljno stanje  $S$ ,  $S=1$  kada je sistem u stanju  $S$  i  $S=0$  kada sistem nije u tom stanju. Uvodimo jednačinu  $S[1]$  upotrebom strelice usmjerene prema stanju  $S$  i jednačinu  $S[0]$  upotrebom strelice koja izlazi iz stanja  $S$ . Sa slike se vidi da postoje dva stanja,  $S1$  i  $S2$ . Uslovi da se stanja promijene u ON su

$$S1[0] = S2 \cdot LS1$$

$$S2[0] = S1 \cdot LS2$$

A uslovi da se stanja promijene u OFF su

$$S1[1] = S2 \cdot LS2$$

$$S2[1] = S1 \cdot LS1$$

Jednačine koje izražavaju  $S1$  i  $S2$  su onda date kao:

$$S1 = (S1 + S2 \cdot LS2) \overline{(S2 \cdot LS1)}$$

$$S2 = (S2 + S1 \cdot LS1) \overline{(S1 \cdot LS2)}$$

Sa dijagrama se vidi da je PUMP postavljena na ON u stanju  $S2$ , pa je  $PUMP=S2$ .