

Sadržaj predavanja

- Osnovni pojmovi o tehnološkim procesima
- Osnovne strukture SAU
- Primjer prostog SAU

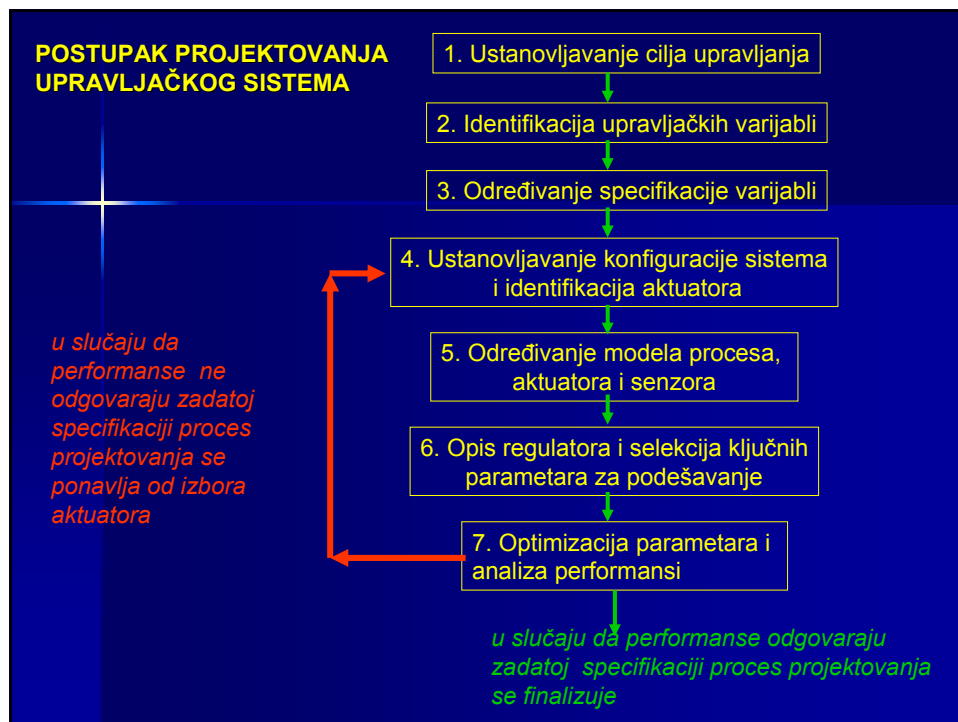
Da se podsjetimo

Automatsko upravljanje je strogo metodički orijentisano stručno područje koje se koristi ili je zastupljeno u:

- a) tehničkim sistemima
- b) netehničkim dinamičkim sistemima
 - biološkim
 - ekonomskim
 - sociološkim
 - političkim

Projektovanje upravljanja

- Povećanjem nivoa opisa sistema povećava se osjetljivost na
 - mjerljivi šum
 - nesavršenost aktuatora
 - nesavršenost modela
- Projektovanje upravljanja predstavlja projektovanje regulatora koji će uspjeti da uspostavi ravnotežu između performansi sistema i robustnosti



U sistemima automatskog upravljanja

- Senzori predstavljaju "oči"
- Aktuatori su "mišići"
- Komunikacijski kanali su "živci"
- Regulatori su "mozak"

Teorija automatskog upravljanja osnova je za kvalitetan rad tehničkih sistema!

U tehničkom sistemu koordinaciju 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



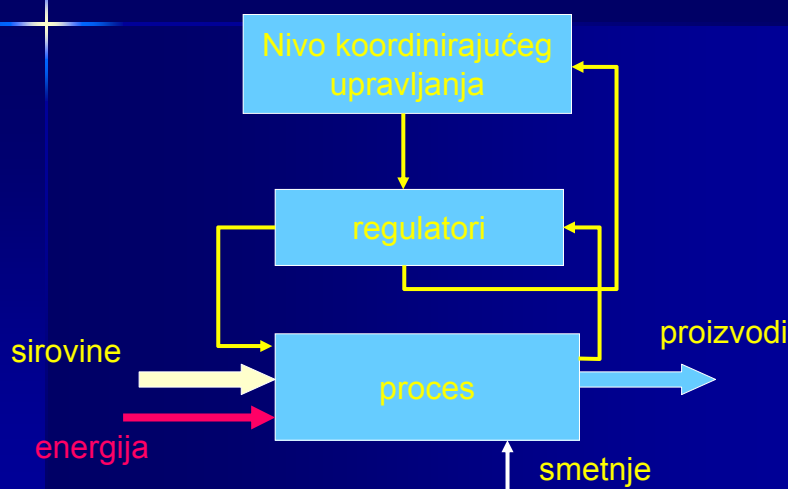
Klasifikacija uređaja i sistema automatskog upravljanja

Za klasifikaciju uređaja i sistema automatskog upravljanja koriste se razni kriterijumi.

Jedan od najčešće korišćenih kriterijuma je onaj koji kao osnov 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 (procesa) kao što su procesni sistemi upravljanja (SAU tehnoloških procesa), sistemi upravljanja proizvodnih linija itd.

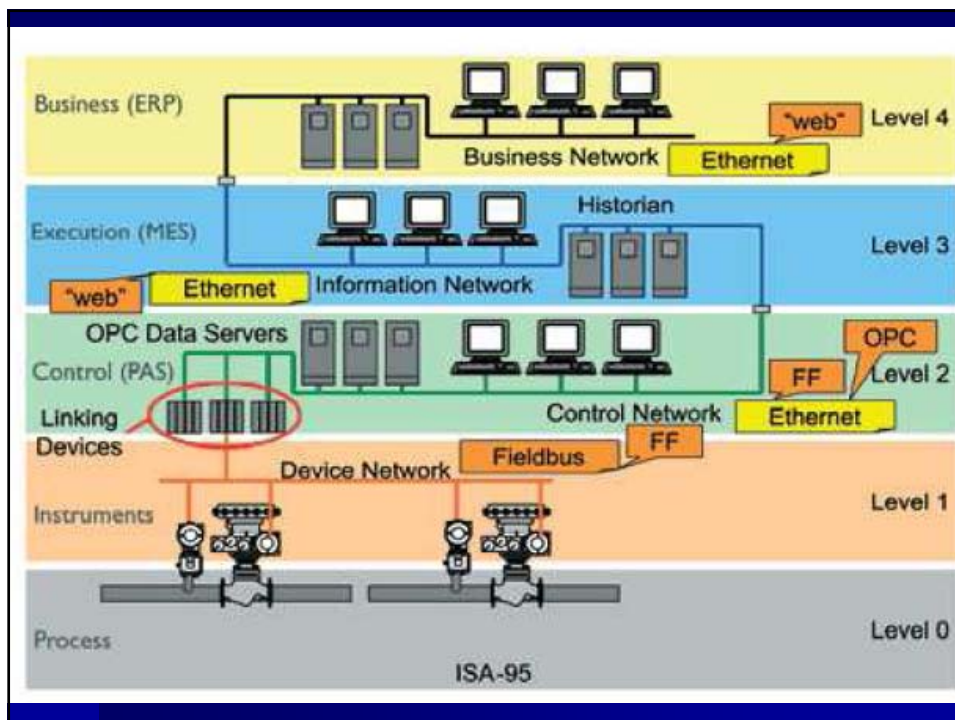
Procesni sistem upravljanja



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: pripremu sirovina (ulazni materijal), reakciju i izdvajanje proizvoda reakcije.

Slijedeće osobine su karakteristika tehnoloških procesa:

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





(a) starija izvedba



(b) novija izvedba

Tehnološki procesi (TP) mogu biti kontinualni ili šaržni.

Regulisano odvijanje kontinualnog TP može biti podijeljeno u tri etape:

- startovanje (prelaz iz stanja mirovanja u normalno stanje rada)
- normalan rad (stacionarno odvijanje procesa pod određenim uslovima)
- zaustavljanje (prelaz iz operativnog stanja rada procesa u stanje nefunkcionisanja procesa)

U šaržnim procesima, transformacija energije i materijala se odvija povremeno, u tzv šaržama. 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).

Osnovne komponente PSU su

- tehnološka oprema sa sensorima i aktuatorima
- lokalni kontroleri (regulatori)
- procesni interface
- upravljačka struktura (računar)

Software upravljačkog računara podijeljen je u:

- sistemski software, uključujući operativni sistem u realnom vremenu,
- aplikativni softver 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, AD konvertori, displeji itd.

Elementi software-a su zadaci i programski moduli, baze podataka, zapisi, fajlovi itd.

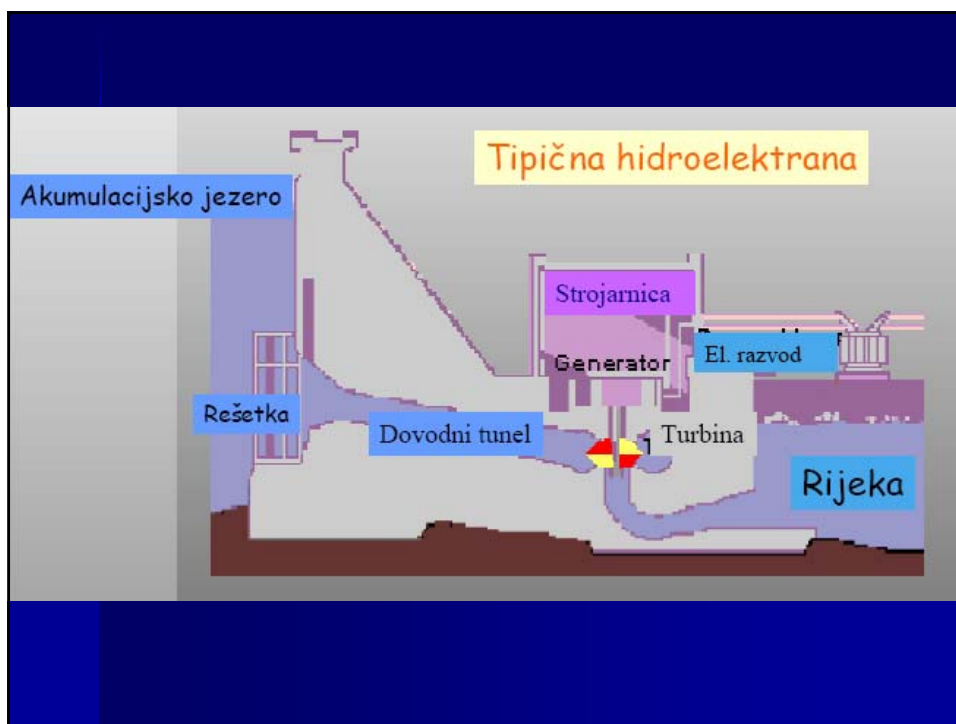
PSU ima dvije vrste fizičkih izlaza: materijalni proizvod u formi npr. hemikalija, tehnološke pare itd. i informaciju u formi izvještaja ili poruka o procesu i PSU. Pri tome izlazi iz PSU moraju da:

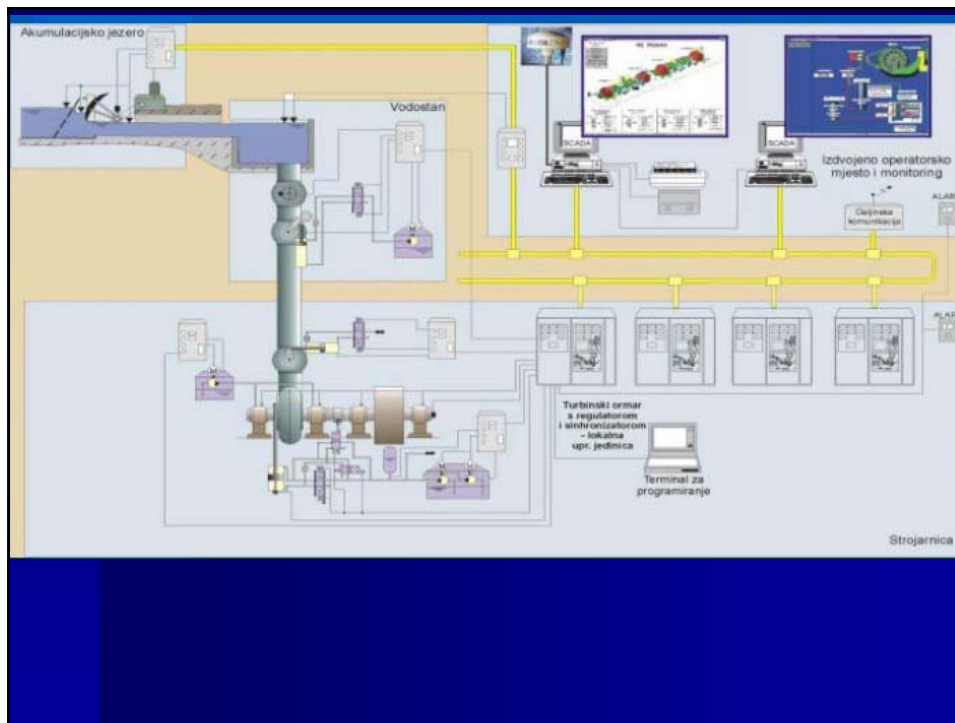
- daju količinu proizvoda prethodno definisanog kvaliteta,
- obezbijede više nivoa upravljanja i rukovanja pouzdanim informacijama o stanju procesa i stanju PSU.

PSU ima dvije osnovne spoljašnje funkcije:

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

Realizacija ovih funkcija bazira se na tri unutrašnja zadatka PSU: ocjena stanja procesa, identifikacija stanja PSU i modeliranje procesa za optimizaciju i predviđanje njegovog ponašanja.





Klasifikacija uređaja i sistema automatskog upravljanja

Jedan od najčešćih kriterijuma za klasifikaciju uređaja i sistema upravljanja je zasnovan na strukturnim dijagramima SAU.

Pri tome, strukturna blok šema može biti upotrebljena da prikaže kompoziciju i međuspojeve u sistemu, ili da zajedno sa prenosnim funkcijama predstavi uzročno-posledične veze unutar sistema.

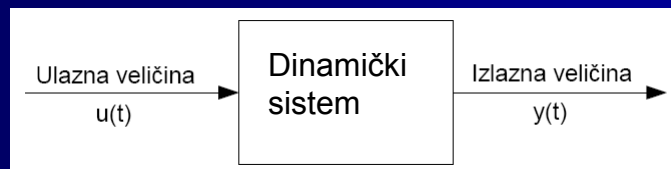
Ako su poznate matematičke i funkcionalne relacije koje opisuju sve elemente u sistemu, strukturni blok dijagram može biti korišćen kao osnova za analitičko ili računarsko razmatranje sistema.

- Zato dinamički sistem treba posmatrati vrlo globalno, što bi se moglo izraziti na sljedeći način:

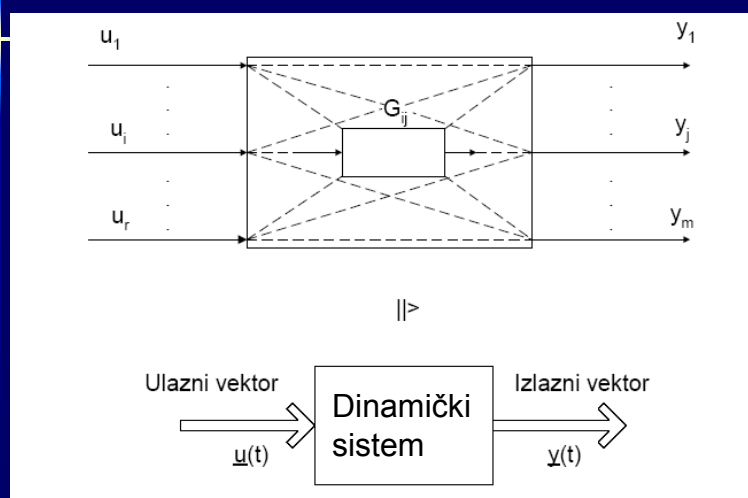
- ◆ Dinamički sistem predstavlja funkcijsku cjelinu za obradu i prenos energije, materije, informacije i kapitala, gdje se ulazne veličine sistema promatraju uzrokom, a izlazne veličine sistema njegovom vremenskom posljedicom.

Struktura dinamičkog sistema može biti:

- ◆ s jednim ulazom i jednim izlazom - **SISO** sistem (Single Input Single Output)

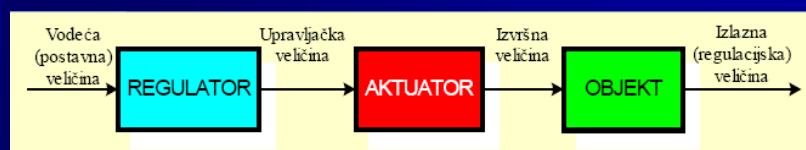


- ◆ s više ulaza i više izlaza - **MIMO** sistem (Multiple Input Multiple Output)



Osnovne strukture SAU

- SAU u otvorenoj petlji (Open Loop)
- SAU u zatvorenoj petlji (Closed Loop)



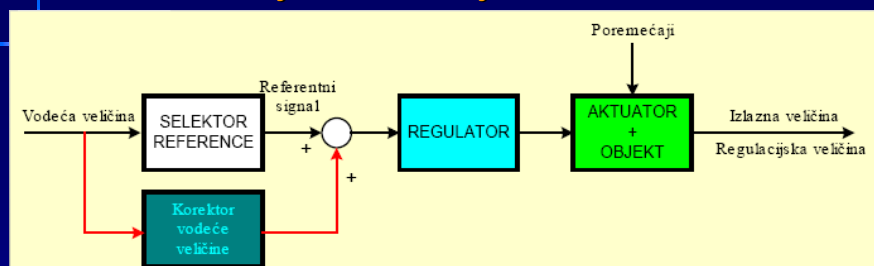
Kada se koristi OL

- kada regulator ne koristi informaciju sa izlaza
- kada je objekat stabilan
- kada nijesmo u mogućnosti da mjerimo izlaznu veličinu
- kada nema poremećaja na objektu
- kada nema promjene dinamike komponenti sistema

Svojstva OL

- operacije se odvijaju po tačno određenom vremenskom toku
- rade po poznatom programu (programsko upravljanje)
- postoji poznata radna tačka za svaku zadatu veličinu
- povremena kalibracija je nužna kako bi se obezbijedila tražena tačnost sistema

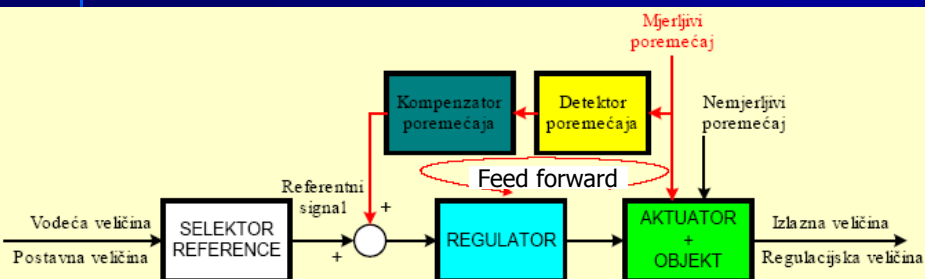
- Ako se želi poboljšati dinamika otvorene konture uvodi se korekcija zadate vrijednosti



Korektor ima ulogu da u početku doda određeni iznos signala kako bi na ulaz u regulator u početnim trenucima došao povećan referentni signal, pa na osnovu toga regulator brže reagovao i usmjerio objekat ka željenom stanju prije nego što bi se to desilo bez ove korekcije.

Kompensacija poremećaja OL

Ako postoji poremećaj i mjerljiv je tada se OL struktura nadograđuje petljom unaprijed (feedforward loop) prema regulatoru



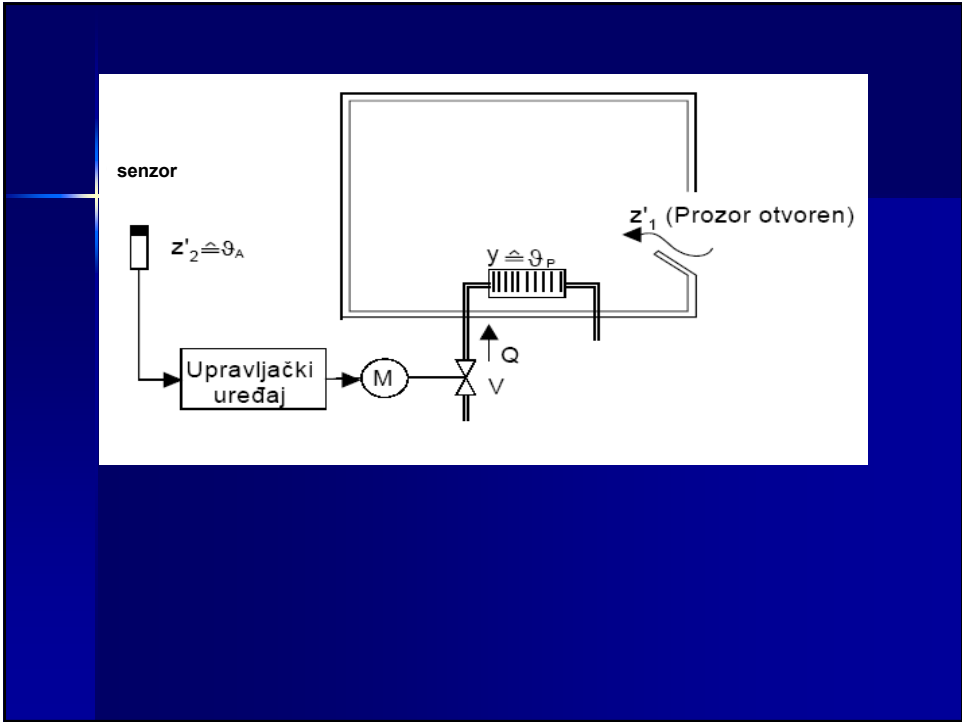
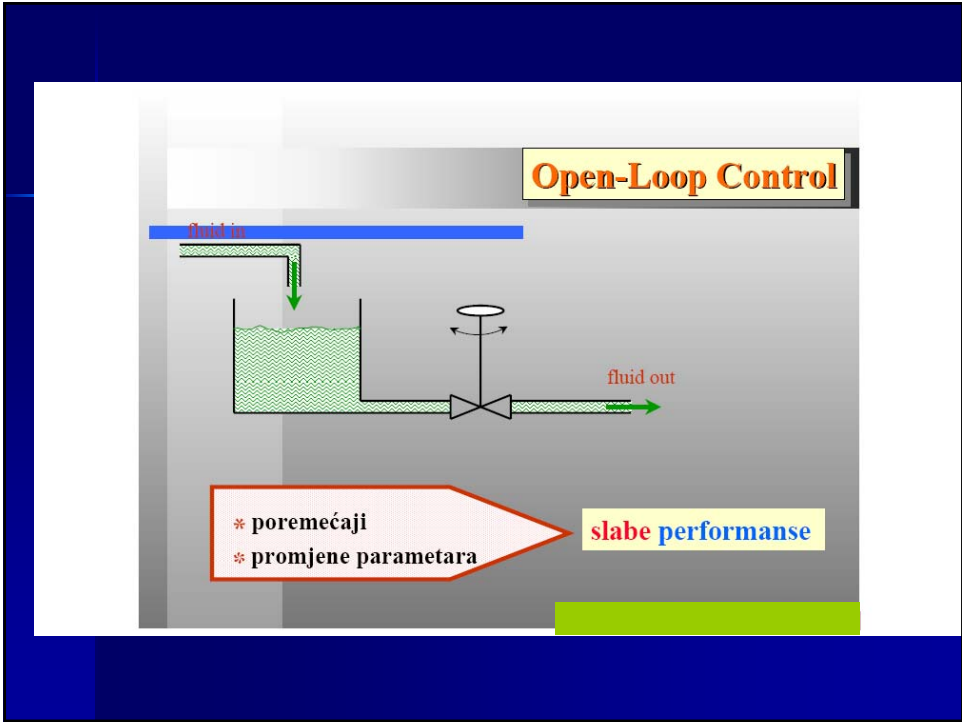
Ovom petljom se regulatoru prosleđuje informacija o tome kakav poremećaj djeluje na objekat kako bi se njegovo djelovanje moglo kompenzirati.

Prednosti OL

- jednostavna konstrukcija
- manja cijena koštanja i održavanja
- nema problema sa stabilnošću
- prihvatljivi kad regulisanu veličinu nije potrebno ili nije moguće mjeriti

Mane OL

- poremećaji i promjene u kalibraciji izvor su greške, pa regulisana veličina može odstupati od očekivane
- da bi se postigao traženi kvalitet neophodno je povremeno obaviti ponovnu kalibraciju sistema
- kod vremenski promjenljivih sistema inestabilnih sistema OL nije moguće primijeniti



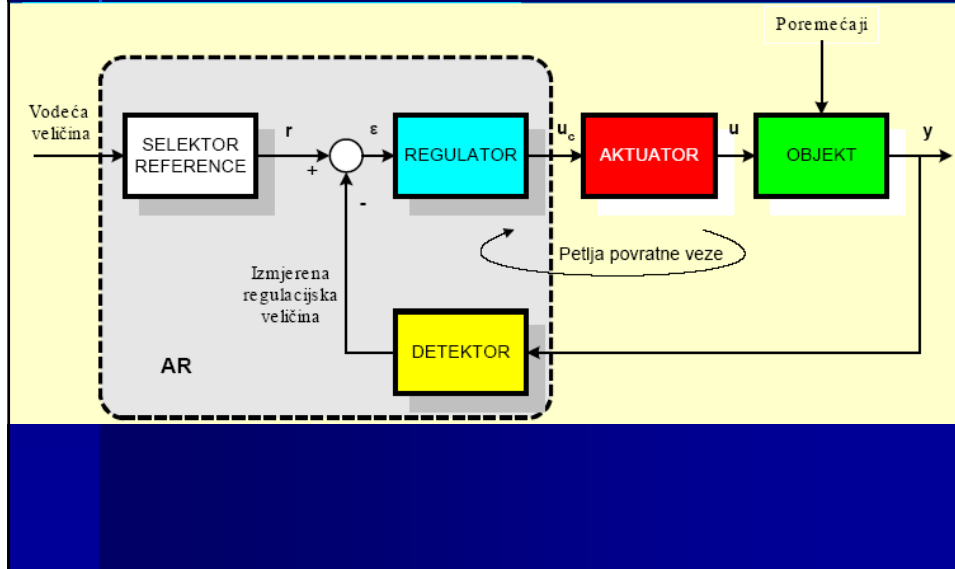
Primjene OL

- Automatska signalizacija,
- Blokada,
- Zaštita,
- Upuštanje,
- Zaustavljanje,
- Upravljanje elektrohidrauličkim ventilima
- Upravljanje elektropneumatskim ventilima
- Pogoni automatskih linija u proizvodnji i td.

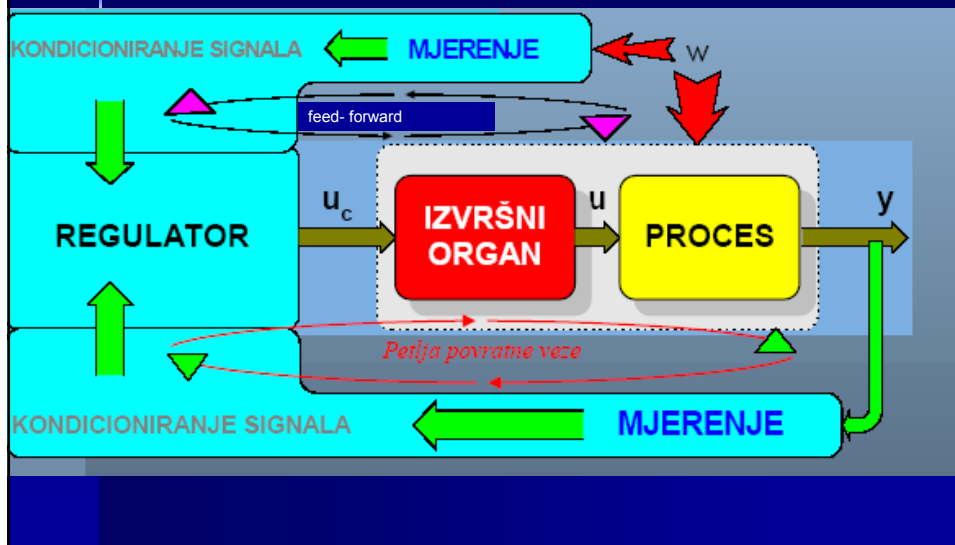
SAU u zatvorenoj konturi (CL)

- kod zatvorenih SAU regulator koristi informaciju o regulisanoj(izlaznoj) veličini (petlja povratne sprege)
- regulator je pogonjen signalom razlike $e(t) = r(t) - y(t)$ (negativna povratna sprega)
- koncept povratne veze je univerzalan

Struktura zatvorenog SAU (CL)



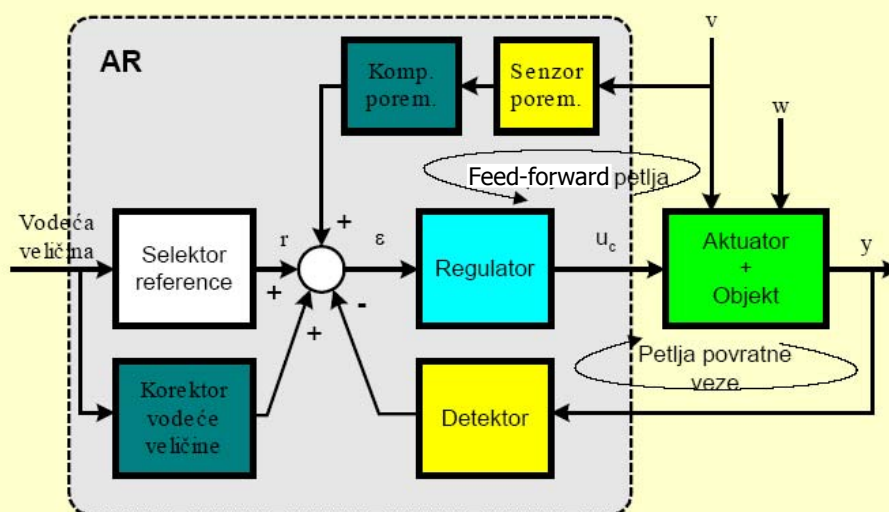
Regulator koordinira senzore i aktuator te vodi proces u skladu sa željenim zahtjevima



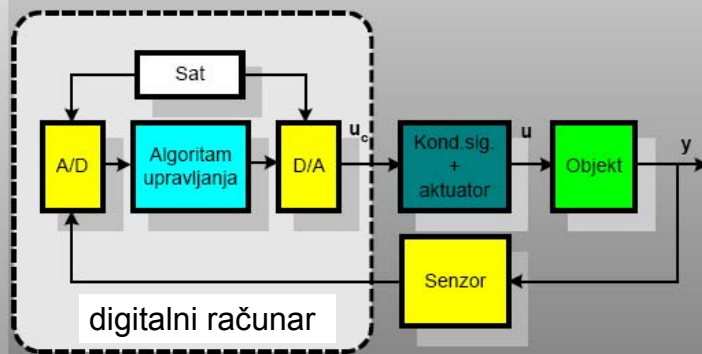
Kada koristiti CL

- Kada je moguće mjeriti regulisanu veličinu
- Kada je objekat nestabilan
- Kada postoje poremećaji (mjerljivi i nemjerljivi)
- Kada je sistem vremenski promjenljiv

Struktura zatvorenog SAU



Digitalni SAU

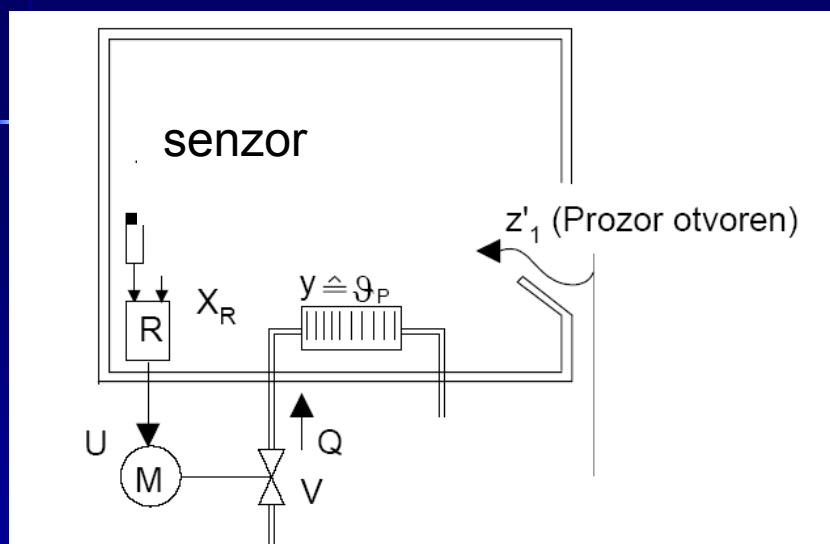


Svojstva CL

- Stabilizacija nestabilnog procesa (objekta)
- Povećana tačnost
- Smanjena osjetljivost sistema na promjene u komponentama
- Smanjenje uticaja poremećaja
- Povećana brzina odziva (propusnog opsega)

Nedostaci CL

- Složeniji i skuplji od otvorenih sistema upravljanja
- Mogu destabilisati SAU
- Mogu dovesti do oscilacija SAU
- Neophodna su znanja iz teorije automatskog upravljanja
- Povratna sprega ima učinke kojih moramo biti svjesni i znati ih iskoristiti. U protivnom moguće su havarije



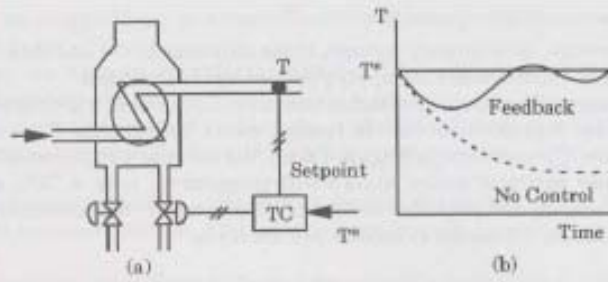


Figure 1.6. The feedback control system.

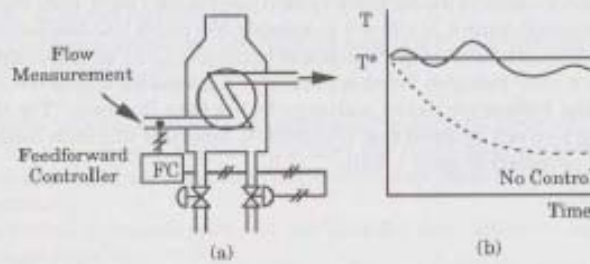


Figure 1.7. The feedforward control system.

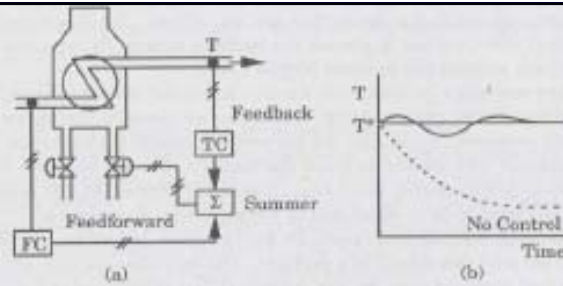


Figure 1.8. The feedforward/feedback control system.

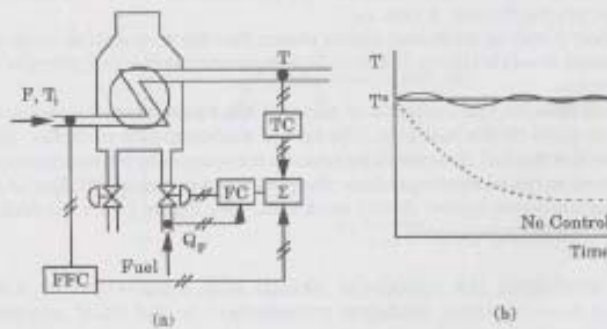


Figure 1.9. The final control system (feedforward/feedback-plus-cascade).

Osnovni režimi rada SAU

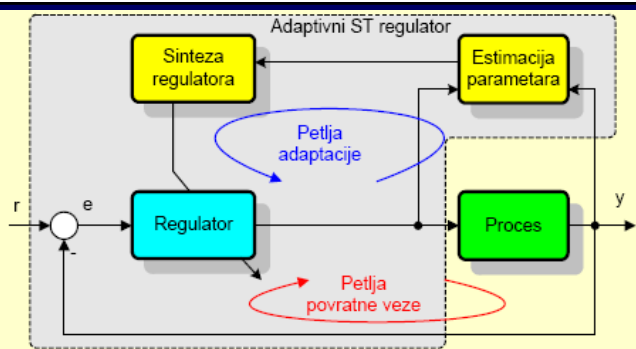
- SAU u režimu stabilizacije – proces se drži na željenoj radnoj tački
- SAU u režimu programske regulacije – proces se vodi po nekom programu
- SAU u režimu praćenja zadate veličine (režim slijeđenja) – proces se vodi iz jedne u drugu radnu tačku (režim) po zadatom zakonu promjene

Druge strukture SAU

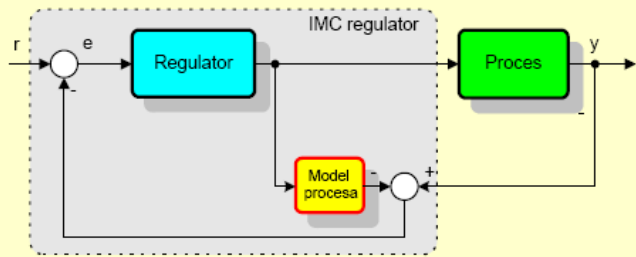
Pored navedenih osnovnih (OL i CL) struktura postoje danas mnoge druge

- IMC struktura (Internal Model Control)
- Adaptivna sa samopodešavanjem parametara (ST regulator)
- Adaptivna sa referentnim modelom (MRAS)
- Dvoparametarska struktura
- ...

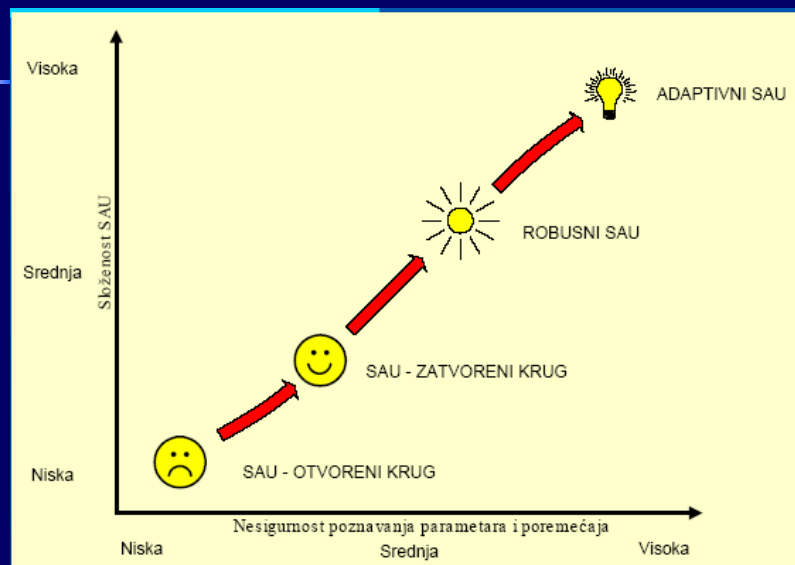
ST regulator



IMC struktura



SLOŽENOST SAU



Što se zaista dešava u jednom automatizovnom sistemu?

- Postoji zadati cilj (željena temperatura sobe, željeni profil brzine, slijed radnji odnosno događaja)
- Postoje uticaji koji ne daju da se cilj ostvari (otvaranje prozora, uzbrdica ili nizbrdica, blokada ili kvar)
- Postoji način da se zadati cilj ipak ostvari korektivnim djelovanjem na proces (pojačavanje grijanja, povećanje gasa ili kočenje, promjene slijeda radnji (upravljački uređaj – regulator)
- Korekcija regulatora uvijek se svodi na upravljanje energijom koja ulazi u proces (analogni regulatori najčešće se rade s operacionim pojačalima, a digitalni s mikrokontrolerima i kao takvi ni u kom slučaju ne predstavljaju izvore energije, već izvore informacije o potrebnoj promjeni energije)

- Između regulatora i procesa obavezno dolazi element čija uloga je promijeniti energetska stanje procesa u skladu s nalogom iz regulatora – takav element nazivamo pojačalo snage
- Da li je postignut cilj, odnosno da li smo blizu njega govore nam na primjer rezultati mjerenja regulisane veličine ili pak logička stanja senzora

PRIMJER PROJEKTOVANJA JEDNOSTAVNOG SISTEMA

ANALOGNI P REGULATORI

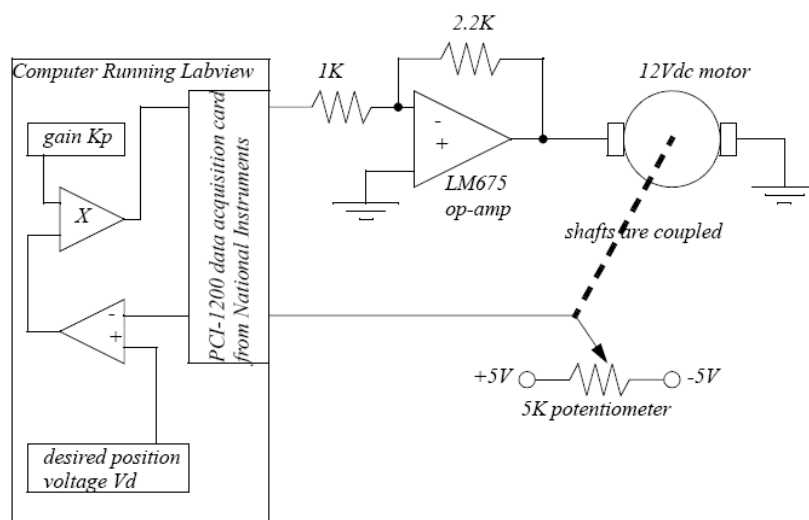
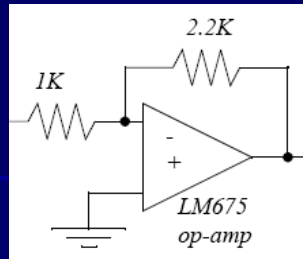
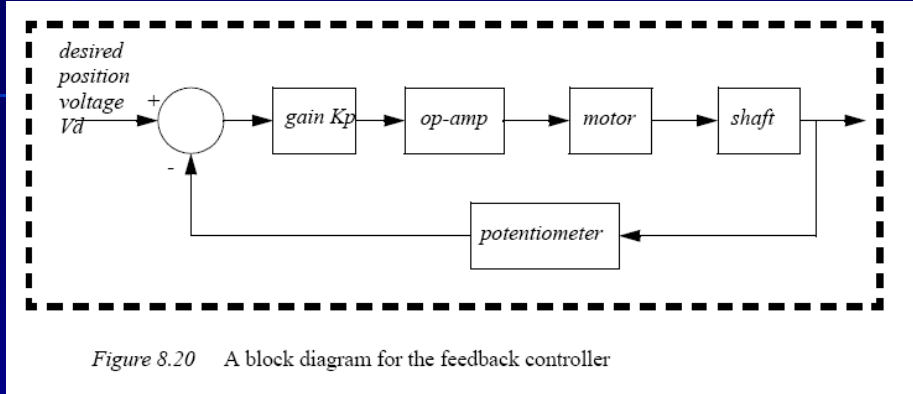


Figure 8.19 A motor feedback control system



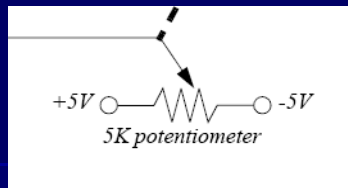
Given or selected values:
 - desired potentiometer voltage V_d
 - gain K

For the op-amp:

$$\sum I_{V+} = \frac{V_+ - V_i}{1K} + \frac{V_+ - V_o}{2.2K} = 0 \quad V_+ = V_- = 0V$$

$$\frac{-V_i}{1K} + \frac{-V_o}{2.2K} = 0$$

$$\frac{V_o}{V_i} = -2.2$$



For the potentiometer assume that the potentiometer has a range of 10 turns and 0 degrees is in the center of motion. So there are 5 turns in the negative and positive direction.

$$V_o = 5V \left(\frac{\theta}{5(2\pi)} \right)$$

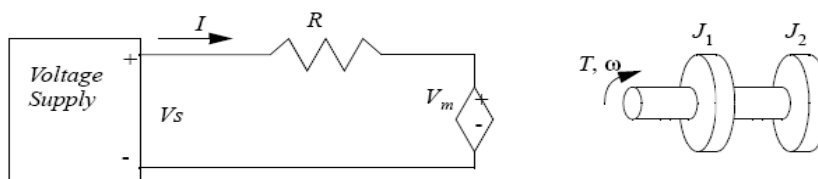
$$\frac{V_o}{\theta} = 0.159 \text{ Vrad}^{-1}$$

For the shaft, it integrates the angular velocity into position:

$$\omega = \frac{d}{dt} \theta$$

$$\frac{\theta}{\omega} = \frac{1}{D}$$

The basic equation for the motor is derived in Figure 8.22 using experimental data. In this case the motor was tested with the full inertia on the shaft, so there is no need to calculate 'J'.



Because a motor is basically wires in a magnetic field, the electron flow (current) in the wire will push against the magnetic field. And, the torque (force) generated will be proportional to the current.

$$T_m = KI$$

$$\therefore I = \frac{T_m}{K}$$

Next, consider the power in the motor;

$$P = V_m I = T \omega = KI \omega$$

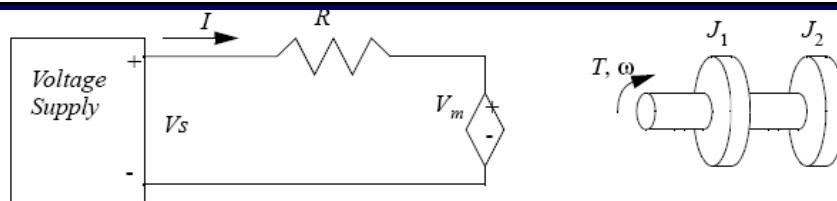
$$\therefore V_m = K \omega$$

Consider the dynamics of the rotating masses by summing moments.

$$\sum M = T_m - T_{load} = J \left(\frac{d}{dt} \right) \omega$$

$$\therefore T_m = J \left(\frac{d}{dt} \right) \omega + T_{load}$$

Figure 7.30 The torque and inertia in a basic motor model



The current-voltage relationship for the left hand side of the equation can be written and manipulated to relate voltage and angular velocity.

$$I = \frac{V_s - V_m}{R}$$

$$\therefore \frac{T_m}{K} = \frac{V_s - K\omega}{R}$$

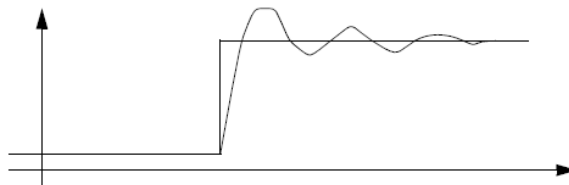
$$\therefore \frac{J \left(\frac{d}{dt} \right) \omega + T_{load}}{K} = \frac{V_s - K\omega}{R}$$

$$\boxed{\therefore \left(\frac{d}{dt} \right) \omega + \omega \left(\frac{K^2}{JR} \right) = V_s \left(\frac{K}{JR} \right) - \frac{T_{load}}{J}}$$

Figure 7.31 The first-order model of a motor

$$\begin{aligned} \ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x &= \frac{f}{M} \\ xD^2 + 2\zeta\omega_nxD + \omega_n^2x &= \frac{f}{M} \\ x(D^2 + 2\zeta\omega_nD + \omega_n^2) &= \frac{f}{M} \\ \frac{x}{f} &= \frac{\left(\frac{1}{M} \right)}{D^2 + 2\zeta\omega_nD + \omega_n^2} \end{aligned}$$

$\left(\frac{1}{M} \right)$ ← particular
 $D^2 + 2\zeta\omega_nD + \omega_n^2$ ← homogeneous



ω_n Natural frequency of system - Approximate frequency of control system oscillations.

ξ Damping factor of system - If < 1 then underdamped, and the system will oscillate. If $= 1$ critically damped. If > 1 overdamped, and never any oscillation (more like a first-order system). As damping factor approaches 0, the first peak becomes infinite in height.

$$\dot{x} + \frac{1}{\tau}x = f$$

$$xD + \frac{1}{\tau}x = f$$

$$x\left(D + \frac{1}{\tau}\right) = f$$

$$\frac{x}{f} = \frac{1}{D + \frac{1}{\tau}}$$

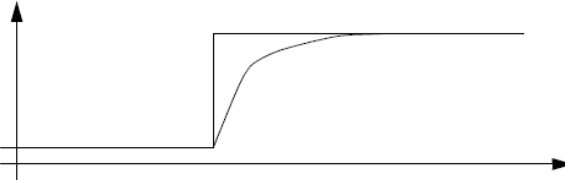
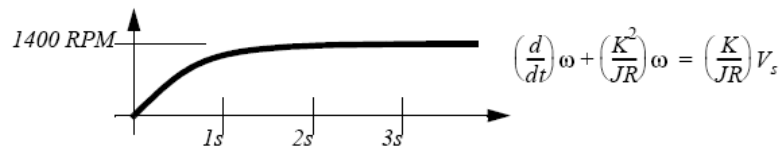


Figure 8.3 A first-order system response

For the motor use the differential equation and the speed curve when $V_s=10V$ is applied:

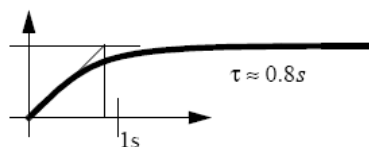


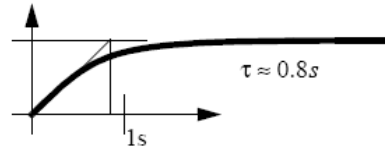
For steady-state

$$\left(\frac{d}{dt}\right)\omega = 0 \quad \omega = 1400\text{RPM} = 146.6\text{rads}^{-1}$$

$$0 + \left(\frac{K^2}{JR}\right)146.6 = \left(\frac{K}{JR}\right)10$$

$$K = 0.0682$$





$$\left(\frac{K^2}{JR}\right) = \frac{1}{\tau}$$

$$0.0682\left(\frac{K}{JR}\right) = \frac{1}{0.8s}$$

$$\frac{K}{JR} = 18.328$$

$$D\omega + \frac{1}{0.8}\omega = 18.33V_s$$

$$\frac{\omega}{V_s} = \frac{18.33}{s + 1.25}$$

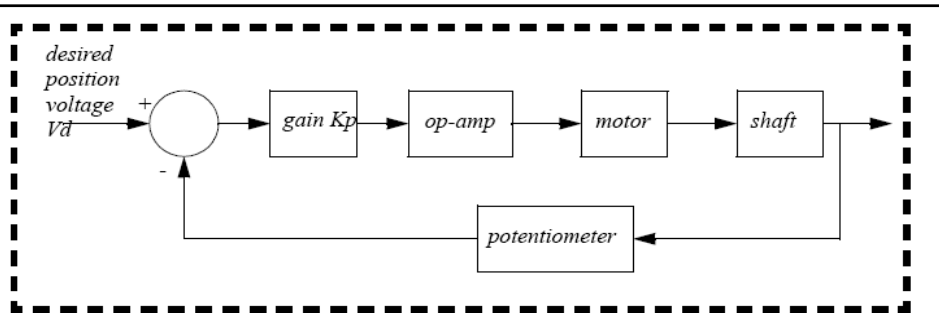
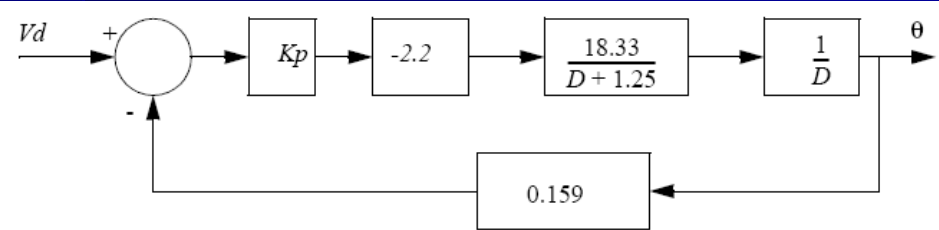
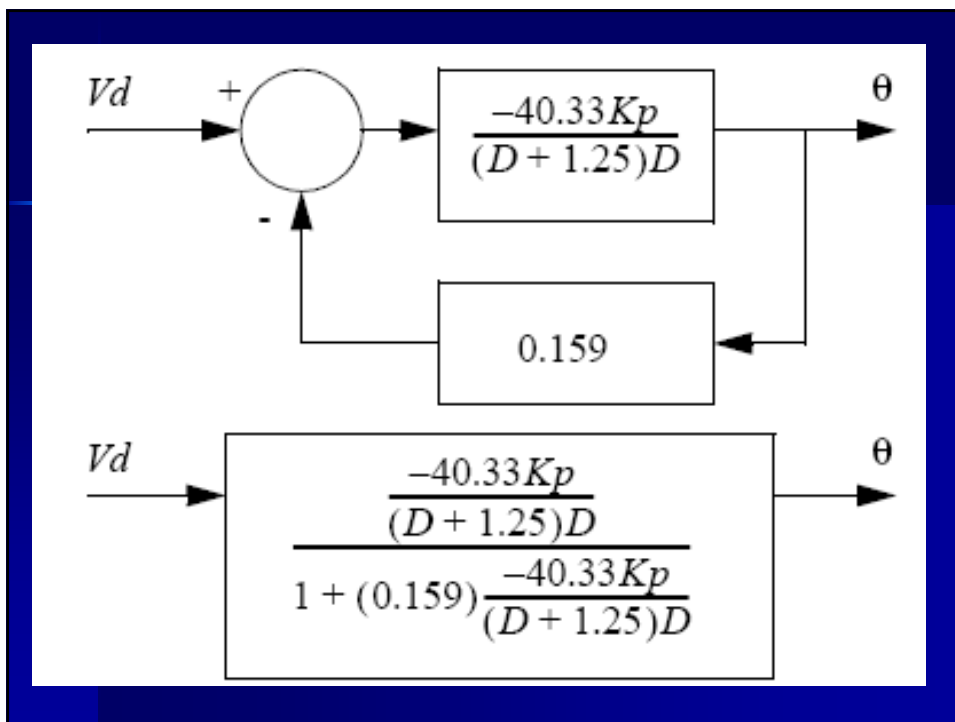
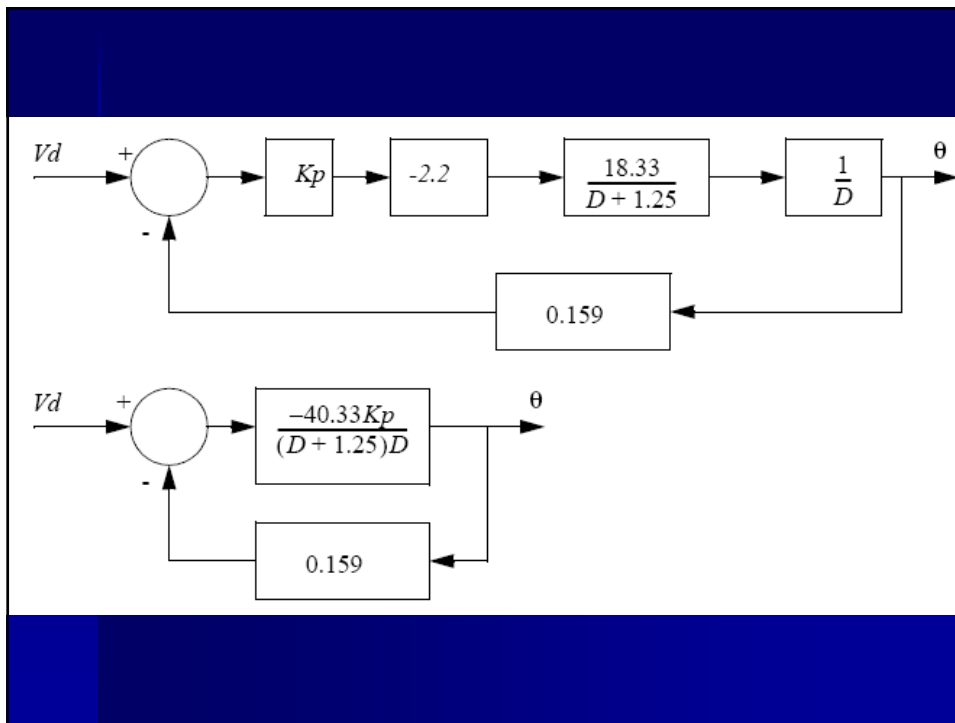
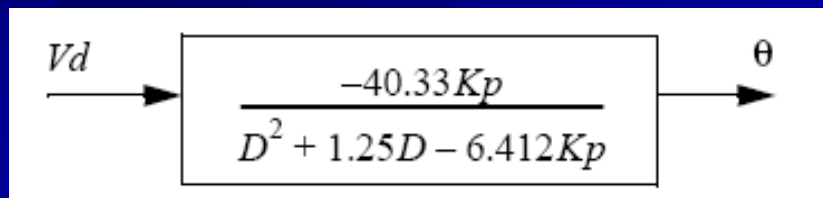
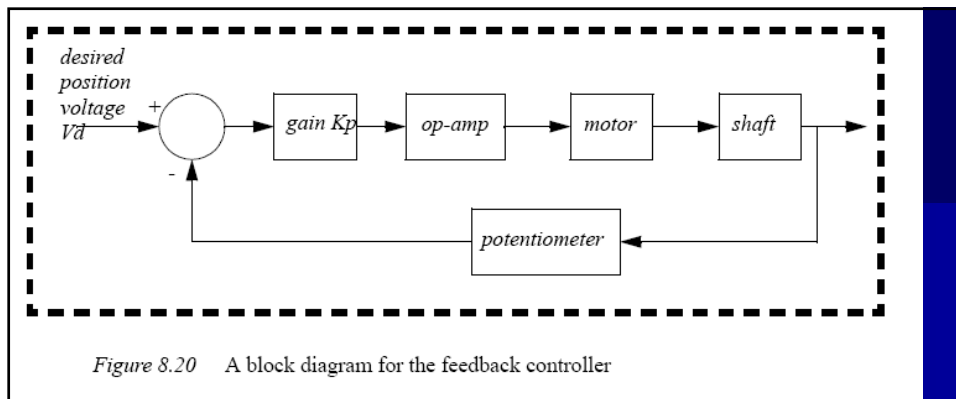
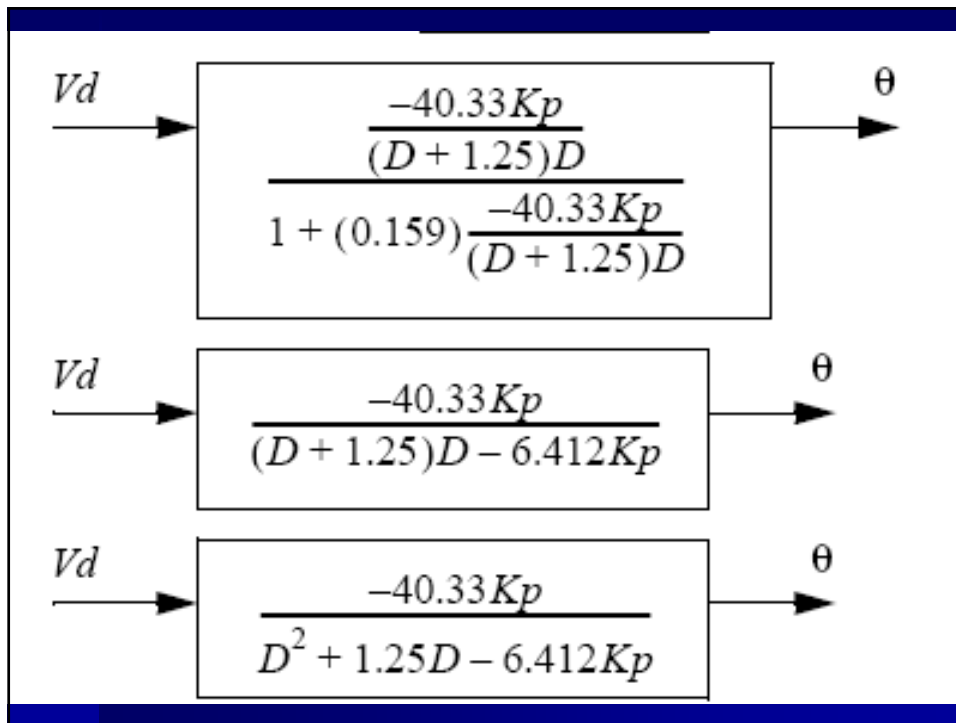


Figure 8.20 A block diagram for the feedback controller







The value of 'Kp' can be selected to 'tune' the system performance. In Figure 8.24 the gain value is calculated to give the system an overall damping factor of 1.0, or critically damped. This is done by recognizing that the bottom (homogeneous) part of the transfer function is second-order and then extracting the damping factor and natural frequency. The final result of 'Kp' is negative, but this makes sense when the negative gain on the op-amp is considered.

We have specified, or been given the damping coefficient as a design objective.

$$\xi = 1.0$$

The denominator of the system transfer function can be compared to the standard second-order response.

$$D^2 + 1.25D - 6.412K_p = x'' + 2\xi\omega_n x' + \omega_n^2 x$$

$$1.25 = 2\xi\omega_n$$

$$1.25 = 2(1.0)\omega_n$$

$$\omega_n = 0.625$$

$$-6.412K_p = \omega_n^2$$

$$-6.412K_p = 0.625^2$$

$$K_p = -0.0609$$

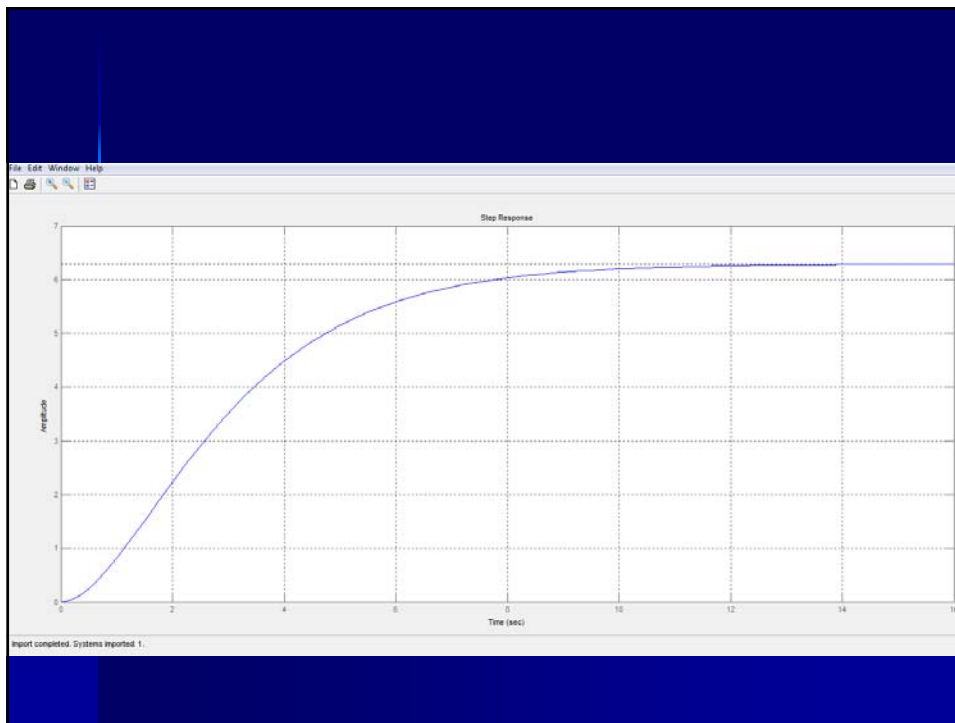
MALO MATLABA

```
>> w3=tf([40.33*0.0609],[1 1.25 6.412*0.0609])
```

Transfer function:

2.456

s^2 + 1.25 s + 0.3905

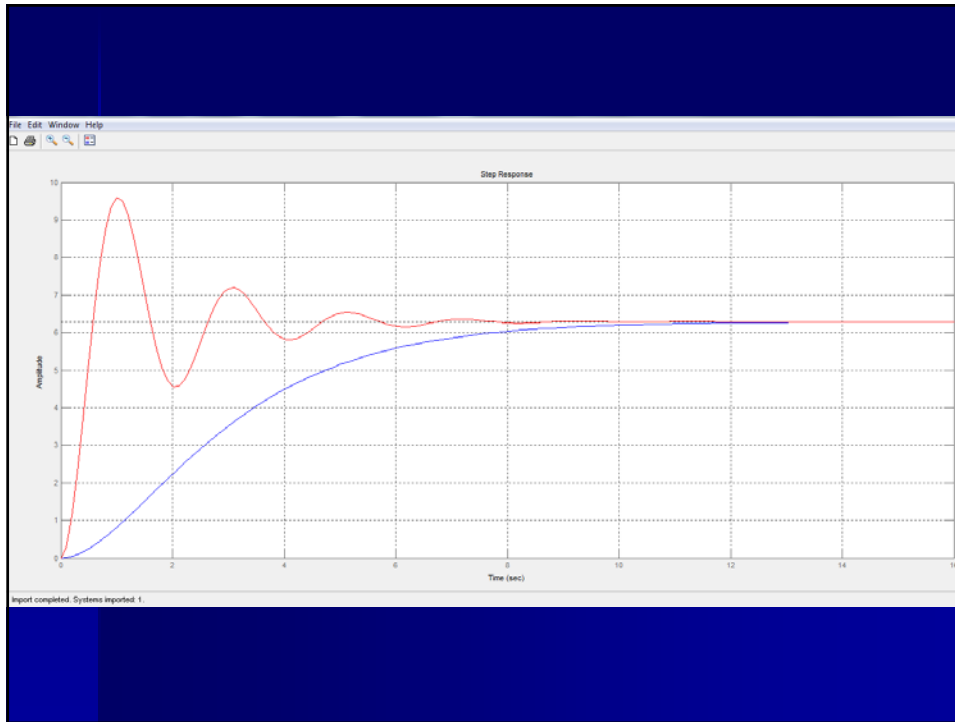


$$\xi = 0.2 \quad \omega_n = 3.125 \quad K_p = -1.523$$

```
>> w4=tf([40.33*1.523],[1 1.25 6.412*1.523])
```

Transfer function:
61.42

 $s^2 + 1.25 s + 9.765$



Type	Transfer Function
Proportional (P)	$G_c = K$
Proportional-Integral (PI)	$G_c = K\left(1 + \frac{1}{\tau D}\right)$
Proportional-Derivative (PD)	$G_c = K(1 + \tau D)$
Proportional-Integral-Derivative (PID)	$G_c = K\left(1 + \frac{1}{\tau D} + \tau D\right)$
Lead	$G_c = K\left(\frac{1 + \alpha\tau D}{1 + \tau D}\right) \quad \alpha > 1$
Lag	$G_c = K\left(\frac{1 + \tau D}{1 + \alpha\tau D}\right) \quad \alpha > 1$
Lead-Lag	$G_c = K\left[\left(\frac{1 + \tau_1 D}{1 + \alpha\tau_1 D}\right)\left(\frac{1 + \alpha\tau_2 D}{1 + \tau_2 D}\right)\right] \quad \alpha > 1, \tau_1 > \tau_2$