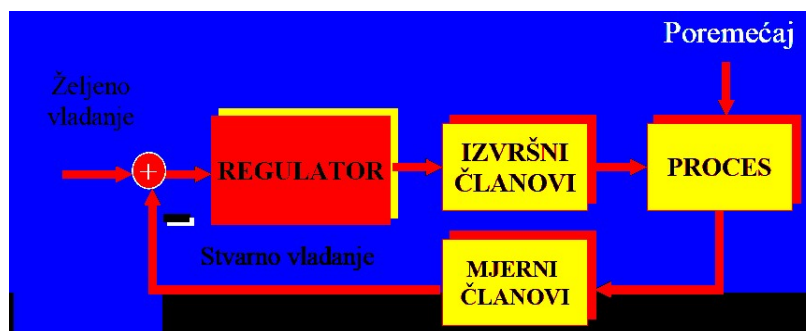


REGULATOR – UPRAVLJAČKI ALGORITMI

SAU sadrži četiri osnovne komponente:

- Objekt upravljanja (proces)
- Izvršni organ (aktuator)
- Senzore (mjerne pretvarače)
- Regulator**



Regulator

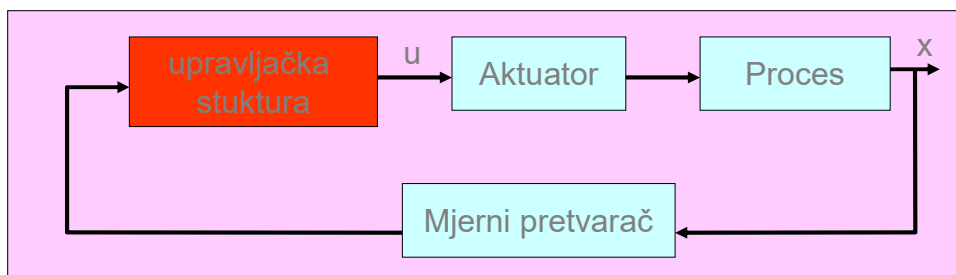
- Suštinska je uloga regulatora da obrađuje regulaciono odstupanje:

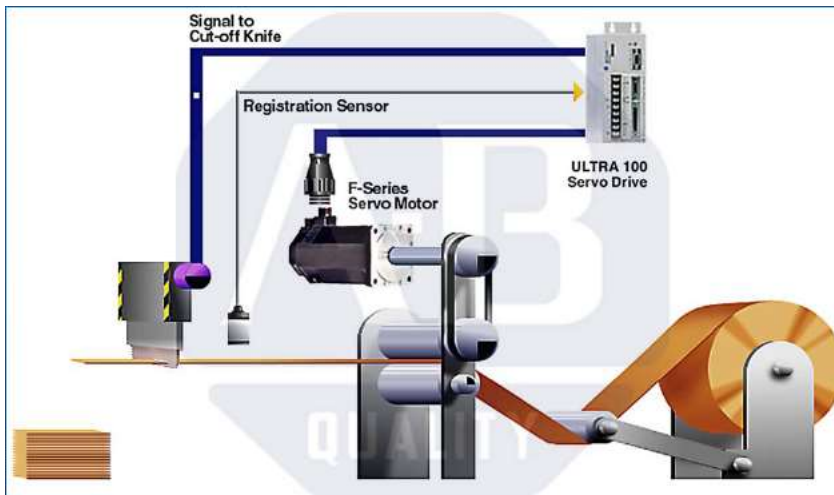
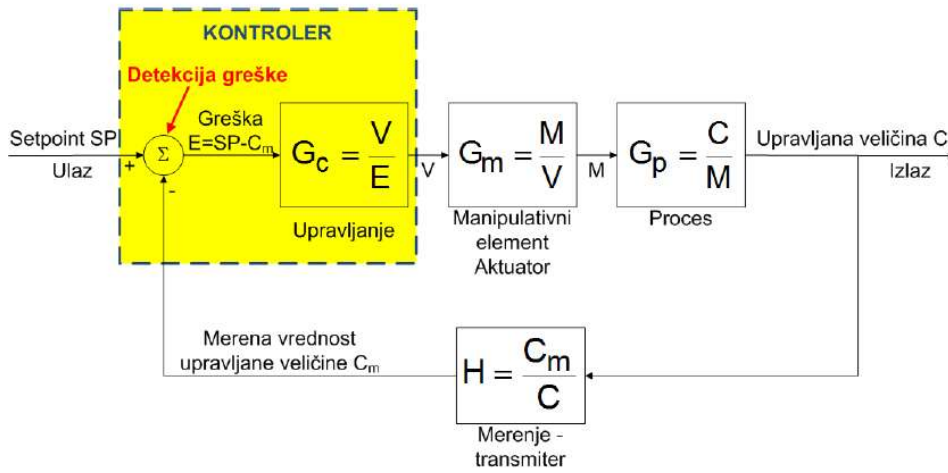
$$e(t) = r(t) - y(t)$$

po određenom algoritmu (zakonu upravljanja):

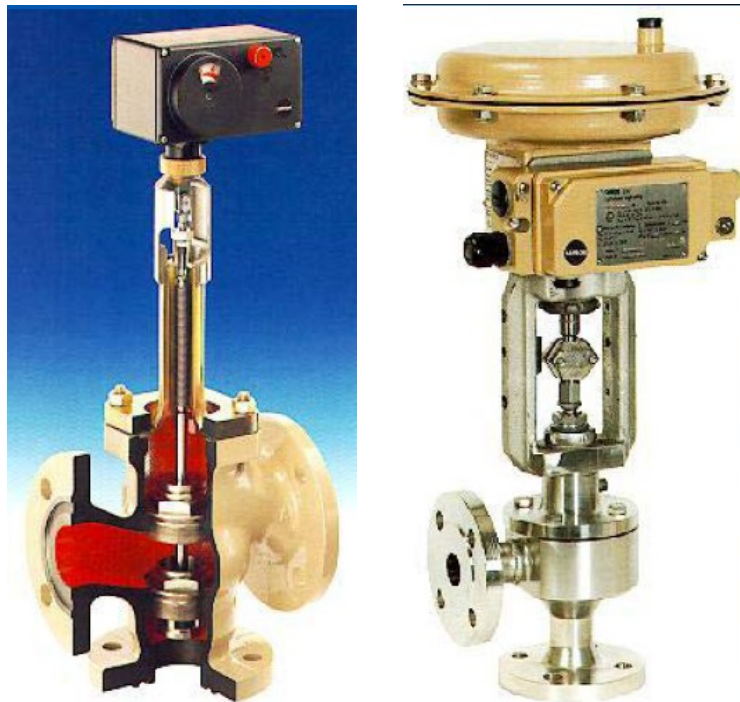
$$u = f(e(t))$$

djelujući preko izvršnog elementa na proces (zatvoreni tok signala).





Primjer servo sistema



Senzori

- Mjere fizičku veličinu
- Pretvaraju izmjerenu veličinu najčešće u prikladnu električnu kako bi je regulator mogao prihvatiti
- Vrsta senzora zavisi od sistema kojeg upravljamo



Regulatori

- Vode proces u skladu sa zadatim performansama
- Obrađuju sve relevantne informacije sa procesa i njegovog okruženja
- Predstavljaju “mozak” tehničkog sistema
- Koordiniraju senzore i aktuatore



U sistemima automatskog upravljanja

- **Senzori predstavljaju “oči”**
- **Aktuatori su “mišići”**
- **Komunikacioni kanali su “živci”**
- **Regulatori su “mozak”**

Teorija automatskog upravljanja omogućuje tehničkim sistemima kvalitet i postizanje cilja !!

• **Košarkaš dobrog vida i snažnih mišića postaje vrhunski igrač, ako posjeduje izvrsnu koordinaciju očiju i ekstremiteta. Ovu koordinaciju obavlja mozak naučen stalnom vježbom.**

• **U tehničkom sistemu koordinaciju između senzora i aktuatora obavlja algoritam upravljanja (regulator). On predstavlja izraz znanja automatičara o teoriji upravljanja.**

U algoritmu upravljanja je stoga srž automatike!

Better Sensors

Provide better *Vision*

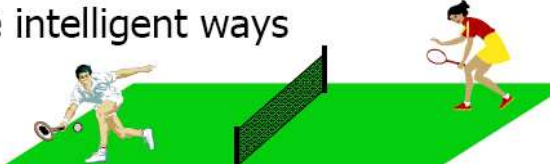


❖ **Better Actuators**
Provide more *Muscle*



Better Control

Provides more finesse by combining *sensors* and *actuators* in more intelligent ways



The Laplace Transform



- Pierre-Simon Laplace (1749-1827)
- Laplace proved the stability of the solar system. He also put the theory of mathematical probability on a sound footing
- "*All the effects of Nature are only the mathematical consequences of a small number of immutable laws.*"
- Studied, but did not fully develop the Laplace transform

Jean Baptiste Joseph Fourier



- Born in 1768 in Auxerre, France
- Died in 1830 in Paris
- Was nearly guillotined in 1794
- Was taught by Laplace, Lagrange and Monge
- Created Cairo Institute
- Developed Fourier series while prefect in Grenoble



- Oliver Heaviside (1850-1925)
- English electrical engineer who adapted the use of complex numbers for the study of electrical circuits
- Developed techniques for applying Laplace transform for solving differential equations



Edward Routh, 1831 (Quebec)-
1907 (Cambridge, England)



Adolf Hurwitz, 1859
(Germany)-1919 (Zurich)

Harold Nyquist



- Born in 1889 in Sweden
- Died in 1976, USA
- Yale PhD, 1917
- Career at Bell Labs
- 138 patents
- Nyquist diagram, criterion, sampling theorem
- Laid the foundation for information theory, data transmission and negative feedback theory

Hendrik Wade Bode



- 1905-1982, USA
- PhD from Columbia in 1935
- Entire career at Bell Labs
- Invented magnitude and phase frequency plots in 1938
- Many other contributions in electrical engineering and control

Root Locus Method

- Developed by Evans while he was a graduate student at UCLA
- Uses the poles and zeros of the open-loop system to determine the closed-loop poles when ONE parameter is changing

Walter R. Evans, 1920-1999



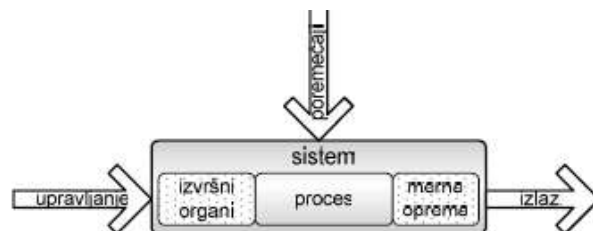
Upravljanje Procesima

Gledano potpuno opšte u svakom procesu postoji neki *ulaz u proces* (informacija, materijal, signal) koji se mijenja unutar njega i napušta ga u izmijenjenoj formi (*izlaz procesa*).

Svrha samog procesa je, prema tome, ostvarivanje odgovarjuće promjene. Već je istaknuto da ni jedan proces ne funkcioniše onako kako bismo mi to željeli, odnosno uvijek postoji još nešto što bi se moglo izmijeniti tako da se poveća njegova efikasnost, smanje troškovi i vrijeme izvršavanja itd.

Da bi se ostvario željeni rezultat projektuje se *upravljajući sistem* čiji je zadatak da menja ulaze procesa radi poboljšanja njegove performanse. U skladu sa time svaki sistem automatskog upravljanja ima dvije cjeline – *proces* i *upravljanje*

Sa gledišta upravljanja i krajnjeg proizvoda, proces se može posmatrati kao preslikavanje skupa spoljnih stimulansa (*ulazi procesa - nezavisno promjenljive*) koji utiču na operaciju koja se u procesu progresivno odvija na skup veličina koje odražavaju uslove pod kojima proces radi i efekte koji se pri tome postižu (*izlazi procesa – zavisno promjenljive*). Uticaj promjene nekog ulaza na sam proces mjeri se promjenom izlaza.



U principu izlazi procesa određeni su mjernom opremom koja je ugrađena u proces. Izbor ove opreme vrši projektant procesa i on zavisi od niza faktora, počev od cijene same mjerne opreme, pa do efekata koji se žele mjeriti. Izvesno je jedino da izbor izlaza mora biti takav da se na osnovu izmjerenih vrednosti može dobiti kompletna slika o svim elementima procesa koji su od značaja za ostvarivanje krajnjeg cilja.

Ulazi procesa se takođe određuju pri projektovanju. Pri tome se odabira niz veličina čijim izborom se direktno može uticati na ponašanje procesa (*upravljivi ulazi*). Za ovako odabrane ulaze ugrađuju se odgovarajući izvršni organi pomoću kojih se ostvaruje promjena ulaza.

Međutim, pored ovih veličina postoje i spoljni faktori na koje operator ne može da utiče (atmosferski uslovi, vibracije itd.), a koji izazivaju određene promjene u ponašanju procesa. Ovi ulazni signali se nazivaju *poremećaji*.

Izvršni organi, sam proces i mjerna oprema čine *sistem*, odnosno cjelinu za koju se određuje upravljanje. Potrebno je napomenuti da se izraz "proces" veoma često koristi i za označavanje cijelog sistema.

Kod složenih procesa međusobne zavisnosti ulaza i izlaza su izuzetno kompleksne. Naime, promjena jednog ulaza izaziva promjene više izlaza. Otuda se ne može očekivati da će se podešavanjem samo jednog upravljivog ulaza postići željeni efekat.

Najčešće operator podese jedan ulaz i sačeka da vidi efekat te promjene na sve izlaze, zatim mijenja sledeći ulaz i tako redom. Veoma često se posle promjene drugog ulaza, mora ponovo podešavati prvi. Cio problem se dodatno komplikuje usled nelienarnih zavisnosti između ulaza i izlaza, koje otežavaju ili čak i ne omogućavaju da se predvidi efekat nekih promjena. Tome treba dodati i činjenicu da čitav niz procesa ima *transportno kašnjenje*, koje se ogleda u tome da se promjena nekog ulaza tek poslije izvjesnog vremena odražava na promjenu izlaza (tipičan primer su procesi zagrijavanja i hlađenja).

Vrste procesa

Zahtjevi u pogledu upravljanja procesom zavise i od njihove prirode. U tom pogledu oni se mogu podijeliti u tri kategorije:

laboratorijski procesi - izvođenje složenih eksperimenata koji zahtijevaju posebnu stručnost operatera ili testiranje ispravnosti odgovarajuće opreme. Kod ovih procesa upravljanjem se održavaju uslovi neophodni za uspješno obavljanje eksperimenata.

šaržni procesi (batch) - karakterisani vremenom pripreme (neproduktivno vrijeme) i vremenom obrade (operacije)-

proizvodnja pojedinačnih proizvoda kroz niz utvrđenih operacija. Tipični primjeri ovakvih procesa su proizvodnja hleba, valjanje ingota, proizvodnja paketa stočne hrane, proizvodnja karoserija automobila itd. Posle jednog ciklusa proizvodnje neophodno je da se proizvodna oprema pripremi za sledeći ciklus. Istovremeno se može i promijeniti specifikacija proizvoda (receptura, dimenzije itd.). Imajući u vidu da je *vrijeme pripreme* zapravo neproduktivno vrijeme izvesno je da je jedan od zadataka upravljanja da se to vrijeme smanji.

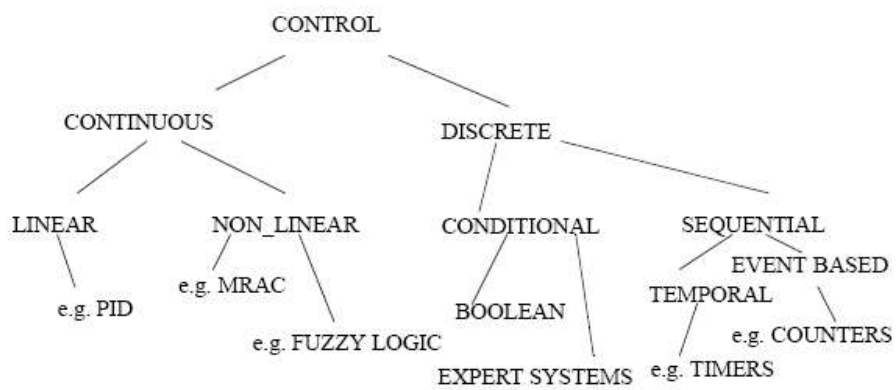
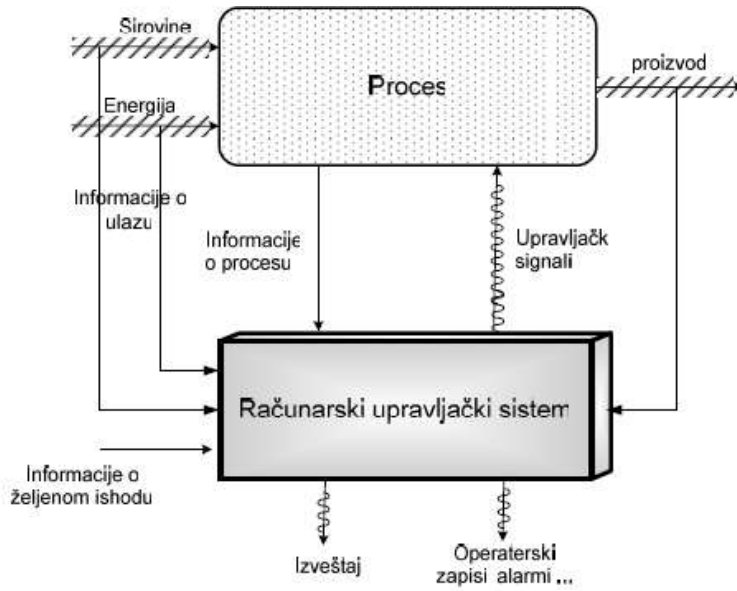
- **kontinualni procesi - traju duži vremenski period**

Kontinualni procesi - procesi kod kojih se proizvodnja održava tokom dužeg vremenskog perioda (nekoliko mjeseci ili godina).

Tipičan primjer ovih procesa je proces prerade nafte u okviru koga se dobijaju različiti derivati. U toku proizvodnje moguće je mijenjanje odnosa pojedinih derivata ali to se postiže bez zaustavljanja samog procesa.

Zadatak upravljačkog sistema je da održava uslove pod kojima proces radi da bi se dobio željeni kvalitet proizvoda.

RAČUNARSKI UPRAVLJAN PROCES



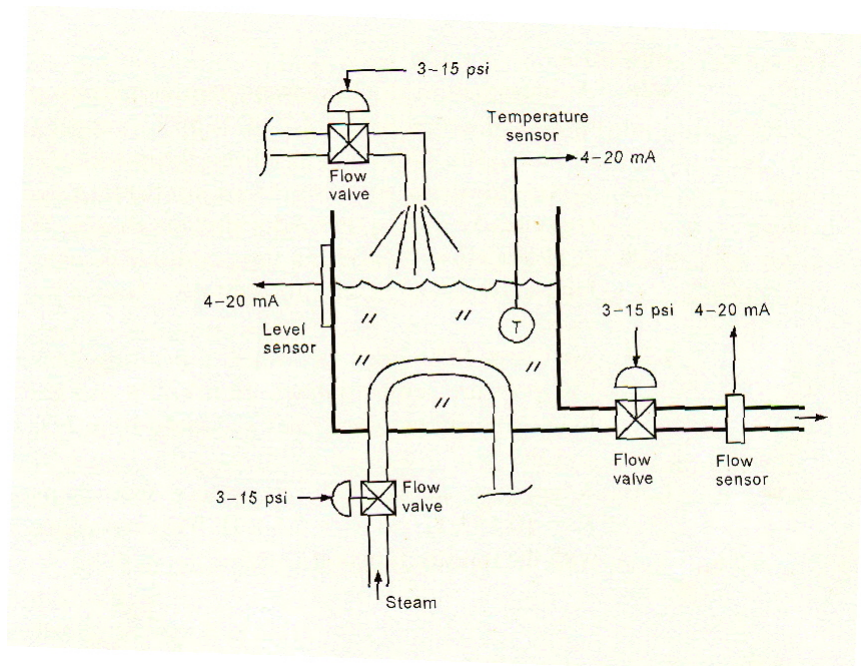
Šeme sistema automatskog upravljanja

The Instrument Society of America je pripremila standard, "Instrumentation Symbols and Identification", ANSI/ISA-S5.1-1984, kako bi "ustanovili uniforman način predstavljanja instrumenata i sistema koji se koriste za mjerenje i upravljanje".

Ovaj standard predstavlja sistem simbola i identifikacionih kodova koji su "pogodni za korišćenje kada god je potrebna referenca za neki instrument".

Ovakav sistem obuhvata dijagrame toka, šeme instrumentacije, specifikacije, šeme konstrukcija, tehničke papire, obilježavanje instrumenata, ...

Uobičajen naziv za ove crteže je "P&I dijagrami", Pipes and Instrumentation.



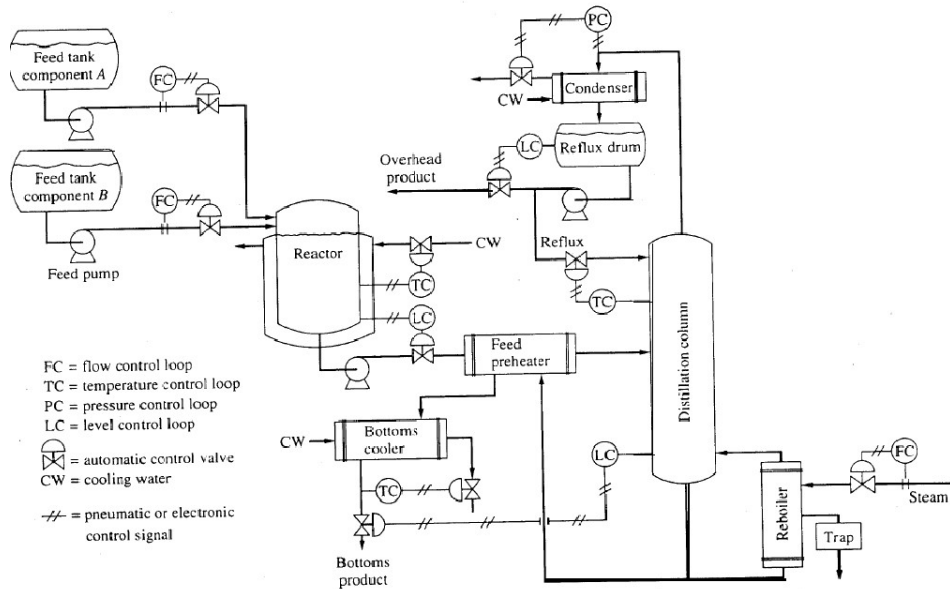
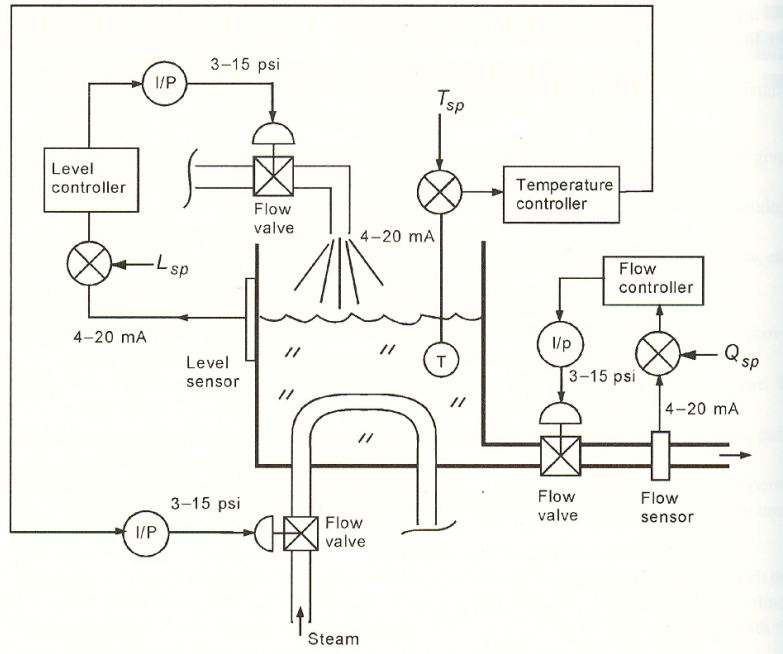
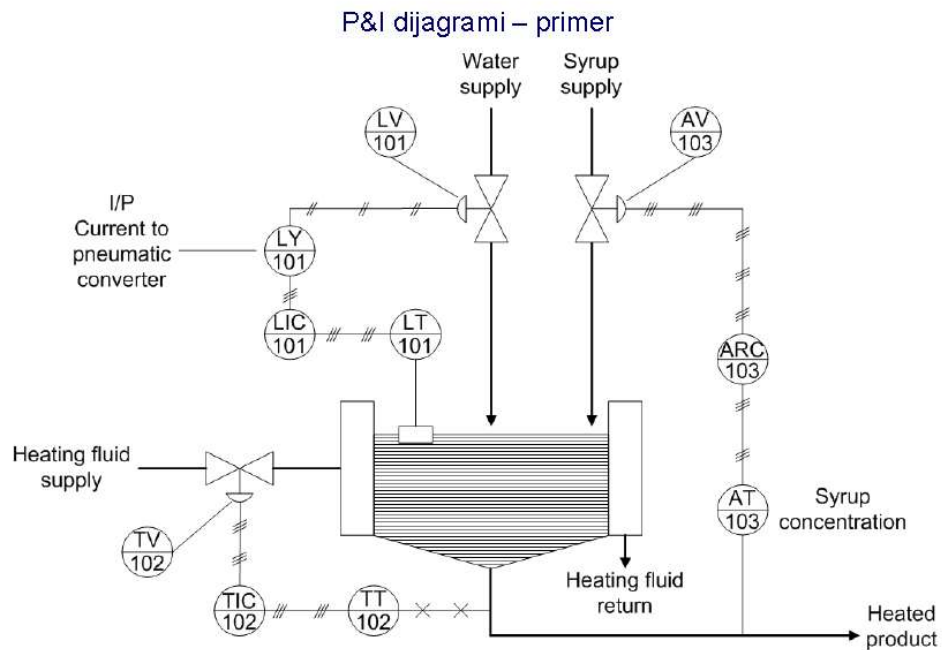


FIGURE 1.5
Typical chemical plant and control system.




P&I dijagrami

- Kružni simbol naziva se “balon” (kružić) predstavlja generalni simbol za instrumente
- Instrument je identifikovan kodom smeštenim u kružić.
- Identifikacioni kod se sastoji od :
 - Identifikacije funkcije – slova u gornjem delu kružića
 - Identifikacija petlje – brojevi u donjoj polovini kružića
- Prvo slovo u funkcionalnoj identifikaciji definiše merenu ili inicijalnu promenljivu kontrolne petlje (npr F-flow, L-level, P-pressure, T-temperature...).
- Do tri dodatna slova mogu se koristiti za imenovanje funkcije individualnog instrumenta (npr indikator, arhiver , kontroler, ventil...)
- Standard, isto tako, definiše simbole za strukturu linija, tela ventila, aktuatora, primarne elemente,...



P&I dijagrami

Struktura linija

	3-15psi pneumatska linija
	4-20mA električna struja
	--filled system capillary

Prvo Slovo - ID

A – analiza

L – nivo(level)

T – temperatura (temperature)

Prateća slova

C – kontroler (controller)

I – indikator (indicator)

R – rekorder (recorder)

T – senzor (transmitter)

V – ventil (valve)

Y – relej (relay)

• Opis elemenata na prethodnom primjeru

LT-101	Level Transmitter –Određuje nivo tečnosti u rezervoaru i pretvara signal u elektrišnu struju u opsegu 4 – 20mA
LIC-101	Level Indicating Controller – uzima mA signal iz LT-101 kako bi dobio kontrolni signal u opsegu 4 – 20mA
LY-101	Level current to pneumatic convertor – konvertuje mA izlaz iz LIC-101 u pneumatski signal u opsegu 3 – 15psi
LV-101	Level control Valve – koristi pneumatski signal iz (LY-101) konvertera u poziciju stema ventila.
TT-102	Temperature Transmitter – određuje temperaturu i pretvara je u električnu struju u opsegu od 4 – 20mA
TIC-102	Temperature Indicating Controller – koristi signal iz TT-102 kako bi proiveo kontrolni signal u opsegu 4 – 20mA
TV-102	Temperature control Valve – koristi strujni signal iz TIC-102 kako bi pozicionirao iglu ventila
AT-103	Analysis Transmitter –određuje koncentraciju sirupa u proizvoda i pretvara signal u električnu struju u opsegu 4 – 20mA
ARC-103	Analysis Recording Controller – koristi strujni signal iz AT-103 kako bi proizveo kontrolni signal u opsegu 4 – 20mA
AV-103	Koristi strujni signal iz ARC-103 kako bi odredio poziciju igle ventila

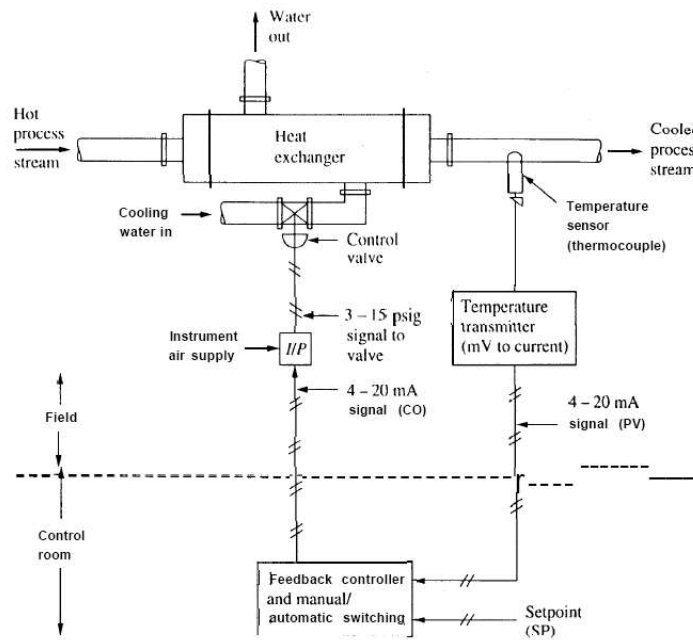
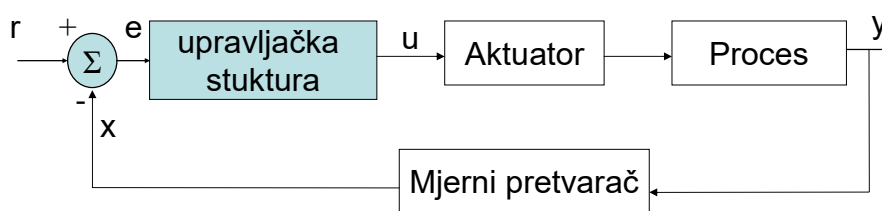


FIGURE 3.1
Feedback control loop.

Klasifikacija algoritama upravljanja



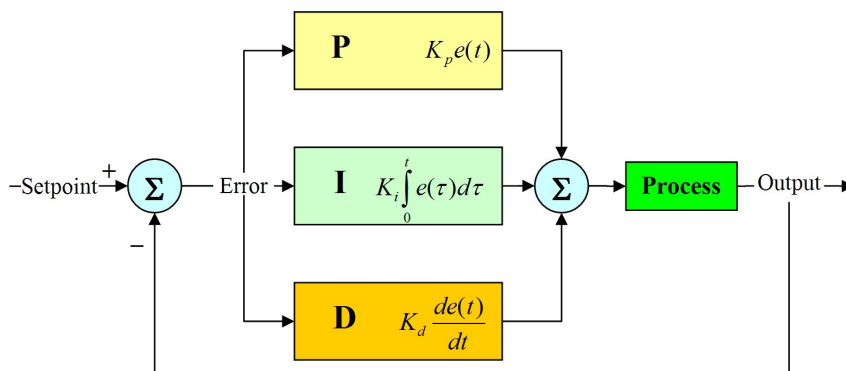
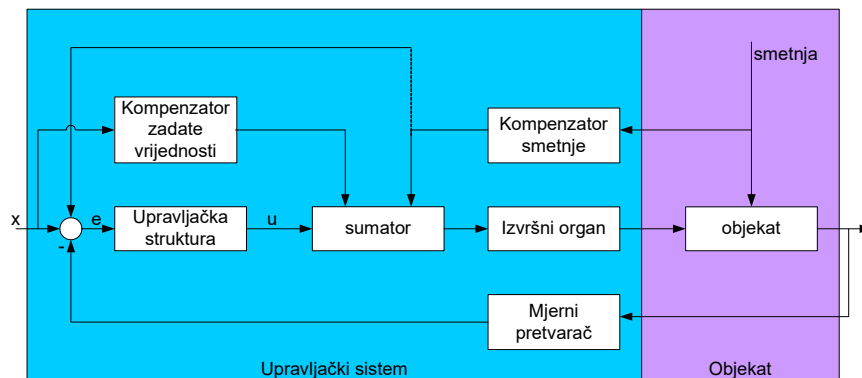
Postoje razni kriterijumi za klasifikaciju algoritama upravljanja.

Ovdje ćemo posmatrati klasifikaciju u odnosu na prirodu obrade raznih signala sa ciljem da se dobije upravljački signal.

Svi algoritmi se u tom slučaju mogu svrstati u dvije grupe: **analogni** i **digitalni** algoritmi upravljanja, unutar kojih se mogu vršiti dalje podjele.

Analogni algoritmi upravljanja

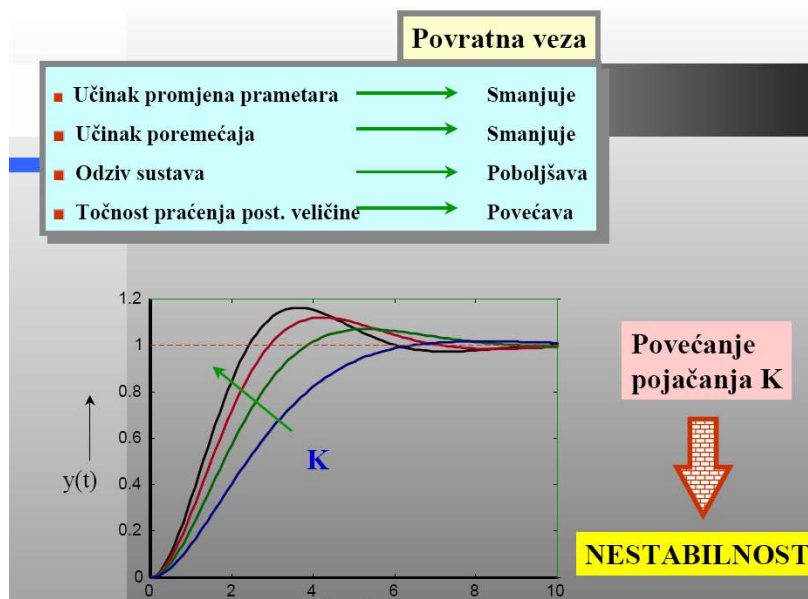
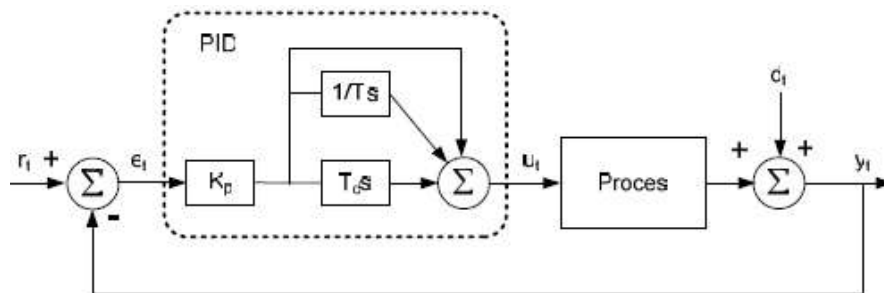
Istorijski gledano, analogni algoritmi su se prvi pojavili u tehničkoj praksi realizacije SAU, prvo kroz pneumatske, a potom kroz elektronske sisteme. Analogni algoritmi se mogu podijeliti na dvije osnovne grupe: **linearne i nelinearne** što zavisi od zakona preslikavanja $f(e)$



Linearni zakoni upravljanja predstavljaju jednu od najstarijih i najrasprostranjenih upravljačkih strategija. Razlog tome treba tražiti u činjenici što se primjenom ove strategije može uspješno riješiti čak oko 90% svih upravljačkih zadataka. Konačno, nije bez značaja i činjenica da su tehnike podešavanja parametara ovih zakona upravljanja detaljno razrađene i veoma jednostavne za praktičnu primjenu.

Linearnim zakonima upravljanja ostvaruju su tri dejstva: *proporcionalno* (P), *integralno* (I) i *diferencijalno* (D), pa se otuda uređaj kojim se ovo upravljanje realizuje naziva *proporcionalno-integro-diferencijalni regulator* i kraće *PID* (Slika). Zakoni upravljanja mogu se predstaviti kao

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$



Linearni zakoni upravljanja

1. Proporcionalni zakon upravljanja $u = K_p e$

Uređaj koji ostvaruje takvo upravljanje naziva se proporcionalni regulator ili P- regulator. Nekada se pojačanje P- regulatora izražava u vidu

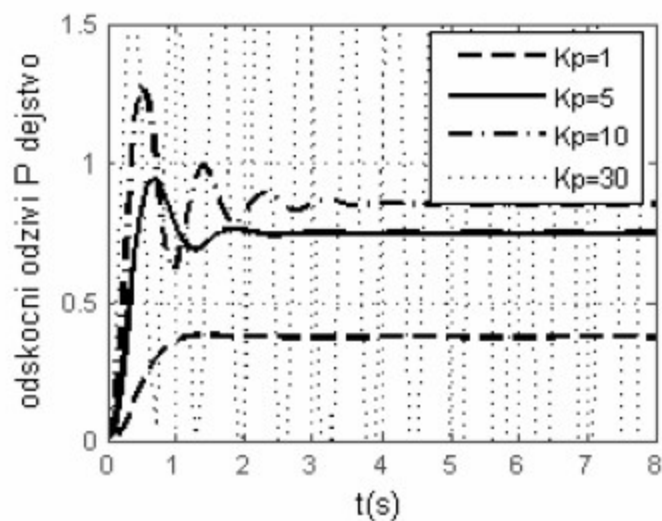
$$P_p = \frac{1}{K_p} \cdot 100\%$$

i naziva se proporcionalno područje.

Funkcija prenosa P- regulatora je $G_R(s) = K_p$

$$P_p = (1000\% - 2\%) \quad - \quad K_p = (0,1 - 50),$$

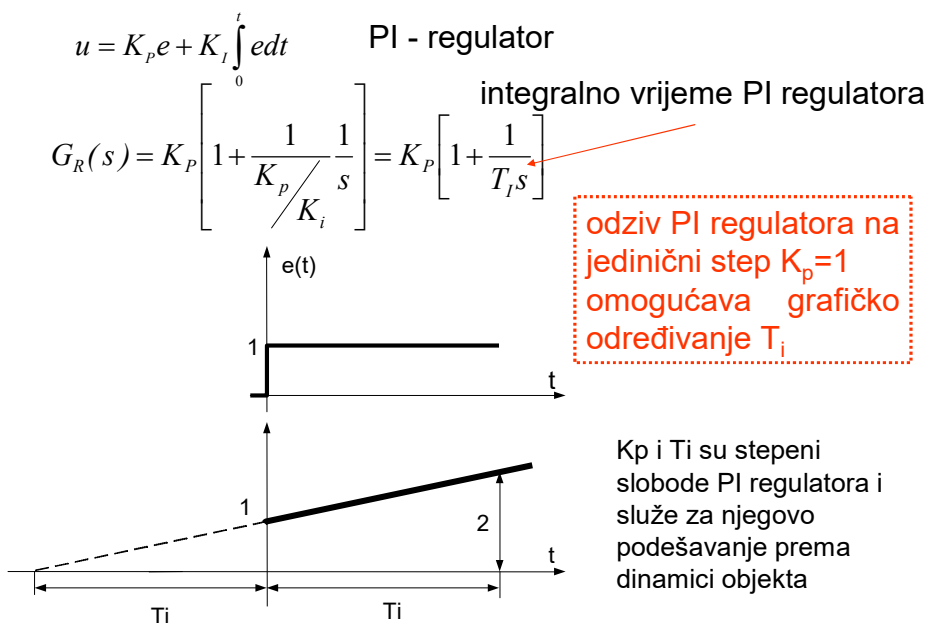
Proporcionalno dejstvo određuje veličinu statičke greške sistema. Njegovim povećanjem greška se smanjuje. Međutim, u zavisnosti od tipa sistema kojim se upravlja, povećanje pojačanja K_p može dovesti i do nestabilnosti sistema.



U svakom slučaju, budući da postojanje statičke greške zavisi od reda astatizma funkcije povratnog prenosa, izvjesno je da proporcionalno dejstvo, budući da ne mijenja astatizam, ne može promijeniti tip statičke greške, već samo njenu veličinu. Pored ostalog, potrebno je zapaziti da kod proporcionalnog upravljanja nulta statička greška implicira i nulto upravljanje, a to nužno znači i prestanak bilo kakvih aktivnosti u procesu.

Kod nekih sistema moguće je da se željena performansa ostvari isključivo pomoću ovog dejstva tako da se upravljanje realizuje isključivo pomoću P-regulatora

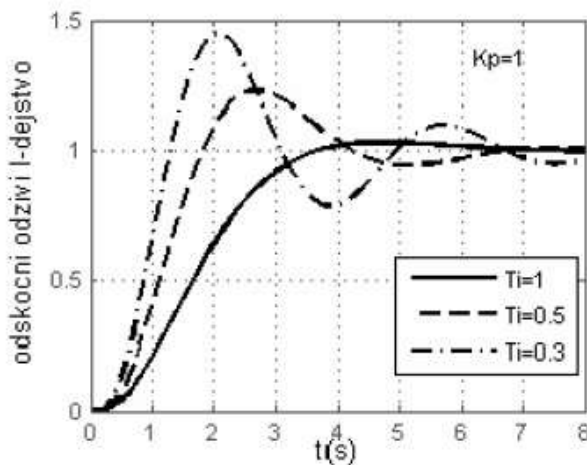
2. Proporcionalno integralni zakon upravljanja



Integralno dejstvo ima osobinu da se pri nultom ulazu u integrator na izlazu dobija konstantan signal. Otuda, integralno dejstvo u izvesnom smislu koriguje nedostatak proporcionalnog dejstva. Naime, sve dok postoji signal greške, ma koliko mali on bio, izlaz integratora će se mijenjati, a sa njim i signal upravljanja. Promjena pobude sistema rezultovaće u promjeni signala odziva koji će se, uz uslov da je sistem adekvatno projektovan, približavati zadatom referentnom signalu. Potrebno je da se istakne da je ova osobina integratora izuzetno korisna i kod sistema čiji izvršni organi imaju odgovarajuću mrtvu zonu unutar koje prestaju da reaguju na pobudu. Greška akumulirana kroz integrator će, zapravo, održavati nivo pobude izvršnog organa izvan mrtve zone, sve dok se odziv sistema ne izjednači sa referencom.

Primjena integralnog dejstva u prvom trenutku dovodi do usporavanja odziva u odnosu na proporcionalno dejstvo. Uzrok takvog ponašanja je činjenica da pri nagloj promjeni signala greške izlaz integratora raste znatno sporije od izlaza pojačivača kod proporcionalnog upravljanja. Međutim, poslije izvesnog vremena, izlaz integratora, koji zapravo akumulira, odnosno sabira, sve prethodne vrijednosti greške, se značajno povećava, što dovodi do oscilatornog ponašanja odziva.

Da bi se izbjeglo usporavanje odziva pri promjeni signala greške, integralno dejstvo se nikada samo ne koristi, već isključivo u kombinaciji sa proporcionalnim dejstvom, kao PI-regulator. Podešavanjem P i I dejstva može se postići izvesno poboljšanje odziva sistema pri čemu se pravi kompromis između brzine odziva i veličine preskoka. Pri željenoj brzini odziva, preskok se može smanjiti samo uvođenjem diferencijalnog dejstva



2. Proporcionalno-integralno-diferencijalni zakon upravljanja

$$u = K_P e + K_I \int_0^t e dt + K_D \frac{de}{dt}$$

PID - regulator

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

K_P - pojačanje

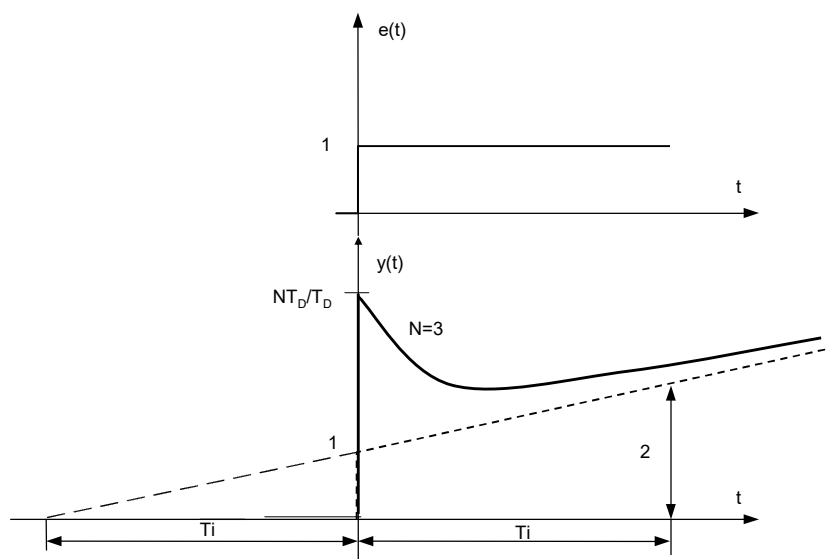
$T_I = K_P / K_I$ - integralno vrijeme

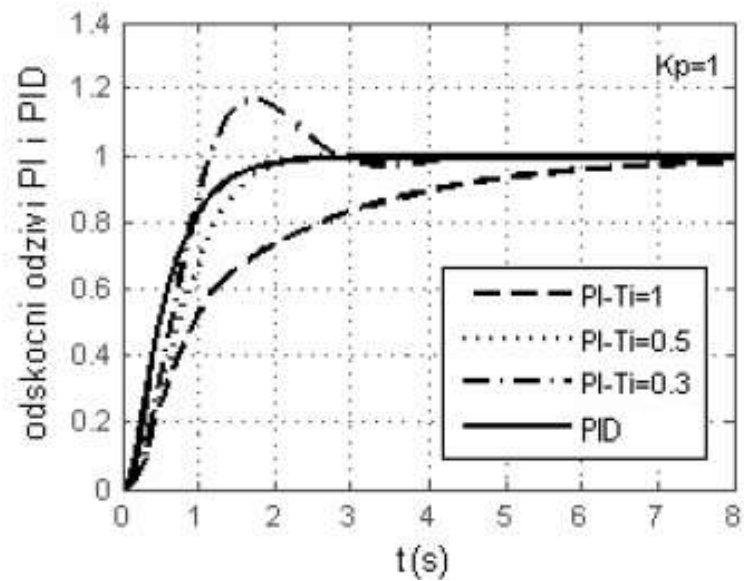
$T_D = K_D / K_P$ - dif. vrijeme

PID regulator sjedinjuje sva dobra svojstva osnovnih regulatora:

- D-djelovanje obezbjeđuje brzo reagovanje
- P-djelovanje obezbjeđuje konstantno dovoljno jako pojačanje i
- I-djelovanje osigurava tačnost i potpuno otklanjanja regulacionog odstupanja

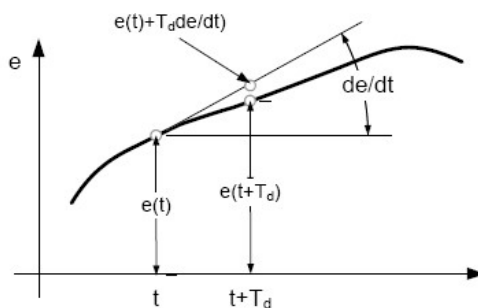
odziv PID regulatora na jedinični step $K_P=1$





Diferencijalno dejstvo vodi računa o brzini promjene signala greške. Naime, ako se ne želi preskok u odzivu neophodno je da se sistem "koči", odnosno da se usporava promjena odziva, onda kada signal greške opada i to utoliko jače ukoliko je opadanje greške brže. Očigledno je da izvod greške upravo daje potrebnu informaciju o brzini i smjeru promjene signala greške.

Budući da svaki proces ima određenu dinamiku potrebno je da prođe neko vrijeme prije nego što se efekti promjene signala upravljanja primijete u signalu izlaza, a time i u signalu greške. U tom smislu diferencijalno dejstvo se može interpretirati i kao svojevrsni prediktor signala greške



funkcija prenosa realnog PID regulatora:

$$G_R(s) = K_p \left[1 + \frac{1}{T_I s} + \frac{T_D s}{1 + T_D s / N} \right]$$

U praksi, diferencijalno dejstvo pokazuje značajne nedostatke koji potiču od mjernog šuma u signalu izlaza. Budući da je ovaj signal, po pravilu, u domenu visokih učestanosti diferencijalno dejstvo koje ima teorijski neograničen propusni opseg značajno povećava amplitudu ovog signala. U skladu sa time PID počinje da obrađuje signal poremećaja i time značajno degradira performasu sistema. Ovaj efekat je moguće izbjeći tako što bi počev od neke učestanosti prestalo diferenciranje signala. To nadalje znači da se diferencijalno dejstvo modifikuje ubacivanjem jednog realnog pola koji se nalazi izvan opsega učestanosti u kome se želi ostvariti efekat diferencijalnog dejstva. Tako modifikovani D regulator ima funkciju prenosa

diferencijalni član sa jednim polom $s = -N/T_D$

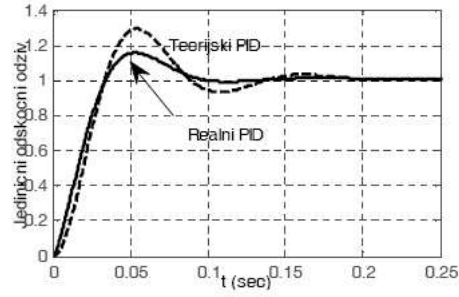
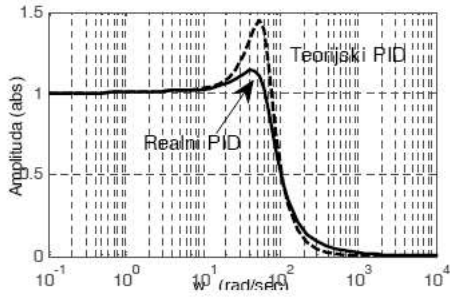
$$G_D(s) = K_p \left[\frac{T_D s}{1 + T_D s / N} \right] \quad N=3-10$$

PRIMJER

Radi ilustracije ponašanja teorijskog i realnog PIDa posmatra se proces opisan sledećom funkcijom prenosa

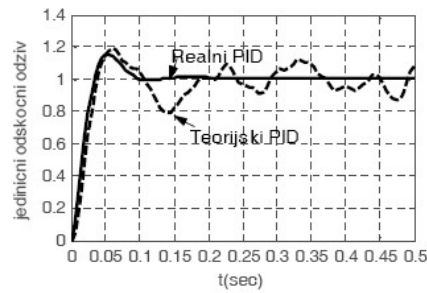
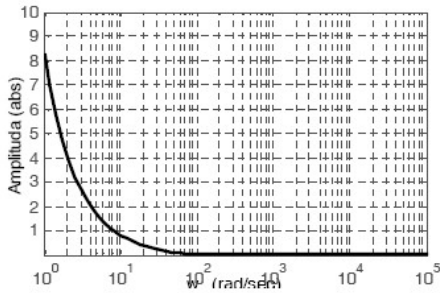
$$G_p(s) = \frac{400}{s(s + 48.5)}$$

U cilju upravljanja ovim procesom projektovan je PID čiji parametri imaju sledeće vrijednosti: $K_p=10$, $T_i=1$, $T_d=0.005$ i $N=10$. Frekvencijske karakteristike teorijskog i realnog PIDa razlikuju se samo u domenu visokih učestanosti. Ova razlika implicira i razliku u frekvencijskim karakteristikama sistema sa zatvorenom povratnom spregom. Sistem sa teorijskim PIDom ima nešto strmiju karakteristiku i manju učestanost propusnog opsega. Otuda je i njegov odskočni odziv malo sporiji od odziva sistema sa realnim PIDom. U svakom slučaju, sve dok izlaz sistema nije zašumljen oba regulatora imaju zadovoljavajuće performanse.



AMPLITUDSKE KARAKTERISTIKE I ODSKOČNI ODZIVI SISTEMA U ZATVORENOJ SPREZI

Predpostavimo da se na izlazu procesa superponira sinusoidalni mjerni šum učestanosti od 10^4 rad/sec i amplitude 0.2. U principu, budući da je proces nisko propusni i da ima izuzetno malu vrijednost amplitudne karakteristike pri ovoj učestanosti (slabljenje je 150dB) šum ne bi trebalo da utiče na performansu sistema sa zatvorenim povratnom spregom. Međutim, pošto diferencijalno dejstvo teorijskog PIDa uvećava amplitudu šuma 10^4 puta on ipak ulazi u proces kao signal sa izraženom amplitudom i značajno degradira odskočni odziv procesa. Sa druge strane realni PID na učestanosti na kojoj deluje šum nema više diferencijalno dejstvo. Ograničena amplituda realnog PIDa na toj učestanosti sprečava uvećanje amplitude šuma pa on prirodno biva odsječen od strane procesa.



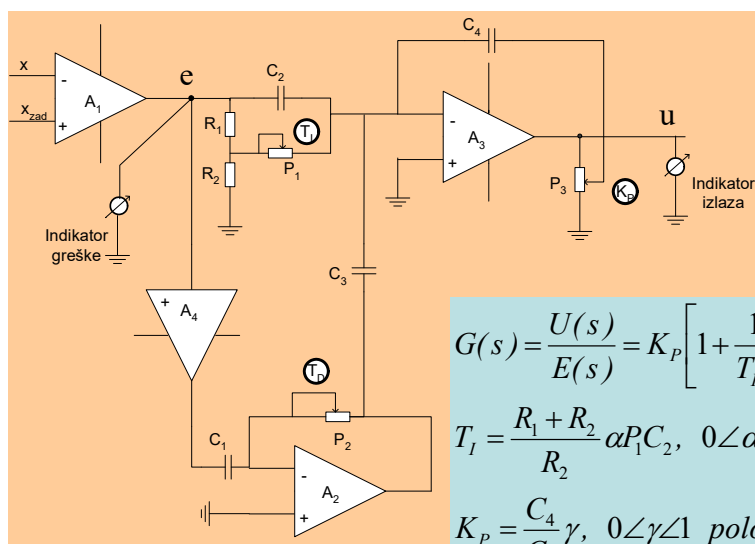
Opsezi parametara koji se susreću u tehničkoj praksi kod najpoznatijih proizvođača kreću se za:

$$P_p=(1000\% -2\%) - K_p=(0,1 -50),$$

$$T_I=(3 -3000)s$$

$$T_D=(0-1200)s$$

Ograničenja ovih parametara proističu prije svega iz kvaliteta operacionih pojačavača (veličine ulazne impedanse, veličine drifta, pojačanja, itd.) i kvaliteta pasivnih komponenti i njihovih gabarita.



$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left[1 + \frac{1}{T_I s} + \frac{T_D s}{1 + T_0 s} \right]$$

$$T_I = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \alpha P_1 C_2, \quad 0 < \alpha < 1 \text{ položaj } P_1$$

$$K_p = \frac{C_4}{C_2} \gamma, \quad 0 < \gamma < 1 \text{ položaj } P_3$$

$$T_D = \frac{C_1 C_4}{C_3} \beta P_2, \quad 0 < \beta < 1 \text{ položaj } P_2$$

$$T_0 = R_{10} C_1, \quad R_{10} - \text{otpor zbog neid. } C_1$$

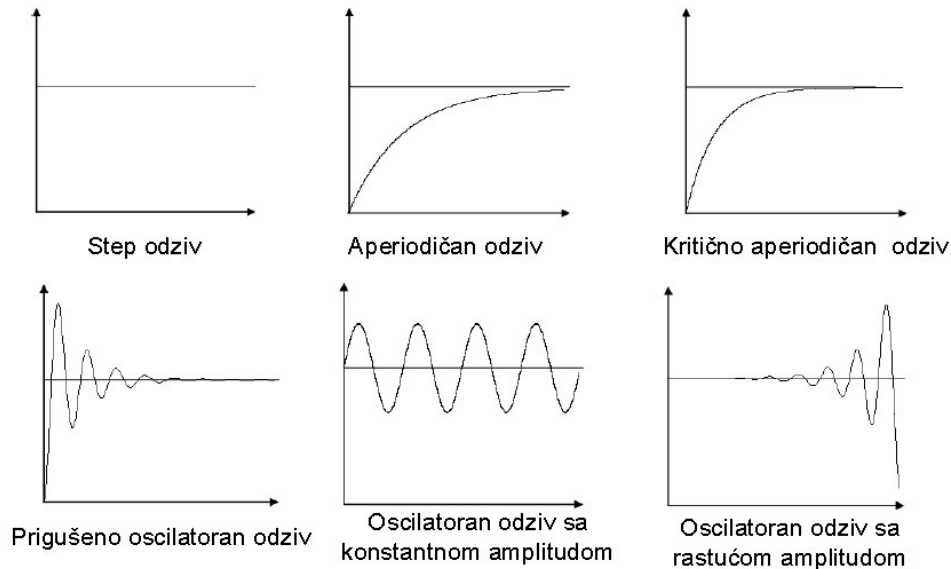
REZIME

- *Režimi upravljanja konvertuju* grešku u upravljanje ili *izlaz kontrolera* koje teži da smanji grešku.
- Tri najčešća dejstva(modi) su:
 - *Proporcionalno dejstvo (P)* –upravljanje je proporcionalno grešci
 - *Integralno dejstvo (I)* –upravljanje pojačava korektivne akcije dokle god postoji greška
 - *Diferencijalno dejstvo (D)*–upravljanje je proporcionalno brzini promjene greške

Prigušenje i nestabilnost

- Pojačanje kontrolera određuje veoma važnu karakteristiku odziva sistema : prigušenje ili nestabilnost koju sistem prikazuje kao odgovor na poremećaj.
- Kako pojačanje kontrolera raste, odziv se mijenja u sledećem redosledu: aperiodičan , kritično aperiodičan, prigušeno oscilatoran, oscilatoran sa konstantnom amplitudom, i oscilatoran sa rastućom amplitudom.
- Očividno, ni oscilatoran odziv , ni aperiodičan odziv ne zadovoljavaju cilj minimizacije greške.
- Tipično , optimalni odziv je ili kritično aperiodičan ili blago prigušeno oscilatoran

Prigušenje i nestabilnost

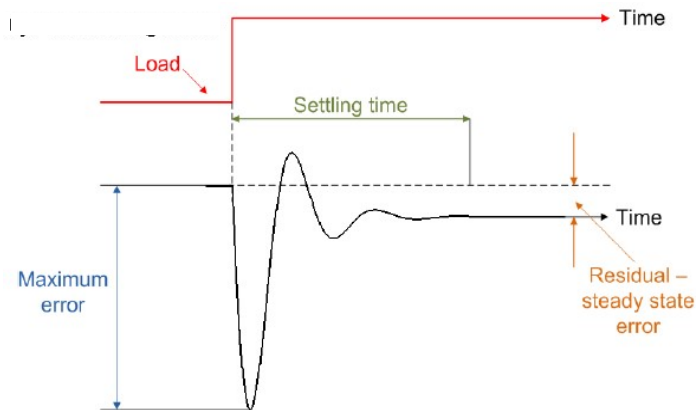


Cilj SAU-a

- Cilj SAU-a djeluje prilično jednostavan –održavati vrijednost kontrolisane promenljive tako da bude jednaka željenoj vrednosti(Setpoint), bez obzira na promjene opterećenja ili Setpoint-a.
- Da bi ovo uradio, sistem mora da odgovori na promjenu prije nego što se desi greška; nažalost, povratna sprega nikad nije perfektna zato što ne djeluje sve dok se greška ne desi.
- Sledeći koraci opisuju djelovanje sistema:
 - Promjena opterećenja mora da mijenja kontrolisanu promenljivu; ovo proizvodi grešku
 - Kontroler reaguje na grešku tako što mijenja manipulisanu promenljivu
 - Promjena manipulisane promenljive vraća kontrolisanu promenljivu bliže radnoj tački.

Cilj upravljanja :

- Pošto se opterećenje ili setpoint promijeni, SAU bi trebalo da:
 1. Minimizuje maksimalnu vrijednost greške
 2. Minimizuje vrijeme smirenja
 3. Minimizuje rezidual greške



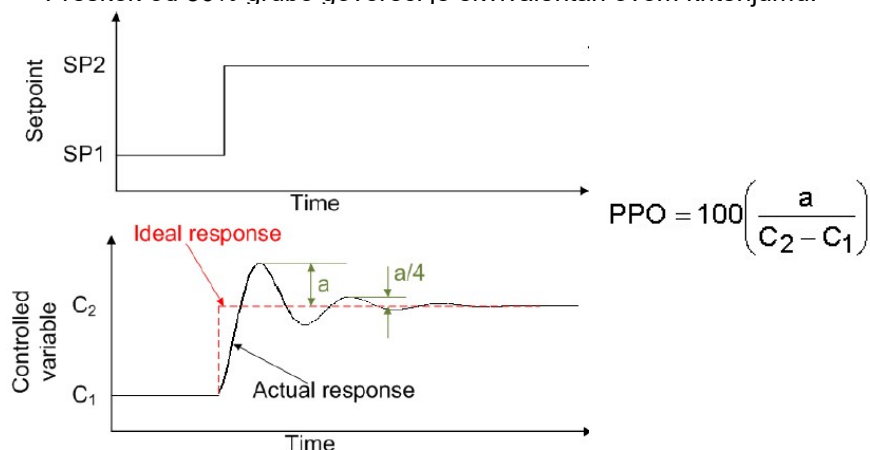
Kriterijum dobrog upravljanja

Da bismo efikasno testirali SAU sledeći uslovi:

1. Test mora biti specificiran
 2. Mora biti odabran kriterijum dobrog upravljanja
- Tri najčešća kriterijuma su:
 1. Opadanje greške za četvrtinu amplitude
 2. Minimum integrala apsolutne greške
 3. Kritično prigušenje

Opadanje greške za četvrtinu amplitude

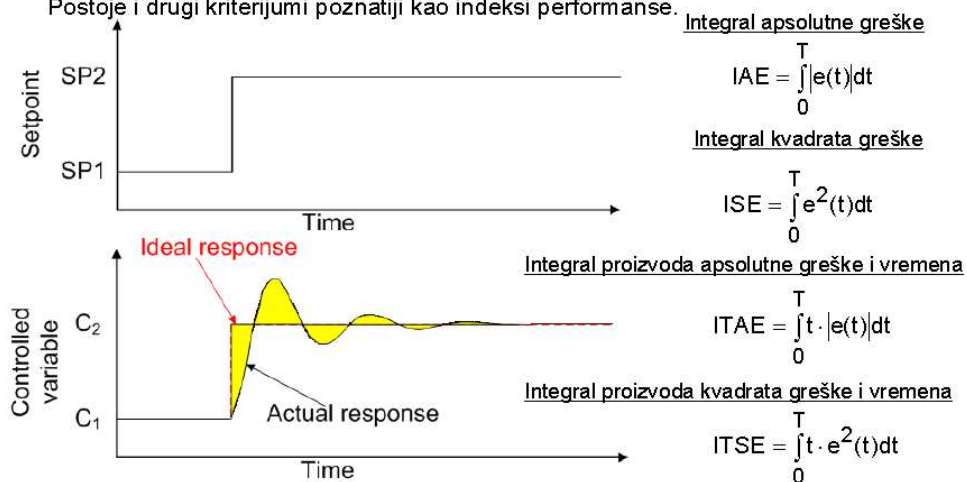
- Kriterijum podrazumijeva oscilatoran odziv u kome je naredna pozitivna amplituda kontrolisane promenljive manja za jednu četvrtinu od prethodne.
- Varijacija kriterijuma procenat preskoka (PPO). Preskok od 50% grubo govoreći je ekvivalentan ovom kriterijumu.



Minimum integrala apsolutne greške

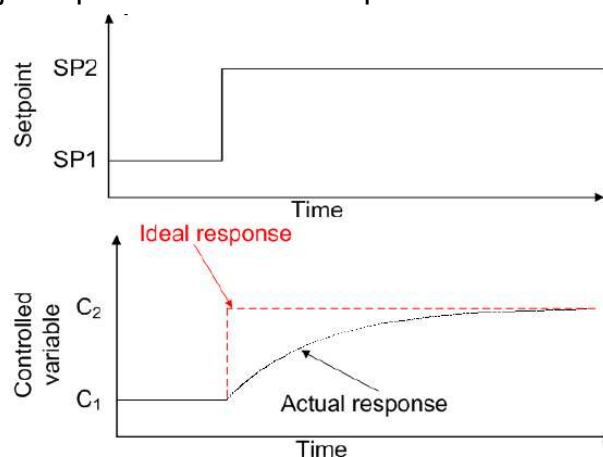
- Kriterijum podrazumijeva da površina ispod krive koja predstavlja grešku bude minimalan.

Postoje i drugi kriterijumi poznatiji kao indeksi performanse.



Kritično prigušenje

- Kriterijum se koristi kada je preskok iznad radne tačke nepoželjan. Kritično prigušenje je najmanje prigušenje koje će proizvesti odziv bez preskoka i oscilacija.



Podešavanje parametara kontinualnog PIDa

Izvesno je da performansa procesa upravljaniog PID-om zavisi od izbora parametara sva tri dejstva. I pored toga što se, bar u principu, poznaje efekat svakog od odgovarajućih dejstava, imajući u vidu da su efekti međusobno zavisni, jasno je da se vrijednosti parametara ne mogu odrediti bez nekih dodatnih informacija o samom procesu. U rješavanju ovog problema moguća su dva pristupa.

Ukoliko je poznat matematički model procesa onda se parametri PIDa određuju primjenom neke od metoda za projektovanje kompenzatora u frekvencijskom ili kompleksnom domenu, a u zavisnosti od zadatih karakteristika performanse. Pri tome se može projektovati kontinualni PID, koji će se kasnije diskretizovati ili se može direktno pristupiti sintezi diskretnog PIDa.

Mnogo češći, je međutim slučaj kada se model procesa ne poznaje, ali se pretpostavlja da se na njemu mogu vršiti eksperimenti u otvorenoj ili u zatvorenoj sprezi. Polazeći od ove pretpostavke razvijen je čitav niz metoda za eksperimentalno podešavanje parametara PIDa.

Interesantno je napomenuti da su prvu eksperimentalnu metodu predložili Ziegler i Nichols još davne 1942. godine. Od tada, tokom čitavih pedeset godina ona se na različite načine poboljšava i dopunjava, ali ni danas ne prestaje da zaokuplja pažnju istraživača.

Naime, praksa je pokazala da vrijednosti parametara koje se određuju primjenom neke od eksperimentalnih metoda predstavljaju zapravo dobre početne vrijednosti za dalje eksperimente na samom procesu. Drugim riječima, pokazuje se da se na procesu dodatnim "finim" dotjerivanjem parametara, po pravilu, može u izvjesnoj mjeri popraviti performansa. Međutim, ukoliko se podešavanje performanse pokuša bez postavljanja početnih vrednosti određenih korišćenjem eksperimentalnih metoda, onda je gotovo nemoguće doći do odgovarajućeg rezultata.

Sve eksperimentalne metode razvijene su za kontinualne regulatore, s tim što se za diskretne sisteme uvode odgovarajuće korekcije eksperimentalno određenih vrijednosti parametara. Ovo je prirodna posledica činjenice da su procesi kontinualni, te da se eksperimenti izvode u tom okruženju.

Osnovna podjela eksperimentalnih metoda zasniva se na tome da li su one zasnovane na **snimanju odskočnog odziva samog procesa ili na određivanju učestanosti i pojačanja pri kome se sistem sa jedničnom povratnom spregom nalazi na oscilatornoj granici stabilnosti.**

1. Snimanje odskočnog odziva

Ovo je originalna Zigler-Nicholsova ideja koja se zasniva na pretpostavci da će svi procesi kojima se upravlja imati jedan od dva oblika karakteristike odskočnog odziva, a u zavisnosti od toga da li imaju ili nemaju astatizam. Pretpostavlja se, naime da se radi o procesima čije se funkcije prenosa mogu aproksimirati kao

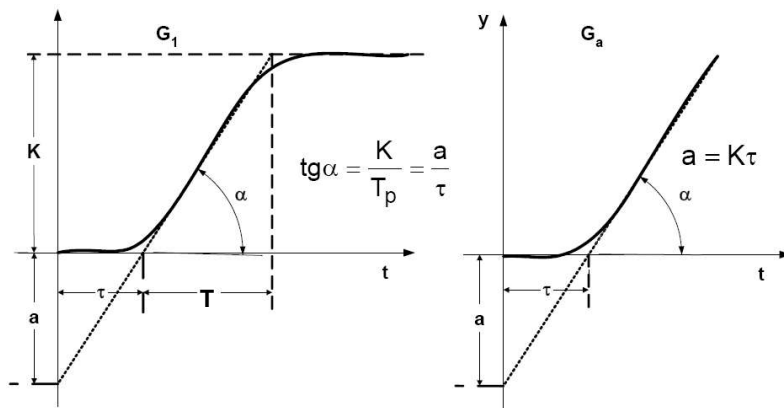
$$G_{p1}(s) = \frac{K}{1 + T_p s} e^{-\tau s} \quad \text{ili} \quad G_{pa}(s) = \frac{K}{s} e^{-\tau s}$$

pa se parametri PIDa određuju prema tablici

	K_p	T_i	T_d
P	$1/a$		
PI	$0.9/a$	3τ	
PID	$1.2/a$	2τ	$\tau/2$

$$a = K \frac{\tau}{T_p} \quad \text{za } G_{p1} \quad ; \quad a = K\tau \quad \text{za } G_{pa}$$

Ove dvije funkcije prenosa imaju jasno definisane oblike odskočnog odziva (Slika), koji zavisi od parametara sistema. Kada se izvrši eksperiment i snimi odziv procesa u otvorenoj sprezi, povlači se tangenta u tački najstijemijeg dijela krive i direktno se očitavaju vrijednosti parametara funkcije prenosa.

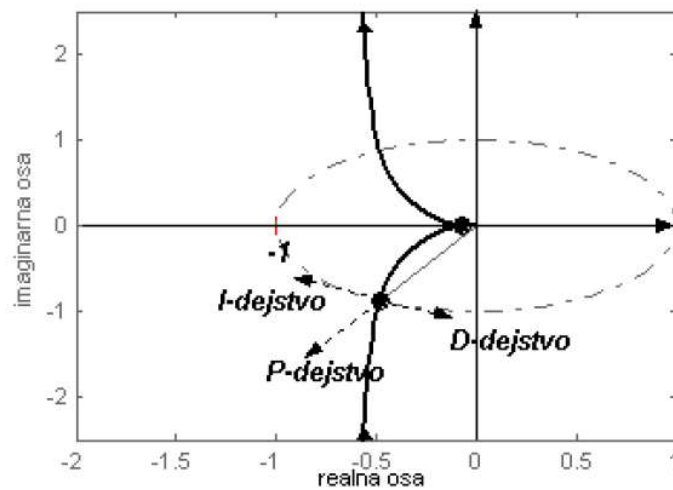


Odskočni odziv procesa bez astatizma i sa astatizmom

2. Procjena amplitudne i fazne karakteristike na granici stabilnosti

Čitava grupa metoda zasniva se na ideji da se pri nekoj vrijednosti pojačanja sistem sa zatvorenom povratnom spregom nalazi na granici stabilnosti. Ako se pretpostavi da Nikvistova kriva povratnog prenosa sistema siječe negativni dio realne ose pri učestanosti $\omega\pi$ i da je pretek pojačanja sistema jednak K_{gr} onda se određivanjem te dvije vrednosti mogu odrediti parametri PIDa prema sledećoj tabeli

	K_p	T_i	T_d
P	$0.5 K_{gr}$		
PI	$0.4 K_{gr}$	$0.8 T_\pi$	
PID	$0.6 K_{gr}$	$0.5 T_\pi$	$0.125 T_\pi$

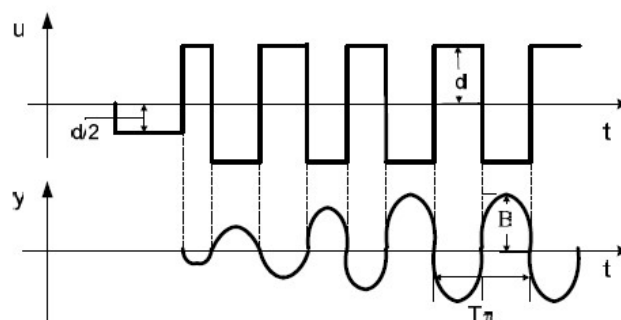
$$T_\pi = \frac{2\pi}{\omega_\pi}$$


Efekat P, I i D dejstva na Nikvistovu krivu

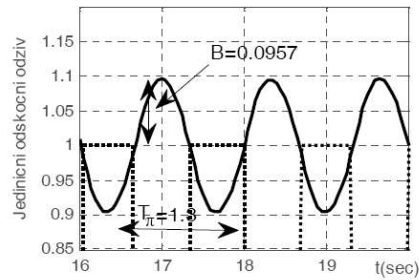
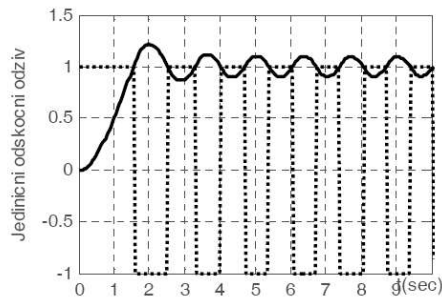
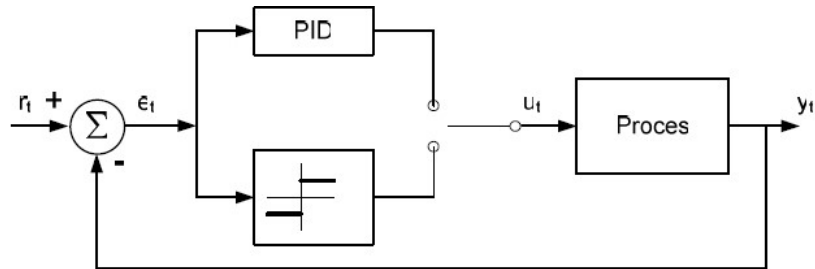
Posmatra se Nikvistova kriva povratnog prenosa sistema sa zatvorenom spregom. Promjena parametara PIDa dovešće, naravno, i do promjene Nikvistove krive. Pri tome će u nekoj tački krive povećanje proporcionalnog dejstva (K_p) povećavati radijus, povećanje integralnog dejstva će tačku pomjerati u smeru kretanja kazaljke na časovniku (smanjenje faze), dok će povećanje diferencijalnog dejstva pomerati tačku u smeru suprotnom kretanju kazaljke na časovniku (povećanje faze) (Slika prethodni slajd). Teorijski gledano, promjenom sva tri parametra može se dostići bilo koji zadani položaj jedne tačke na Nikvistovoj krivoj.

Eksperiment u otvorenoj sprezi

Da bi se sistem doveo do oscilacija koje odgovaraju graničnoj stabilnosti na njega se dovodi povorka pravougaonih impulsa, pri čemu se prva promjena amplitude impulsa generiše kada na izlazu procesa se pojavi signal, a zatim se amplitude impulsa mijenjaju kada odziv prolazi kroz nulu. Amplitude impulsa kreću se od 5% do 15% od nominalne vrednosti ulaznog signala. Ovako pobuđivan sistem će posle izvesnog vremena ući u stacionarno stanje u kome signal i na izlazu ima konstantnu amplitudu (B) i u protiv fazi je sa signalom na ulazu, koji takođe postaje povorka periodičnih pravougaonih impulsa



Eksperiment u zatvorenoj sprezi



$$u_1(t) = \frac{4}{\pi} d \cos\left(\frac{2\pi}{T_\pi} t\right)$$

$$\left|G_{pa}(j\omega_\pi)\right| = \frac{B}{\frac{4}{\pi} d} = \frac{K}{\omega_\pi} = \frac{1}{K_{gr}} \Rightarrow K_{gr} = \frac{4}{\pi} \frac{d}{B}$$

Vrijednosti T_π , d i B se očitavaju sa dijagrama, na osnovu njih se izračunava K_{gr} , a zatim se vrijednosti parametara PIDa određuju iz tablice.

$$30^\circ \leq \gamma \leq 60^\circ, \quad (\text{za slijednu regulaciju})$$

$$20^\circ \leq \gamma \leq 50^\circ, \quad (\text{za stabilizaciju})$$

$$12dB \leq A_r \leq 20dB, \quad (\text{za slijednu regulaciju})$$

$$3,5dB \leq A_r \leq 9,5dB. \quad (\text{za stabilizaciju})$$

KALMAN-OV REGULATOR ZA UPRAVLJANJE MULTIVARIJABILNOG SISTEMA

Razmatra se multivarijabilni proces opisan jednačinom

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

gdje je: $x(t)$ - n - dimenzionalni vektor stanja procesa,
 A - $n \times n$ - dimenzionalna matrica procesa,
 u - m - dimenzionalni vektor upravljanja,
 B - $n \times m$ - dimenzionalna matrica upravljanja.

Potrebno je odrediti pojačanje K vektora upravljanja

$$u(t) = -Kx(t)$$

tako da se minimizira indeks performanse

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt$$

Izraz $u^T R u$ u prethodnoj relaciji predstavlja mjeru utroška energije upravljačkog dejstva, a izraz $x^T Q x$ predstavlja mjeru energije koordinata stanja. Matrice Q i R određuju relativnu važnost greške i utroška energije. U ovom problemu, smatra se da je vektor $u(t)$ neograničen, što nikada u praksi nije slučaj.

$$\dot{x} = Ax - BKx = (A - BK)x$$

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + x^T K^T R K x) dt = \int_0^{\infty} x^T (Q + K^T R K) x dt$$

Polazeći od toga da se funkcija Ljapunova može upotrijebiti za rješavanje ovog problema, neka bude pretpostavljeno da je:

$$x^T (Q + K^T R K) x = -\frac{d}{dt} (x^T P x)$$

$$x^T (Q + K^T R K) x = -\dot{x}^T P x - x^T P \dot{x} = x^T \left((A - BK)^T P + P (A - BK) \right) x$$

Upoređujući obe strane ove jednačine te da ona vrijedi za svako x , neophodno je da važi

$$\left((A - BK)^T P + P (A - BK) \right) = -(Q + K^T R K)$$

Obzirom na karakter matrice R , ova se može napisati u vidu

$$R = T^T T$$

$$(A^T - K^T B^T) P + P(A - BK) + Q + K^T T^T T K = 0$$

$$A^T P + P A + \left[T K - (T^T)^{-1} B^T P \right]^T \left(T K - (T^T)^{-1} B^T P \right) - P B R^{-1} B^T P + Q = 0$$

Da bi J bio minimalan po K, neophodno je minimizirati izraz

$$x^T \left[TK - (T^T)^{-1} B^T P \right]^T \left(TK - (T^T)^{-1} B^T P \right) x$$

Budući da su sve vrijednosti nenegativne, minimum se ima kada je

$$TK - (T^T)^{-1} B^T P = 0$$

odnosno

$$K = T^{-1} (T^T)^{-1} B^T P = R^{-1} B^T R \quad (*)$$

matrica P mora zadovoljiti jednačinu

$$\boxed{A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0} \quad (**)$$

Riccatijeva jednačina

Prema tome, projektovanje optimalnog zakona upravljanja sadrži dvije etape:

1. Iz jednačine (**) odrediti P, a onda
2. Na osnovi P, odrediti matricu K iz (*).

Upravljanje $u(t) = -Kx(t)$ je tada optimalno i ono minimizira indeks performanse J.

Kod sistema višeg reda, zahtjev da je A-BK stabilna matrica zamjenjuje se sa zahtjevom da je rang matrica

$$\text{rank} \left[S^T S \mid A^T S^T \mid \dots \mid (A^T)^{N-1} S^T \right] = n$$

gdje je

$$S^T S = Q$$

Zakon upravljanja dobijen kao

$$u = -Kx$$

zove se Kalman-ov regulator. Postoje mnoge druge varijante ovoga regulatora kao što je ona za linearne nestacionarne sisteme, kada je gornja granica intervala u indeksu performanse umjesto beskonačna, konačna, itd. Pored ovoga, postoji i Kalman-ov regulator sa zadatom eksponencijalnom stabilnošću kao i razne varijante upravljačkih algoritama koje minimiziraju kvadratni indeks performanse.

Nelinearni algoritmi upravljanja

Elementi sa nelinearnim statičkim karakteristikama postoje i u procesima upravljanja kao i u sistemima AU. Dok su u procesima neminovni, ali većinom nepoželjni, upotreba nelinearnih elemenata u upravljački strukturama nekada je ekonomski veoma opravdana, a tehnički zadovoljavajuća.

Npr. Termostat kao dvopoložajni regulator jednostavniji je i jeftiniji od PID regulatora i ima procesa gdje je njegovo korišćenje opravdano.

Najinteresantniji aspekt nelinearnih upravljačkih elemenata je njihovo uvođenje u konturu upravljanja s ciljem da se poboljšaju performanse SAU. Jedna od prepreka njihove upotrebe je poteškoća egzaktne analize takvih kontura upravljanja.

U konturama upravljanja susreću se obično tri bazična oblika nelinearnosti:

procesne nelinearnosti (pH kriva)

diskontinualne nelinearnosti (tipa zasićenja, zone neosjetljivosti ili histereza)

dinamičke nelinearnosti (zavise npr od nivoa signala)

Nelinearni algoritmi kod sistema SISO opisani su relacijom $u = f(e)$ gdje je f nelinearna funkcija

Ako je $f(e)$ neprekidna funkcija govori se o kontinualnim nelinearnim algoritmima, a ako je diskontinualna, prekidna, funkcija tada se govori o diskontinualnim ili relejnim algoritmima.

Kontinualni nelinearni algoritmi upravljanja

Kod ovih algoritama zakon preslikavanja ulaza u izlaz tj. $f(e)$ je nelinearna. Sinteza ovih algoritama obično se vrši simulacionim metodama iz više pokušaja, a rjeđe analitičkim putem. U literaturi i tehničkoj praksi, susreće se veliki broj ovih algoritama. Jedan kontinualni nelinearni algoritam upravljanja dat je kao:

$$u(t) = k_p f(|e|) \left[e + \frac{1}{T_I} \int_0^t e dt \right]$$

gdje je pojačanje $K = k_p f(|e|)$

$$k_p = \text{const.} \quad f(|e|) = \beta + (1 + \beta)|e|, \quad \beta = \text{const}$$

Ako je $\beta = 1$, regulator je linearan, a ako je $\beta = 0$ upravljanje ima kvadratnu zakonitost, što je nepovoljno kod malih signala greške.

Karakteristika ovoga regulatora je da njegovo pojačanje zavisi od greške. Veća greška znači veće pojačanje, veće pojačanje vodi redukciji greške.

U slučaju kada je proces upravljanja sa promjenljivom dinamikom kao što je npr. izmjenjivač toplote, posmatran kao jednokapacitivan proces čiji parametri su inverzne funkcije protoka, koji se javlja kao smetnja, tada se koristi PID regulator sa parametrima koji su funkcije protoka

$$u(t) = 100 \frac{f}{P_p} \left[e + \frac{f}{T_I} \int e dt + \frac{T_D}{f} \frac{de}{dt} \right]$$

gdje su

$$P_p(f) = P_p / f, \quad T_I(f) = T_I / f, \quad T_D(f) = T_D / f$$

promjenljivi parametri regulatora P_p , T_I , T_D odgovarajuće konstante, a f protok kroz izmjenjivač od koga zavise parametri izmjenjivača.

Diskontinualni, relejni regulatori

Dvopoložajni regulator, on-off regulator najjednostavniji regulatori koji se koriste u industrijskim primjenama. Algoritam njihovog djelovanja svodi se na isključivanje i uključivanje toka energije prema objektu. Pri regulisanju temperature električne peći, dvopozicioni regulator uključuje ili isključuje grijače peći, čime reguliše temperaturu peći, a time i prostora u kojem se nalazi peč.

Zakon upravljanja određen je sa

$$u = \begin{cases} +m_1, & e > 0 \\ -m_2, & e \leq 0 \end{cases}$$

Algoritam zahtijeva samo on-off akuator, tj. izvršni organ koji je mnogo jeftiniji od kontinualnog akuatora.

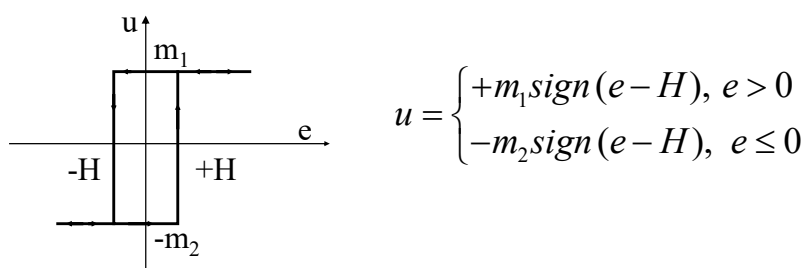
Druga prednost algoritma je da se može koristiti za upravljanje objekta sa nepoznatim parametrima.

Kada je u pitanju upravljanje temperaturom tada se navedeni algoritam prevodi u

$$u = \begin{cases} m, e > 0 \\ 0, e \leq 0 \end{cases}$$

Osnovni nedostatak je veliki broj uključivanja i isključivanja izvršnog organa. Radi toga se koriste dvopozicioni algoritmi sa histerezisom.

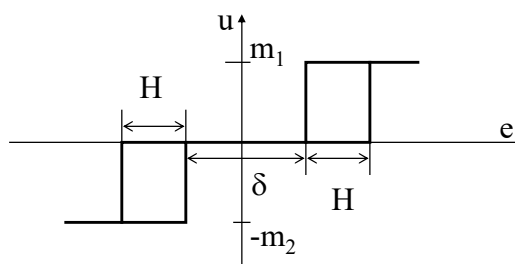
Dvopozicioni regulator sa histerezisom



$2H$ – veličina histerezisa,
savremeni dvopozicioni regulatori su projektovani tako da je
 $2H < 0,01e$

m_1 i m_2 je moguće kod nekih regulatora stepenovati što doprinosi kompleksnosti sistema

U cilju produženja životnog vijeka izvršnog organa uvodi se na račun smanjene tačnosti regulacije zona neosjetljivosti u statičkoj karakteristici. Time se dobija regulator sa tri definisana stanja izvršnog organa tzv. tropozicioni regulator.



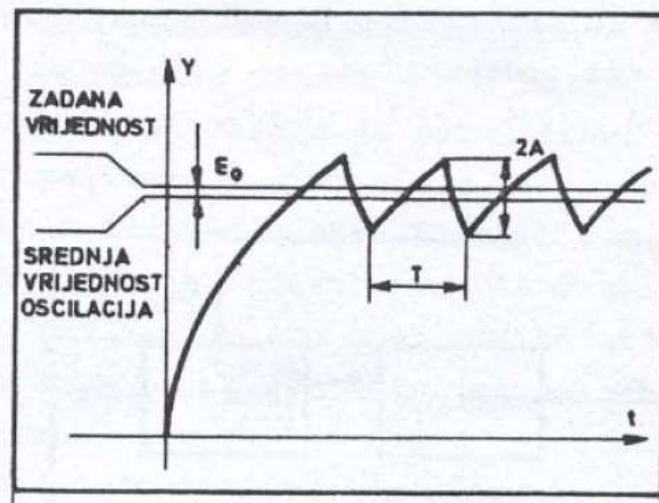
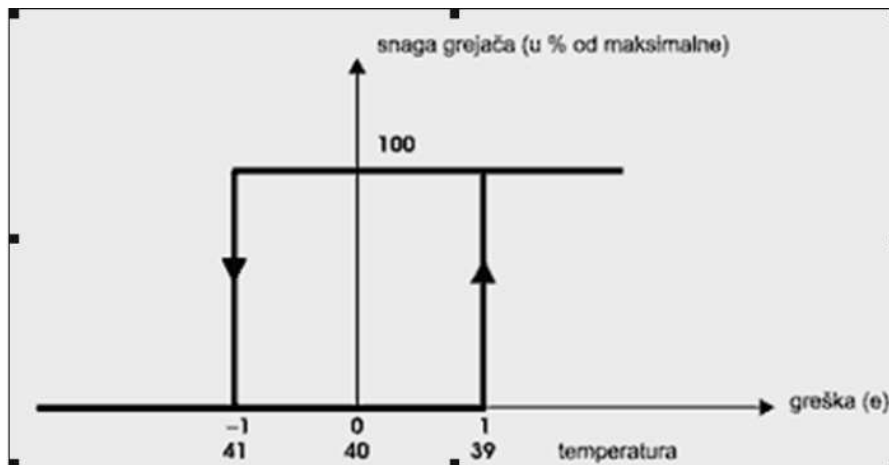
Dvopoložajni regulator temperature

Dvopoložajni algoritam upravljana se riječima može opisati: ako je stvarna temperatura (npr. 8°C) manja od zadate (40°C) neka je snaga grijača maksimalna. Dakle, grijač grije “svom snagom” sve dok se ne postigne zadata temperatura. Bilo bi lijepo kada okolina ne bi uticala na temperaturu vode u posudi jer tada više ne bi bilo potrebno nikakvo grijanje. Ali ako je temperatura okoline na primjer 15°C tada će ona tako djelovati na posudu sa vodom da se voda počinje hladiti. Zbog toga je potrebno dalje održavati temperaturu vode na sledeći način:

ako je temperatura manja od 39°C snaga grijača max.

ako je temperatura veća od 41°C snaga grijača je 0.

Gornji način regulacije je poznat kao *dvopoložajni regulator sa histerezisom* i upotrebljava se kada se ne zahtijeva visok kvalitet regulacije pri čemu treba težiti da se dobije što jeftiniji regulator.



T - period oscilacija

A - amplituda oscilacija

ε_0 - statička greška srednje vrijednosti oscilacija

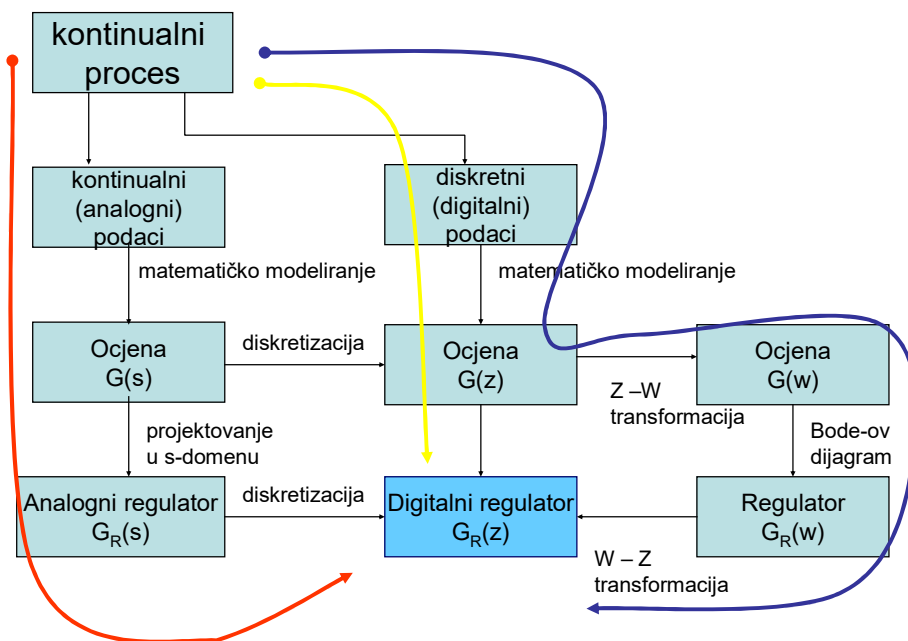
Digitalni algoritmi upravljanja

Ovdje ćemo posmatrati projektovanje digitalnih, diskretnih u vremenu, regulatora za upravljanje kontinualnim procesima.

Projektovanje SAU može se odvijati u dvije etape:

- dobijanje matematičkog modela koji treba da bude upravljani
- projektovanje/sinteza algoritma upravljanja.

Za tipične industrijske probleme napori za rješavanje prvog zadatka su za red veličine veći od napora potrebnih za rješavanje problema sinteze algoritma i strukture upravljanja.



PRIMJER FAZI KONTROLERA

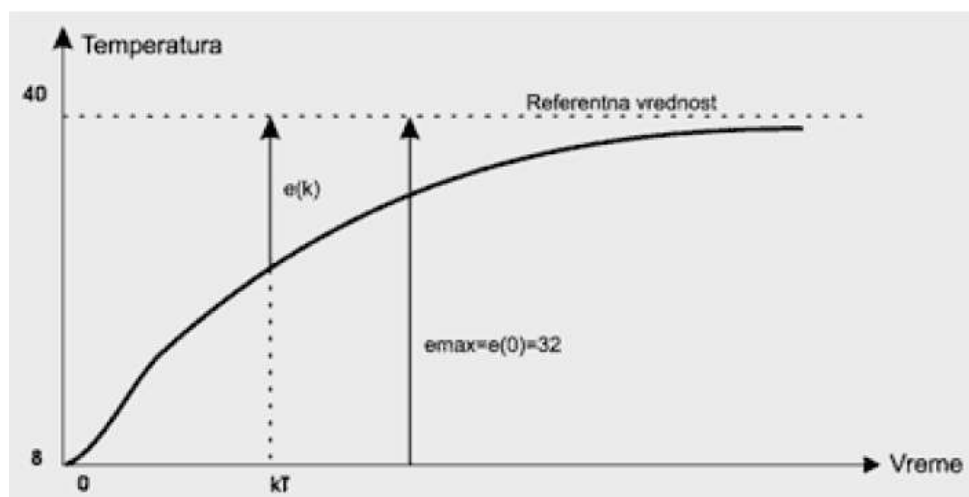
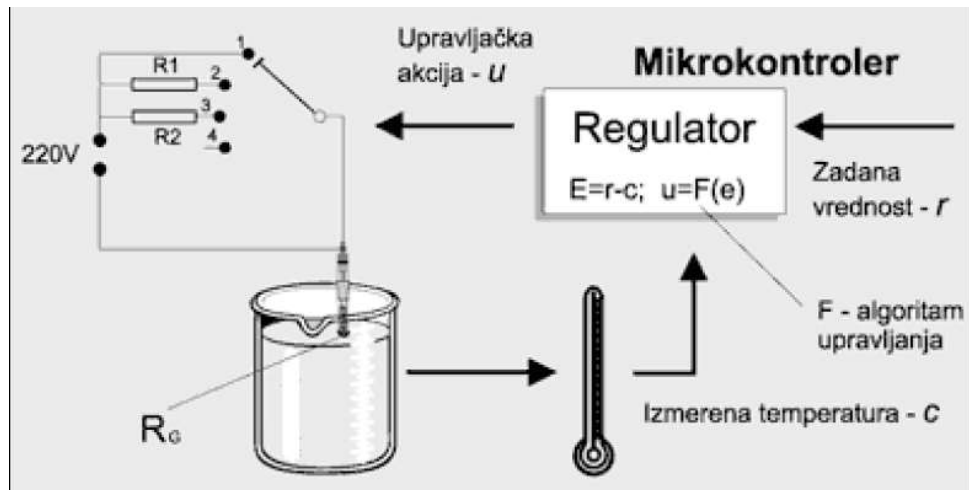
Današnji trend u oblasti regulacione tehnike je da se analogni regulatori zamijene digitalnim (mikrokontroleri, PLC-ovi i drugi digitalni uređaji koji se mogu programirati). Kod digitalnog upravljanja procesima kvalitet regulacije zavisi od kvaliteta programiranja čime se djelovanje inženjera automatike usmerava na programerski dio. Postoje različiti algoritmi upravljanja, ovdje ćemo predstaviti **fazi algoritam** jer je to jedna od savremenih metoda upravljanja blizak čovjekovom pristupu regulaciji.

Fazi u običnom životu

Pojam fazi (engl. fuzzy - maglovit, nejasan) se najbolje može razumjeti na osnovu jednog primera iz svakodnevnog života. Ujutro, kada krećete na posao, školu ili negdje drugo, obično pitate nekoga od svojih ko je malo prije bio van kuće: "Kakvo je vrijeme napolju?". Pitanje je postavljeno sa namjerom da odaberete odjeću tako da se prilagodite vremenu.

Posmatrajući problem izbora odjeće malo apstraktnije, može se primijeniti sledeći način zaključivanja: ako je hladno treba uzeti toplu zimsku jaknu, a ako je toplo uzeti majicu kratkih rukava.

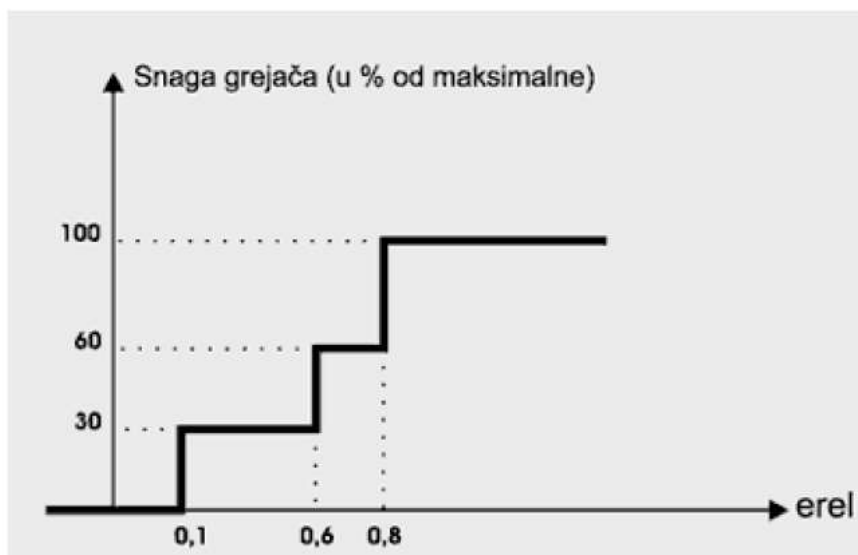
Da li ste zadovoljni ovakvim savjetom? A šta ako je napolju prijatno vrijeme koje zahtijeva umjerenu odjeću, recimo lakšu proljećnu jaknu? Očigledno da opis vremenskih prilika oznakama toplo i hladno nije dovoljan. Potrebna je nekakva finija logika da bi savjet stvarno bio koristan. Uvođenje oznaka jako hladno, srednje hladno, malo hladnije, umereno hladno, malo toplije, srednje toplo, vruće i jako vruće može da pomogne u ovakvoj situaciji jer ćete na osnovu preciznijeg opisa lakše odabrati odjeću. Ovakav pristup postepenosti i laganih prelaza (prepoznavanja situacije) odgovara načinu kako *fazi logika* pristupa problemima i kako ih rešava.



U odnosu na ranije izloženi pristup dvopoložajne regulacije Fazi pristup cijelom problemu je malo finiji. Ono što slijedi nije pravo fazi-logičko zaključivanje ali se radi boljeg razumijevanja može smatrati kao da jeste.

Sledeće pitanje, koje je posledica konstrukcije samog sistema upravljanja, jeste: kako iskoristiti promjenljivu snagu grijača? Nekako logično izgleda sledeće intuitivno zaključivanje:

- ako je temperatura mnogo manja od zadane onda je snaga grijača Maksimalna
- ako je temperatura manja od zadate onda je snaga grijača malo manja od maksimalne
- ako je temperatura malo manja od zadate onda je snaga grijača puno manja od max.
- ako je temperatura približna zadatoj onda je snaga grijača 0.



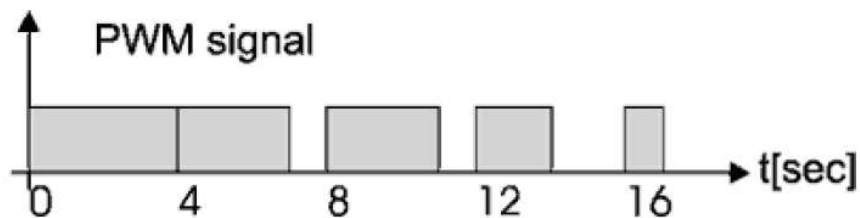
Pseudo - fazi ili četvoropoložajni regulator

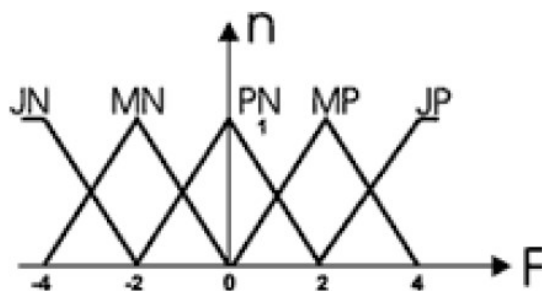
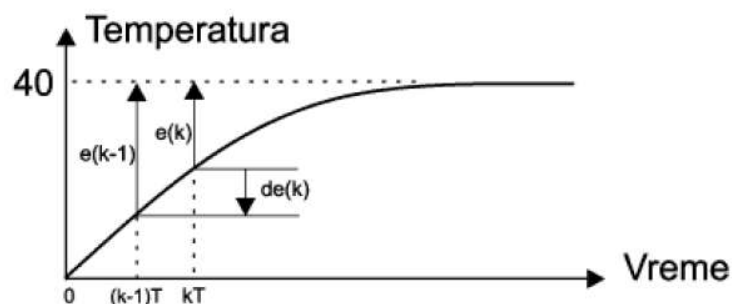
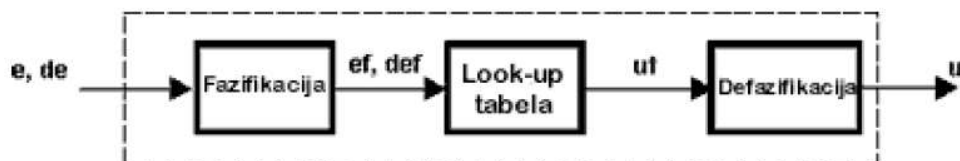
Broj fazi pravila se može mijenjati kao i upravljačka akcija “kolikom snagom treba grijati” na osnovu poznavanja realnog sistema.

Snaga grijača se izračunava po formuli $P=(U/(R_G+R))^2 * R$ (R je ili R_1 ili R_2), gde je U mrežni napon od 220V, R_G je otpornost grejača, a R je otpornost otpornika vezanog na red čiji je zadatak da kontroliše struju kroz kolo. Otpornici su tako podešeni da se dobije odgovarajuća snaga na grijaču. Maksimalna snaga je $P_{max}=U^2/R_G$ (položaj 1), a minimalna je 0 (položaj 4). Postoje još dvije vrijednosti snage $(U/(R_G+R_1))^2 * R_1=0.6P_{max}$ i $(U/(R_G+R_2))^2 * R_2=0.3P_{max}$ (položaji 2 i 3 respektivno), gde je $R_1=0.28R_G$ i $R_2=0.85R_G$.

Prethodni račun je naveden radi ilustracije, naime, disipacija energije na otpornicima drastično ruši iskorišćenje električne energije pa se ovakav način regulacije obično ne primjenjuje.

Zbog toga se u praksi primenjuje **impulsno širinska modulacija** (PWM - Pulse Width Modulation), a ne otpornici na red koji su samo poslužili za ilustraciju kako se podešava promjenljiva snaga grijača.





U svakodnevnom govoru se mogu čuti i sledeći izrazi: malo toplije, hladno, jako hladno itd. isti pristup problemu je uvođenje sledećih oznaka (Sika) za neku vrijednost: Jako Negativno, Malo Negativno, Približno Nula, Malo Pozitivno i Jako Pozitivno (JN,MN,PN,MP i JP). Za predstavljanje ovakvih informacija uvedena je teorija fuzzy skupova čiji je tvorac Lotfi Zadeh. Neka vrijednost može pripadati različitim oznakama čime njen opis postaje nejasan, odnosno maglovit (engl.fuzzy). Na primer, fazi vrijednost $F=3.5$ je MP sa stepenom pripadnosti $n=0.25$ i JP sa $n=0.75$.

Algoritam možda izgleda previše običan i nematematički. Međutim, postoje situacije kada je primjena klasičnih algoritama upravljanja povezana sa velikim teškoćama. Takve situacija je na primer regulacija objekta upravljanja koji je izrazito nelinearan. U takvim neodređenim problemima primena fazi logike može biti korisna.

Gornji algoritam predstavlja četvoropoložajni regulator sa programiranim pragovima prelaza. U stvari, to je lagani korak prema fazi regulatorima jer se vrijednost neke fizičke veličine izrazi običnim riječima.

Ideja pravog fazi upravljanja i jeste da čovek "rečima" opiše svoje poznavanje nekog sistema kako bi se to znanje "pretočilo" u upravljačke algoritme. Ovakav pristup se može opisati kao "račun pomoću riječi" (engl. CW - Computing with Words).

Teoretski je pokazano da je Bulova algebra (ili jeste 1 ili nije 0) samo specijalan slučaj fazi logike, odnosno da je njen podskup.

Dakle, ON/OFF regulator je samo specijalan slučaj FLC.

FLC treba posmatrati kao postupak (algoritam) koji na osnovu dvije veličine (greška i promjena greške) izračunava upravljanje odnosno koliko (u okviru periode $T=4$ sekunde) grijati da bi postigli zadatu vrednost temperature.

Korišćenje računara u industriji

Osnovno pitanje upravljanja (automatizacije) procesa jest kako definisati ciljeve upravljanja:

- zašto upravljati? (što očekujemo od upravljanja)
- čime upravljati? (kojim procesnim veličinama)
- kako upravljati? (odabrati odgovarajuću koncepciju upravljanja)

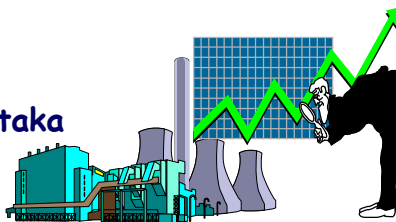
Upravljanje (automatizacija) procesa treba osigurati:

- sigurnost rada procesa,
- ekonomičnost,
- održavanje procesa unutar zadatih tehnoloških ograničenja,
- održavanje količine i kvaliteta proizvoda

Korišćenje računara u industriji

Informaciona funkcija

- prikupljanje i pamćenje podataka
- obrada podataka
- analiza
- prikazivanje



Informaciona funkcija ne mijenja stanje na procesu, niti utiče na njegovo odvijanje
Blagovremene informacije o procesu koje pomažu pri donošenju odluka

Nadgledanje procesa (monitoring)

Akvizicija podataka

Stanje mjerne opreme

- provjera tačnosti
- konverzija
- filtracija

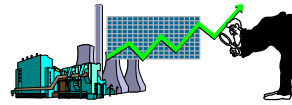
stanje opreme

- provjera zabranjenih kombinacija (sprečavanje havarija)
- detekcija otkaza

stanje proizvoda

- praćenje procesa proizvodnje
- provjera receptura
- kontrola kvaliteta

indirektna meranja



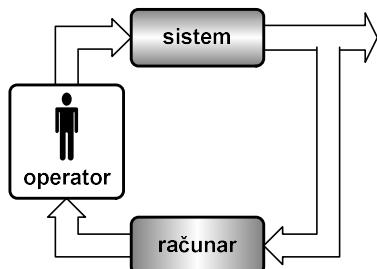
Korišćenje računara u industriji

Upravljačke funkcije

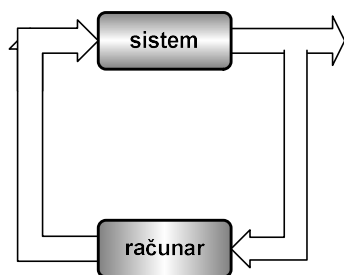
- upravljanje u zatvorenoj sprezi (DDC)
- plansko upravljanje: programsko, sekvencijalno i numeričko upravljanje
- nadzor nad radom procesa (supervizija)



Upravljačke funkcije



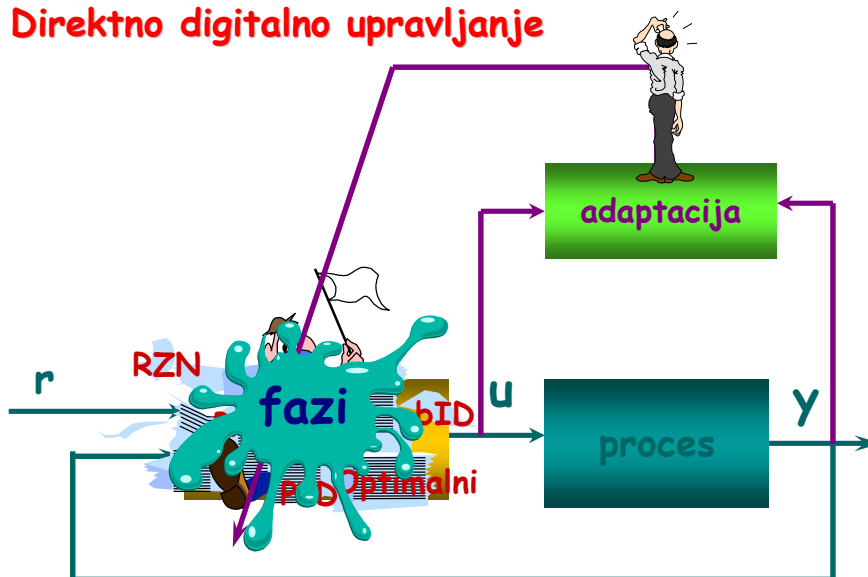
upravljanje u zatvorenoj sprezi - računar u otvorenoj sprezi
izračunava upravljanje i saopštava ga operateru (operatorski vođen upravljački sistem)



upravljanje u zatvorenoj sprezi - računar u zatvorenoj sprezi
generiše upravljačke signale koji se prenose na izvršne organe

Direktno digitalno upravljanje (DDC) se najčešće odnosi na upravljanje u zatvorenoj sprezi. Ono se odlikuje direktnim sprežanjem procesa sa računarom u kome se, na osnovu mjernih signala, izračunavaju upravljački signali koji se prenose na izvršne organe. U principu osnovni zadaci ovakvih sistema upravljanja su da se obezbijedi održavanje nekih veličina na zadatoj konstantnoj referentnoj vrijednosti (zadatak regulacije) ili da se obezbijedi promjena izlaznih veličina u skladu sa promjenom zadatih referentnih signala (zadatak praćenja).

Direktno digitalno upravljanje



Plansko upravljanje

a) Programsko upravljanje

puštanje sistema u rad

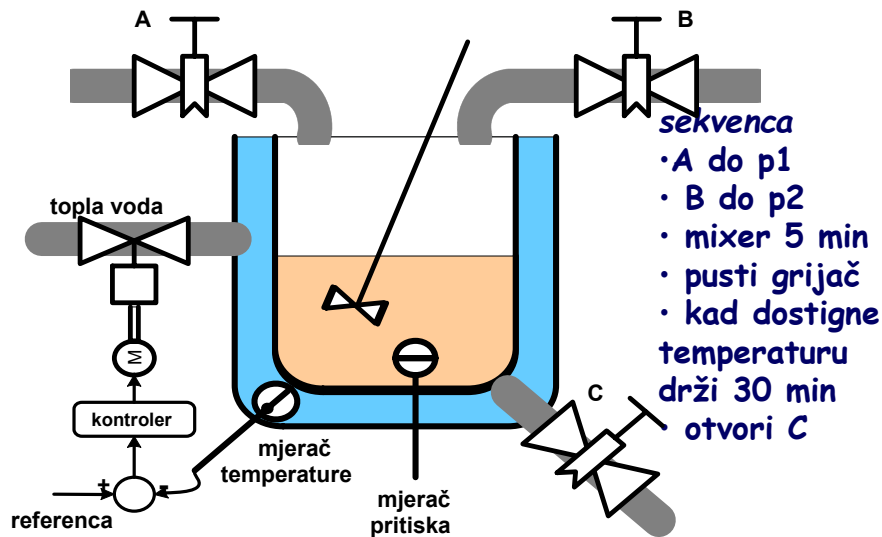
- ispitivanje stanja svih pogona, priprema pojedinih elemenata (zagrijevanje, podizanje pritiska, dovođenje u početni položaj itd...)
- vođenje sistema u radnu tačku

zaustavljanje sistema

- prevođenje u bezbjedan rad ("the show must go on")
- potpuno (plansko) zaustavljanje
- havarijsko zaustavljanje - "sve stop"

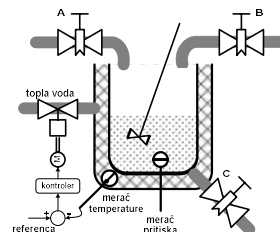
Plansko upravljanje

b) Sekvencijalno upravljanje



Sekvencijalno upravljanje

ako (uslov) tada (akcija)



Ako je pritisnut taster START tada otvori ventila A

Ako je pritisak veći ili jednak od p_1 tada zatvori ventila A i otvori ventil B

Ako je pritisak veći ili jednak od p_2 tada zatvori ventil B

Ako su ventili A i B zatvoreni tada pusti miješalicu u rad

Ako mikser radi tada pusti kontroler temperature u rad

Ako je temperatura veća ili jednaka od θ tada startuj mjerac vremena

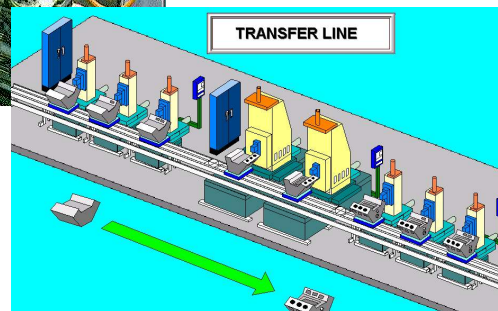
Ako je izmjereno vrijeme veće ili jednako od 30 minuta tada isključi kontroler (zatvori dovod tople vode), zaustavi miješalicu i otvori ventil C

Plansko upravljanje



c) Numeričko upravljanje

- upravljanje
- namijenjeno posebno vrsti mašina
- kodirano alfanumeričkim znacima

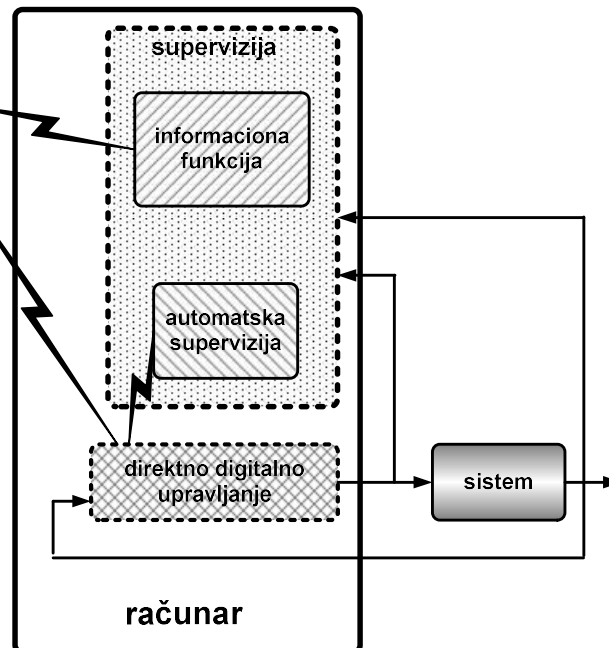


Supervajzorsko upravljanje



operator

- obezbeđuje nadzor nad radom procesa
- referentne vrijednosti
- predhvarijnska stanja
- recepture
- izveštaji
- ...



Korišćenje računara u industriji

Upravljanje proizvodnjom

Integracija nadzora i upravljanja cjelokupnim proizvodnim procesom

Planiranje poslovanja radne organizacije

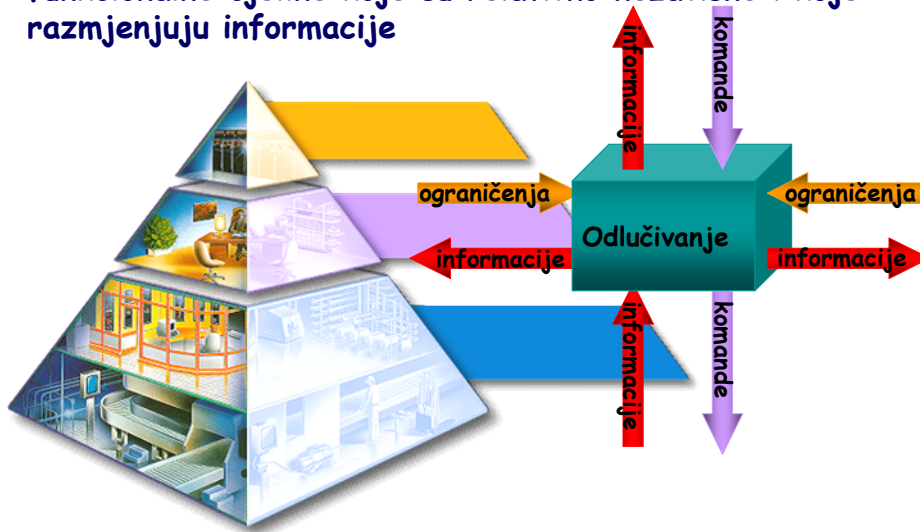
Planiranje proizvodnje
Upravljanje skladištem
Komercijalni poslovi

Poslovni informacioni i upravljački sistem

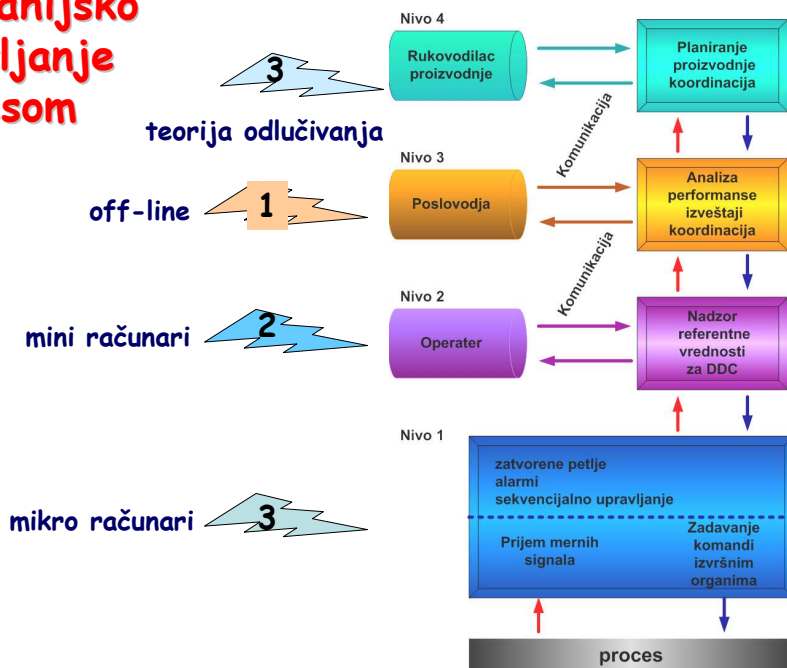
- koordinacija porudžbina sa planom proizvodnje i transportnim mogućnostima
- upravljanje svakim pogonom i koordinacija potražnje sirovina od strane pojedinih pogona
- upravljanje stanjem sirovina i gotovih proizvoda u skladištima
- blagovremeno snabdjevanje sirovinama
- opravke i preventivno održavanje opreme
- rukovođenje osobljem koje radi u pogonima
- istraživanje i razvoj radi povećanja kvaliteta i produktivnosti, kao i razvoja novih proizvoda
- ...

Hijerahijsko upravljanje procesom

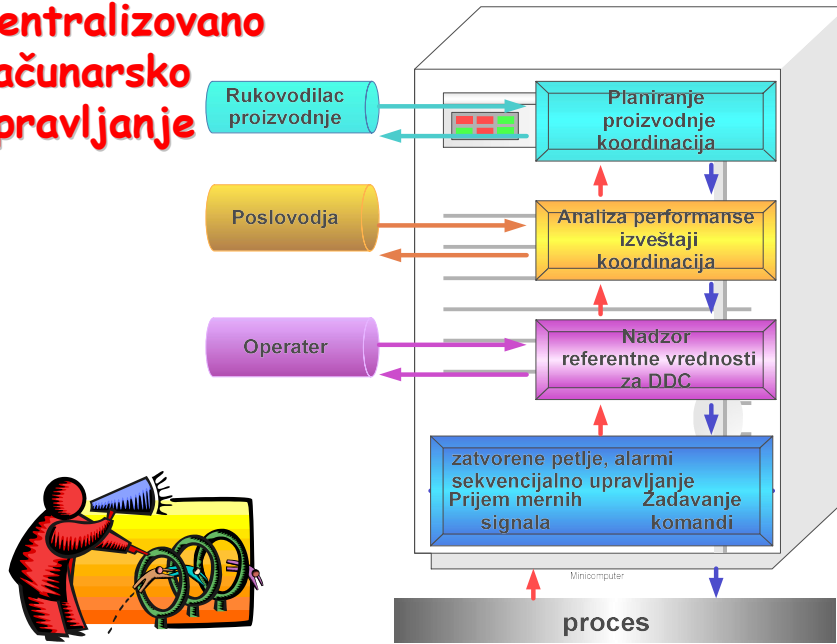
Kompleksnost zahtjeva dovodi do podjele na funkcionalne cjeline koje su relativno nezavisne i koje razmjenjuju informacije



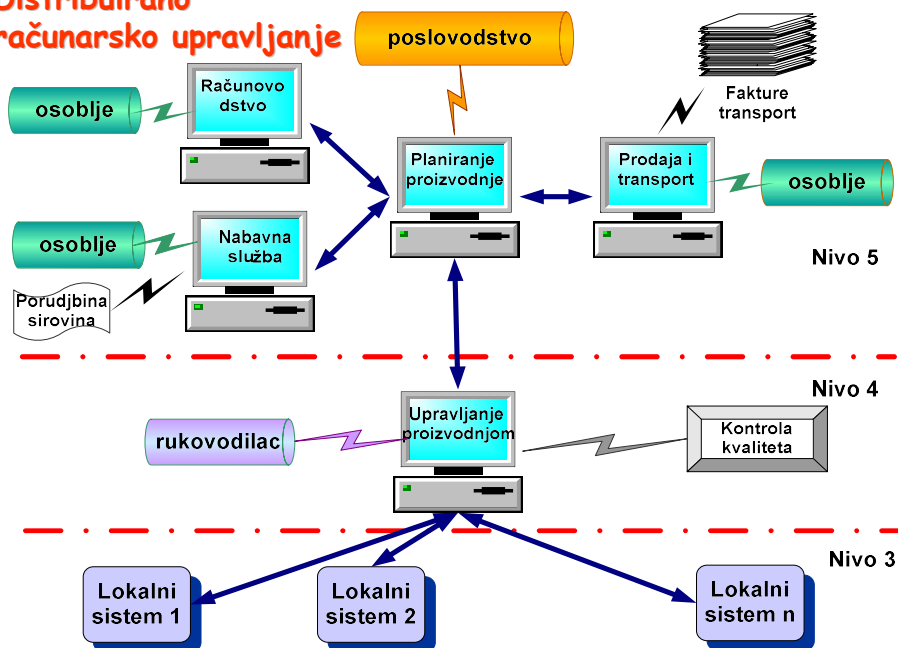
Hijerahijsko upravljanje procesom



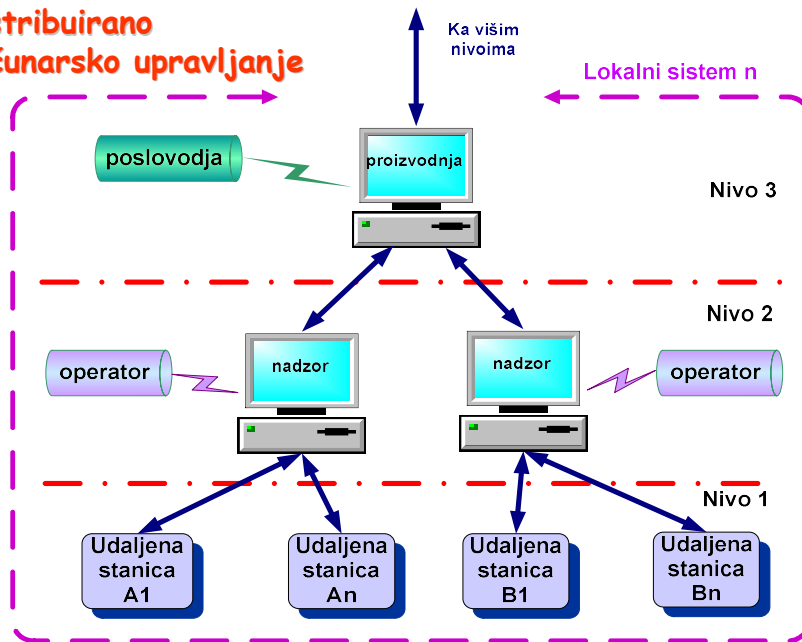
Centralizovano računarsko upravljanje



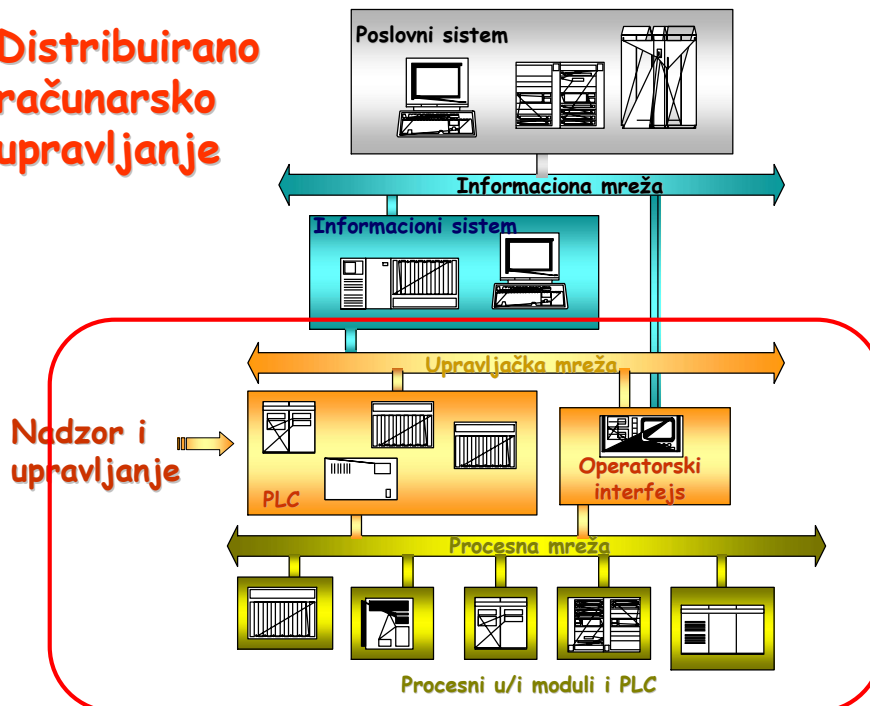
Distribuirano računarsko upravljanje



Distribuirano računarsko upravljanje



Distribuirano računarsko upravljanje

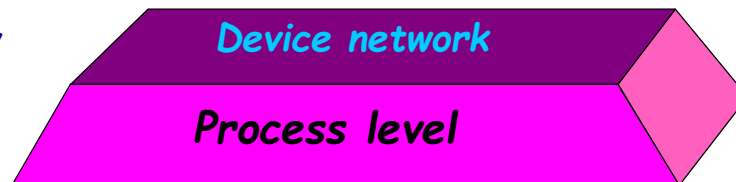
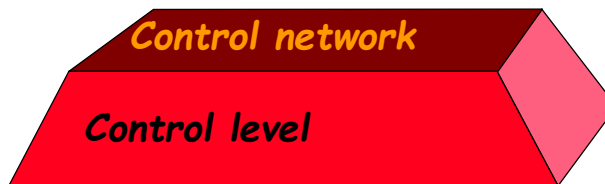


Komunikacione mreže

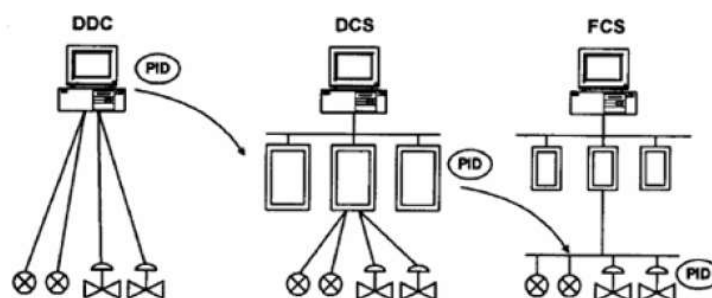
veliki paketi,
mala učestanost,
bez striktnih
vremenskih
ograničenja



mali paketi,
velika
učestanost,
vremenski
kritične
aplikacije



Evolucija upotrebe računara u AUS (akviziciono upravljački sistemi)



- ~ direktno računarsko upravljanje (DDC – Direct Digital Control)
- distribuirani upravljački sistemi (DCS - Distributed Control System)
- upravljački sistemi u polju (FCS - Field Control System)

Direktno računarsko upravljanje (DDC – Direct Digital Control)

- sve prednosti digitalne obrade informacija (mogućnost izvođenja komplikovanih algoritama upravljanja, arhiviranje i lak pregled podataka, fleksibilnost upravljačkih algoritama, itd.).
- javio se problem da upravljanje sa nekoliko stotina takvih petlji, uz korišćenje samo jednog računara, dovodi do niske pouzdanosti rada sistema.
- u ovakvim sistemima jedan par žica se koristio za povezivanje uređaja u polju sa I/O (ulazno/izlaznom) karticom upravljačkog računara što je značajno podizalo cenu instalacije.

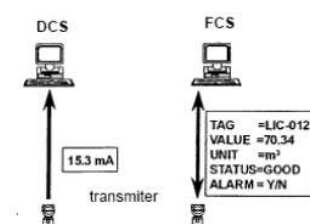


Distribuirani upravljački sistemi (DCS - Distributed Control System)

- Uvođenje digitalnih akviziciono-upravljačkih jedinica koje su postavljene na nivou procesa (procesne jedinice) i koje mogu međusobno, kao i s hijerarhijski višim nivoima upravljanja, da komuniciraju digitalno.
- Procesne jedinice čine PLC (engl. Programmable Logic Controller-PLC) uređaji i udaljene telemetrijske jedinice (engl. Remote Telemetry Unit - RTU) na kojima se izvršava najveći deo aplikativne upravljačke podrške.
- Svaka procesna jedinica je zadužena za akviziciju podataka sa više senzora i upravljanje sa više upravljačkih petlji, pri čemu je vezu sa instrumentacijom (transmiteri, pozicioneri, ...) najčešće ostvarena žično, analognim strujnim signalom.
- Hijerarhijski viši nivo upravljanja u principu vrši vizualizaciju procesa kojim se upravlja i nužnu komunikaciju sa ljudskom posadom (pokretanje i zaustavljanje rada, promena režima rada, podešavanje raznih parametara i sl)

Upravljački sistemi u polju (FCS - Field Control System)

- Druga generacija distribuiranih upravljačkih sistema
- Podrazumeva primenu računara (CPU-jedinice) u samim instrumentima (senzorima, transponderima, aktuatorima, i sl.)
- Upravljačka logika spuštana na najniži mogući nivo, a komunikacija digitalnim protokolom ostvarena u čitavom sistemu.
- Za razliku od prve generacije DCS, gde je otkaz jedne kartice na PLC-u mogao da dovede do ispada iz funkcije nekoliko upravljačkih petlji, kod FCS otkaz uređaja dovodi do otkaza samo jedne upravljačke petlje.
- Korišćenje "pametnih" (engl. smart) aktuatora i transpondera



Distribuirani sistemi upravljanja

Pod tehnološkim procesom podrazumijeva se, u našem 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 veliki 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 nivoje 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.

Distribuirano upravljanje je takvo upravljanje koje omogućava upravljanje procesa ili postrojenja, tako što se oni podijele 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.

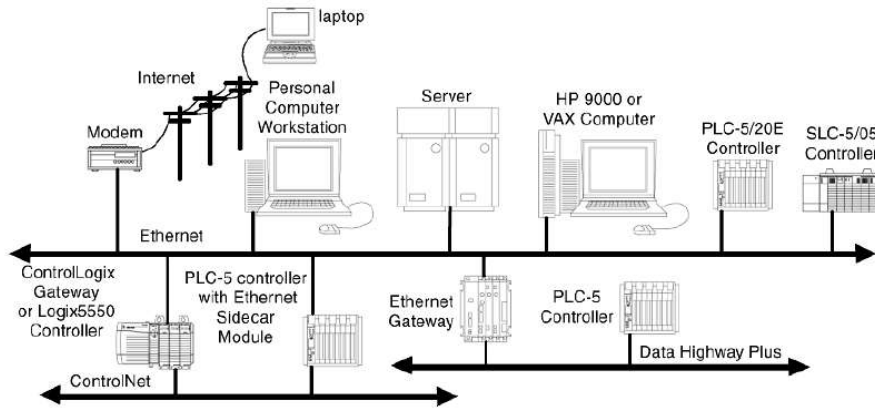


FIGURE 5 Information network example.

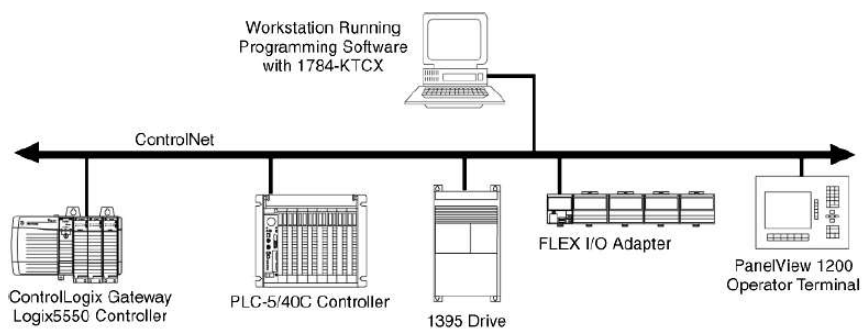


FIGURE 6 Control network example.

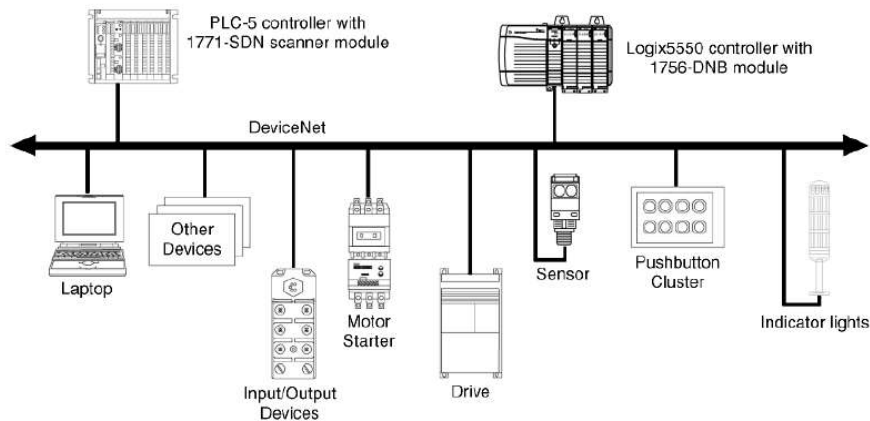


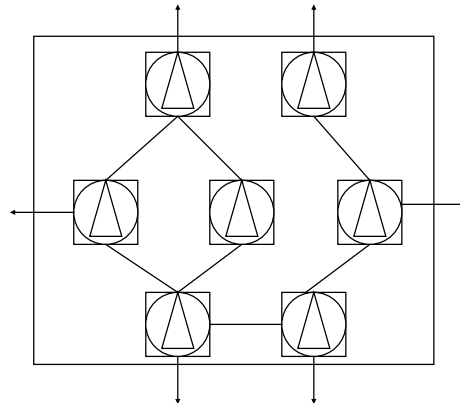
FIGURE 7 Device network example.

Topološke strukture distribuiranih SAU

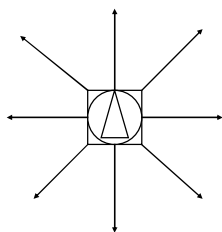
Da bi se na jedinstven način izvršio prikaz različitih topologija DSAU usvojicemo skup grafičkih simbola sa sledećim značenjem:

- 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 cjelini
- funkcija **upravljanja komunikacijom**, koja omogućuje da veći broj učesnika ukomunikaciji vrši razmjenu unformacija posredstvom jedinstvenog komunimacionog podsistema
- ⬡ funkcija **optimizacije**, koja koja predstavlja dio funkcije vođenja, ali se u postojećim sistemima odvaja od funkcije vođenja i izvršava se u posebnom računaru
- ▲ **informacioni**, odnosno **izvršni organi** koji su u kontaktu sa upravljanim procesom

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

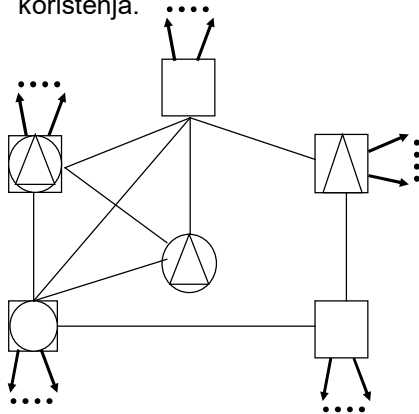


Kada se koristi direktno digitalno upravljanje primjenom procesnog računara, tada se ima potpuna centralizacija, struktura je **zvjezdasta**, a sve funkcije odvijaju se na jednom mjestu tj. u procesnom računaru . Ovi sistemi su nepouzdati jer kada otkáže procesni računar sve funkcije koje je on ostvarivao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



Da bi se prevazišao problem smanjene pouzdanosti došlo se na ideju da se primjene DSAU. Drugi motiv ogleda se u težnji da se SAU prilagodi procesu upravljanja. Treći motiv za razvoj i promjenu DSAU treba tražiti u razvoju tehnologije proizvodnje mikroprocesora i mikror računara, koji je doveo do naglog pada cijene hardwer-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 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. Nijesu 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 je data **opšta strukturna šema DSAU**.

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.

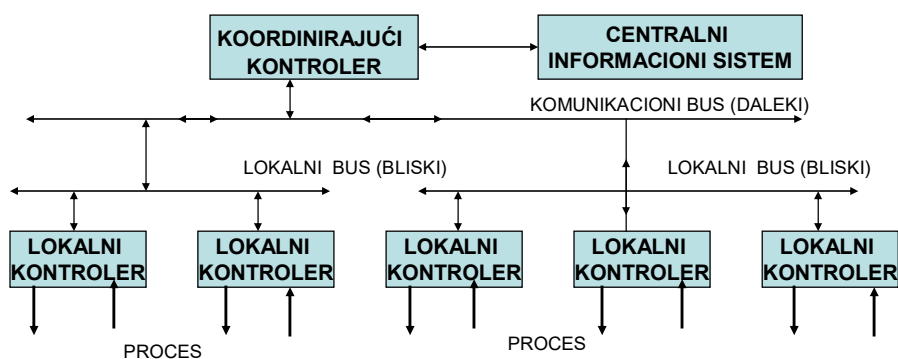
Ovako realizovani sistem upravljanja ima dvije značajne prednosti:

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

Komponente DSAU na bazi računarskih mreža

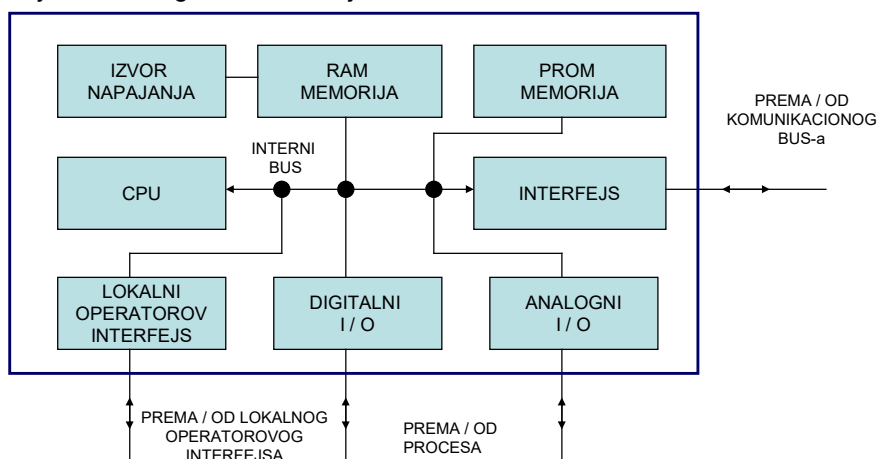
Distribuirani sistem automatskog upravljanja na bazi računarskih mreža sastoji se od:

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 interfejsa koji takođe može biti distribuiran na svakom nivou (lokalni, nadzorni, centralni).

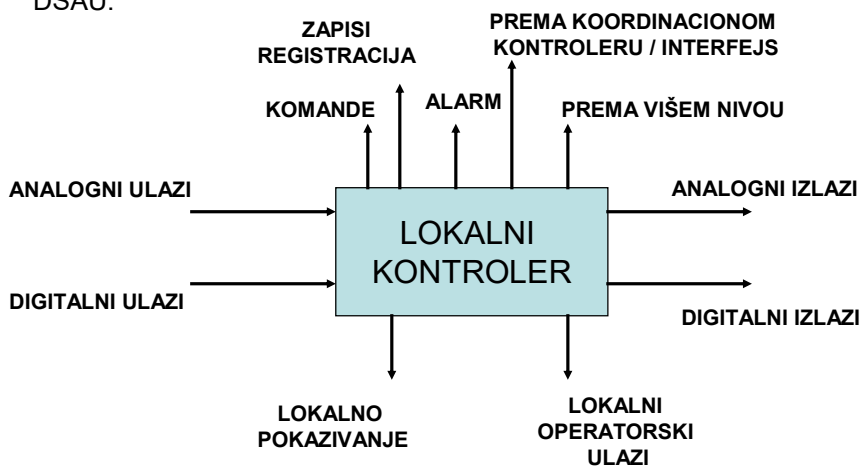


DSAU na bazi računarske mreže

Tipična interna struktura šema lokalnog kontrolera (operativne stanice, automatizirajuće stanice), data je na slici. Obično sadrži regulacione i upravljačke (sekvencijalne) algoritme koji se ostvaruju softverski 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.



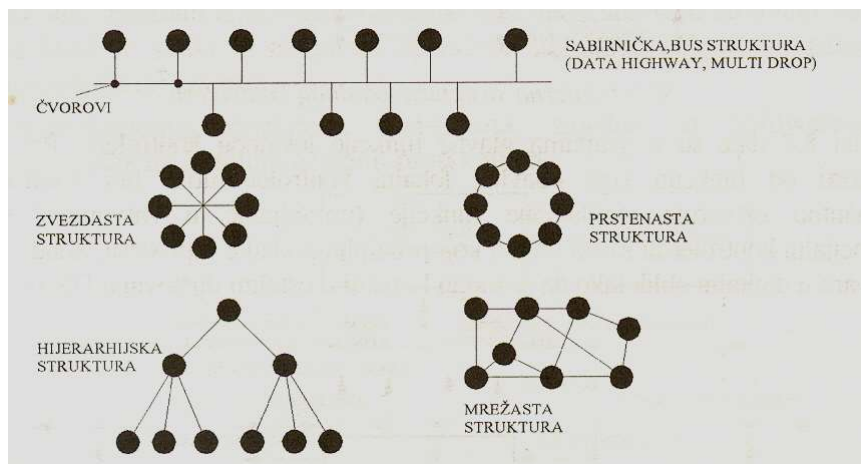
Na sledećoj slici date su u grupama glavne funkcije lokalnog kontrolera. Pri tome, lokalni kontroler može biti kontroler koji dominantno ostvaruje regulacione funkcije (upravljanje u zatvorenoj konturi), sekvencijalni kontroler ili samo uređaj koji prikuplja podatke o procesu, kondicionira ih i pretvara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



Kod projektovanja ili specifikiranja lokalnog kontrolera neki od glavnih parametara i funkcija moraju biti poznati i to:

- maksimalan broj regulacionih kontura koje mogu biti konfigurisane,
- opseg mogućih perioda smplovanja,
- 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,

Topologije sistema i protokoli za prenos podataka određeni su karakterom DSAU tj. procesom koji treba da bude upravljan. 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 realizovana 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 (OSI- arhitektura) 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.

OTPREMNI NIVOI

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

Glavni zadatak protokola na drugom nivou je detekcija i korekcija greške i 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 obezbjeđuje alternativne puteve prenosa poruka što zavisi od topologije sistema.

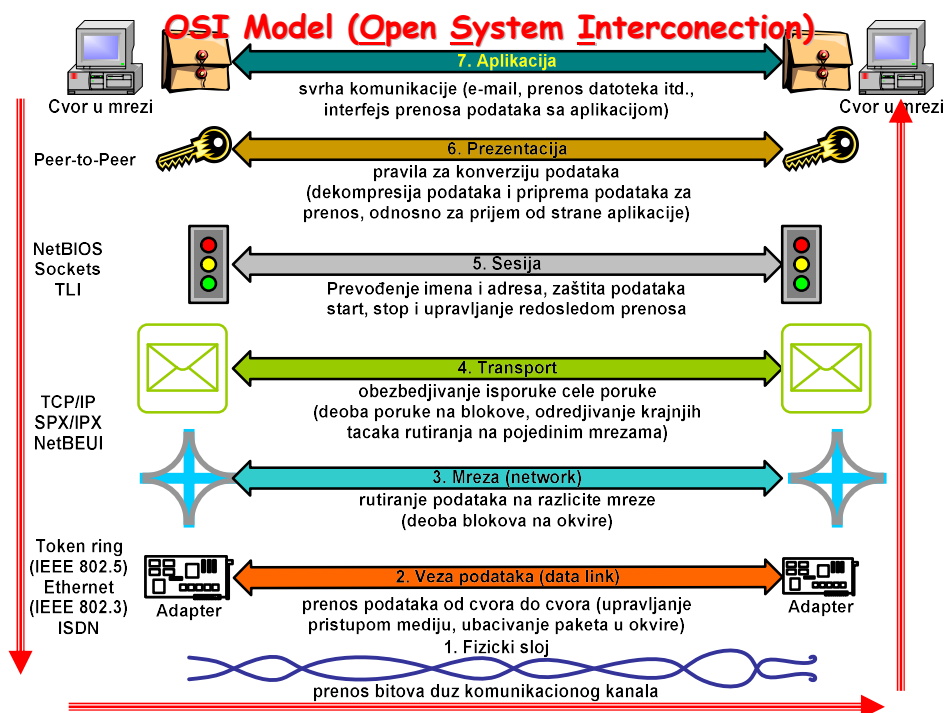
Transportni protokol omogućava pouzdanu razmjenu podataka, daljinsko rutiranje, usmjeravanje poruka, određivanje prioritete strukture, proveru tačnosti prenosa poruka, itd.

KORISNIČKI NIVOI

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 obezbeđuje menadžment funkcije sekvencijalno upravljanje, direktno digitalno upravljanje, tj. raspodelu resursa sistema.



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