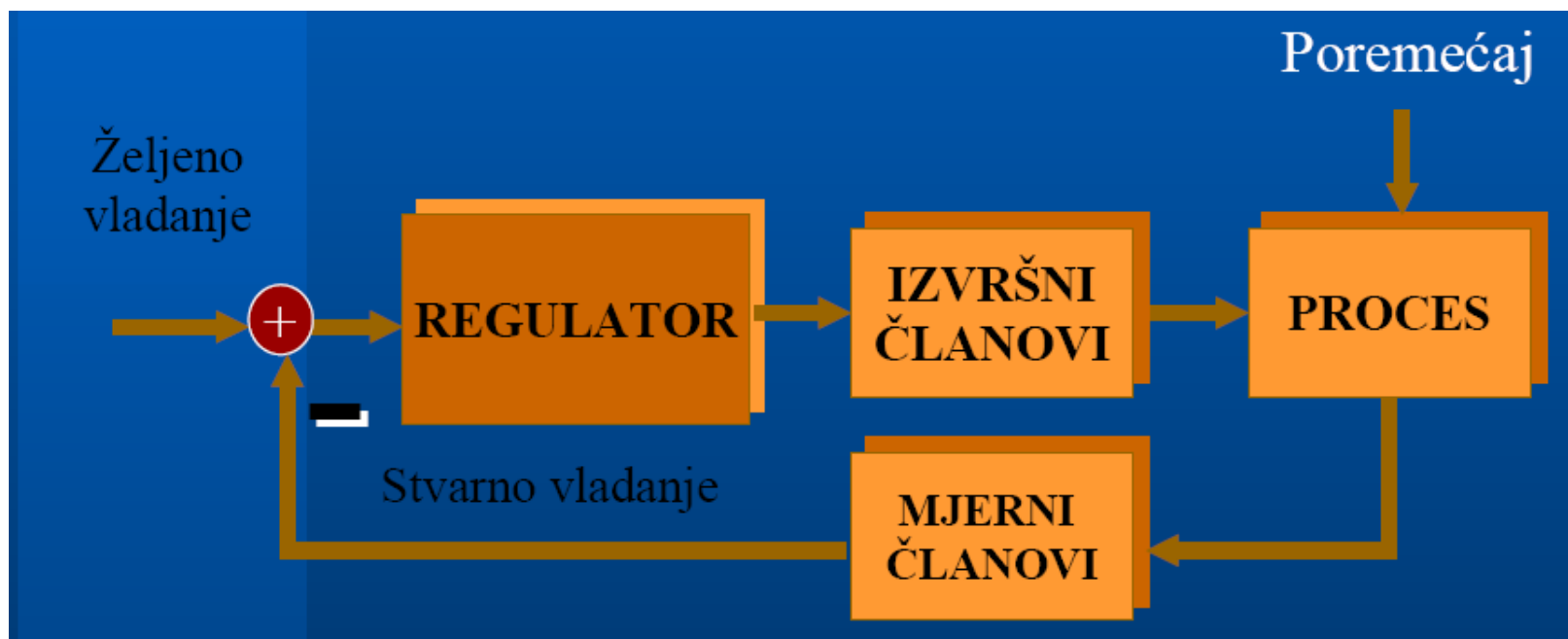


# **REGULATOR – UPRAVLJAČKI ALGORITMI**

Peta tema

## SAU sadrži četiri osnovne komponente:

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



# Regulator

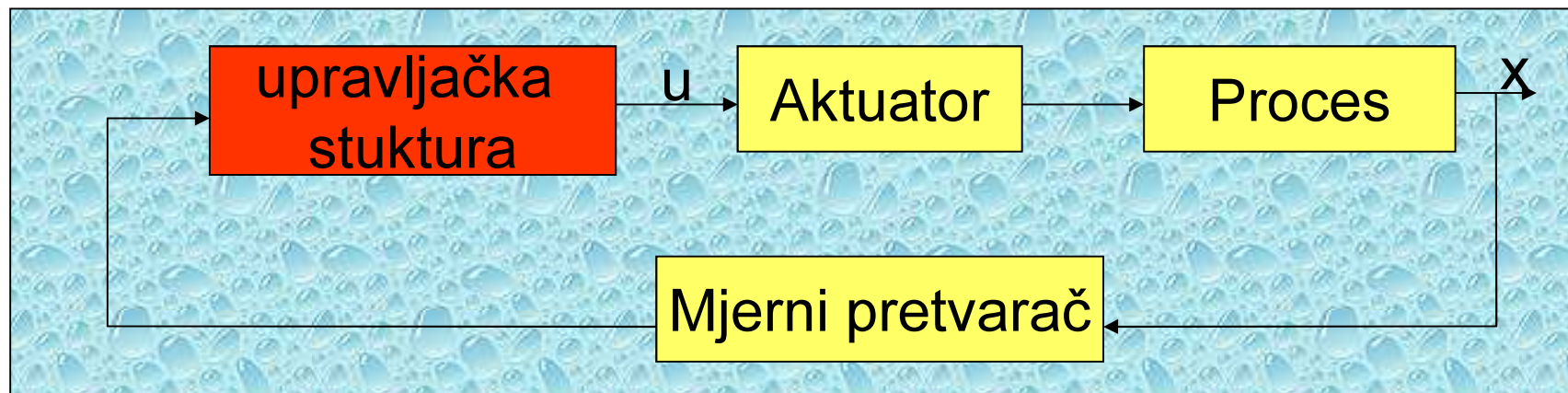
- Suštinska je uloga regulatora da obrađuje regulaciono odstupanje:

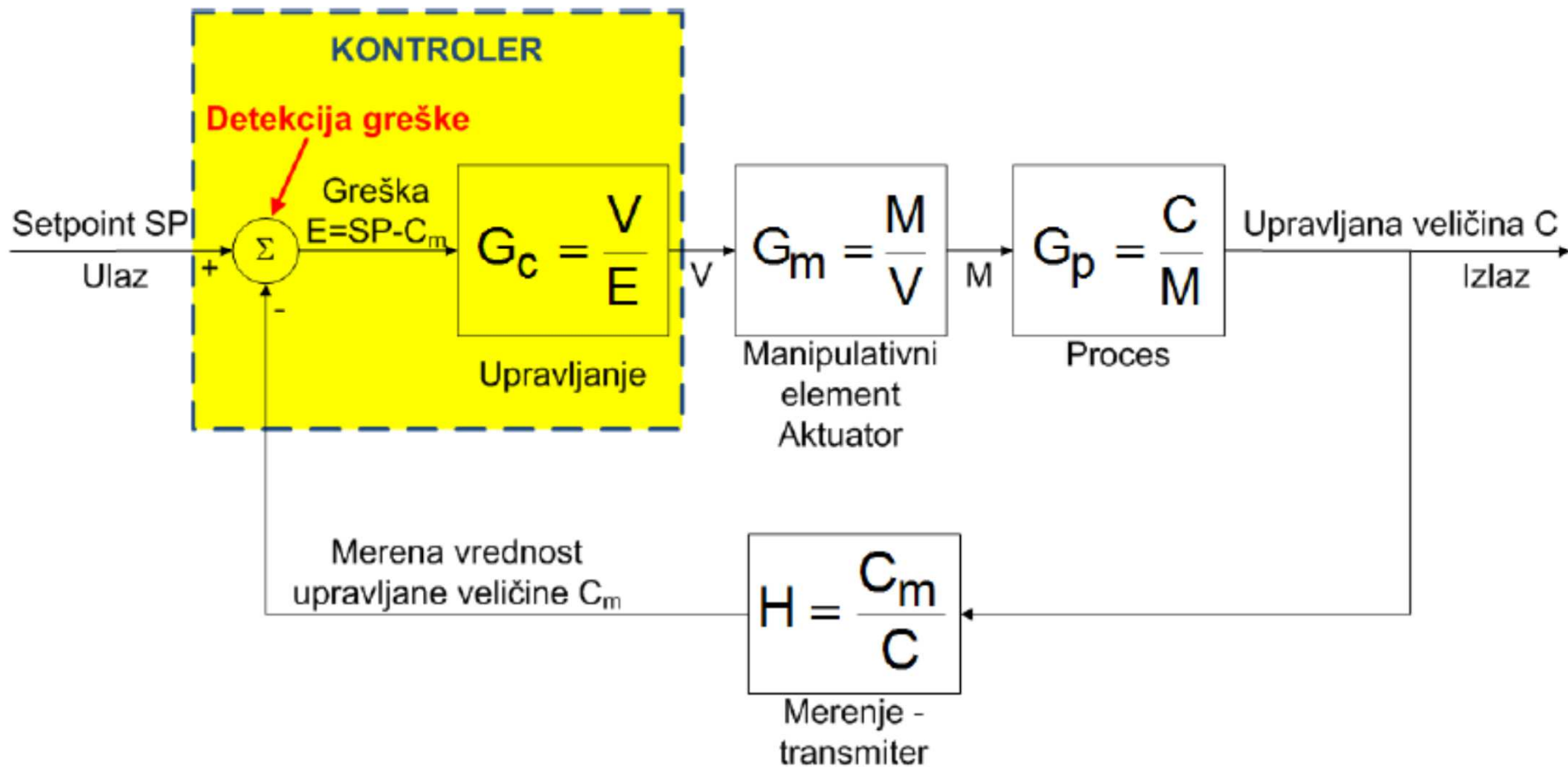
$$e(t) = r(t) - y(t)$$

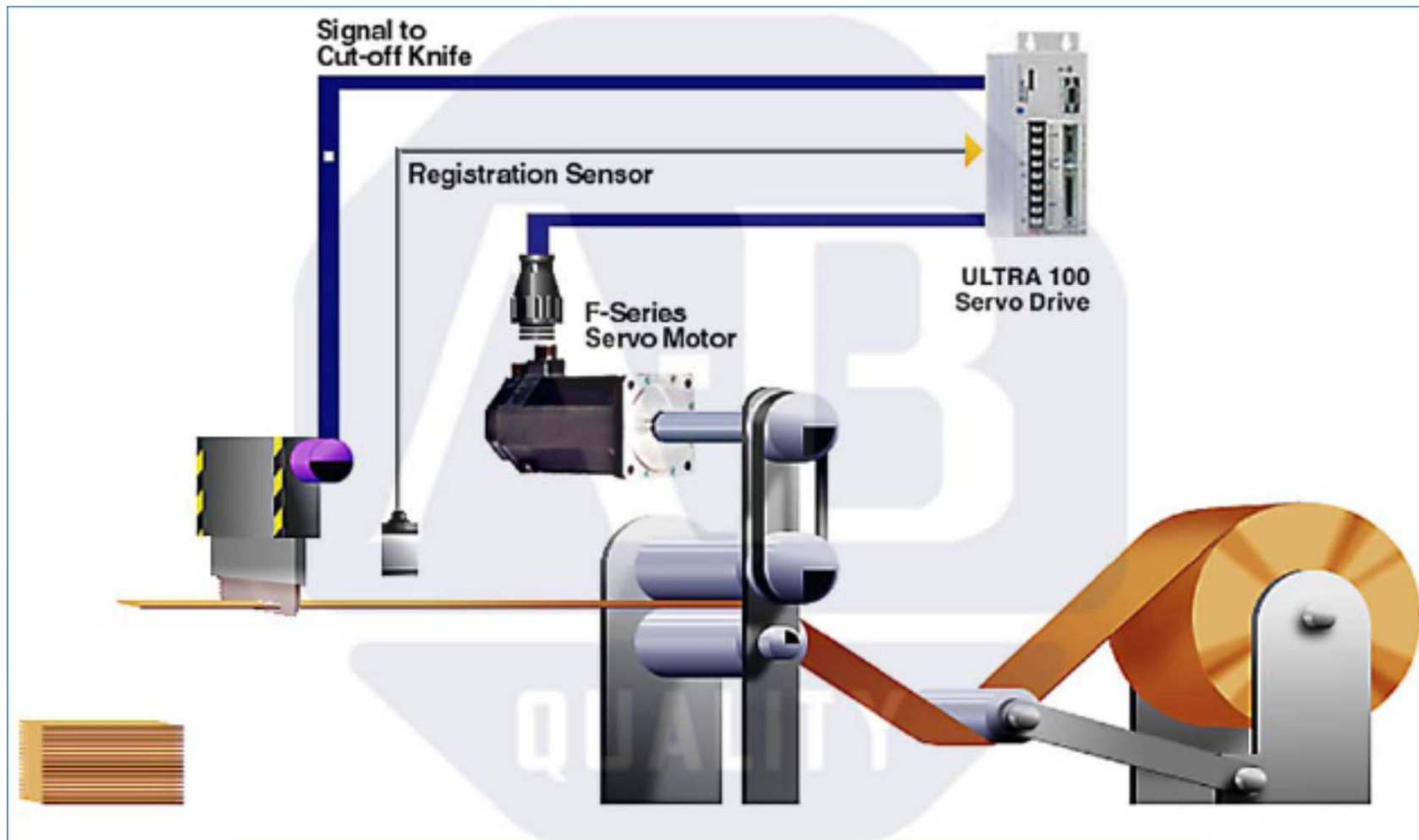
po određenom algoritmu (zakonu upravljanja):

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

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**
- **Obraduju sve relevantne informacije sa procesa i njegovog okruženja**
- **Predstavljaju “mozak” tehničkog sistema**
- **Koordiniraju senzore i aktuatore**

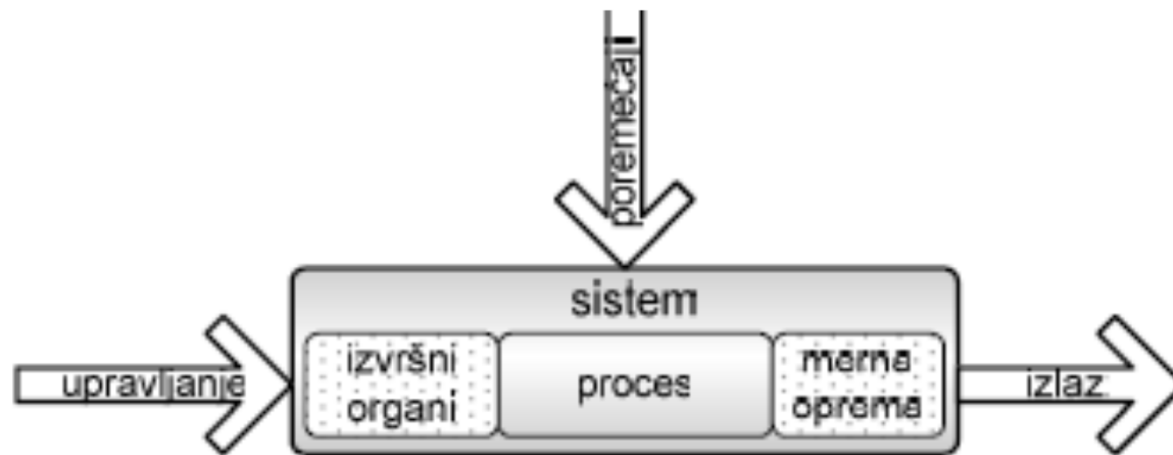


Gledano potpuno opšte u svakom procesu postoji neki *ulaz u proces* (informacija, materijal, signal) koji se mijenja unutar njega i napušta ga u izmijenjenoj formi (*izlaz procesa*).

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 podesi 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 eksperimenta.

**šaržni procesi (*batch*)** - karakterisani *vremenom pripreme (neproduktivno vrijeme) i vremenom obrade (operacije)*- proizvodnja pojedinačnih proizvoda kroz niz utvrđenih operacija. Tipični primeri 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

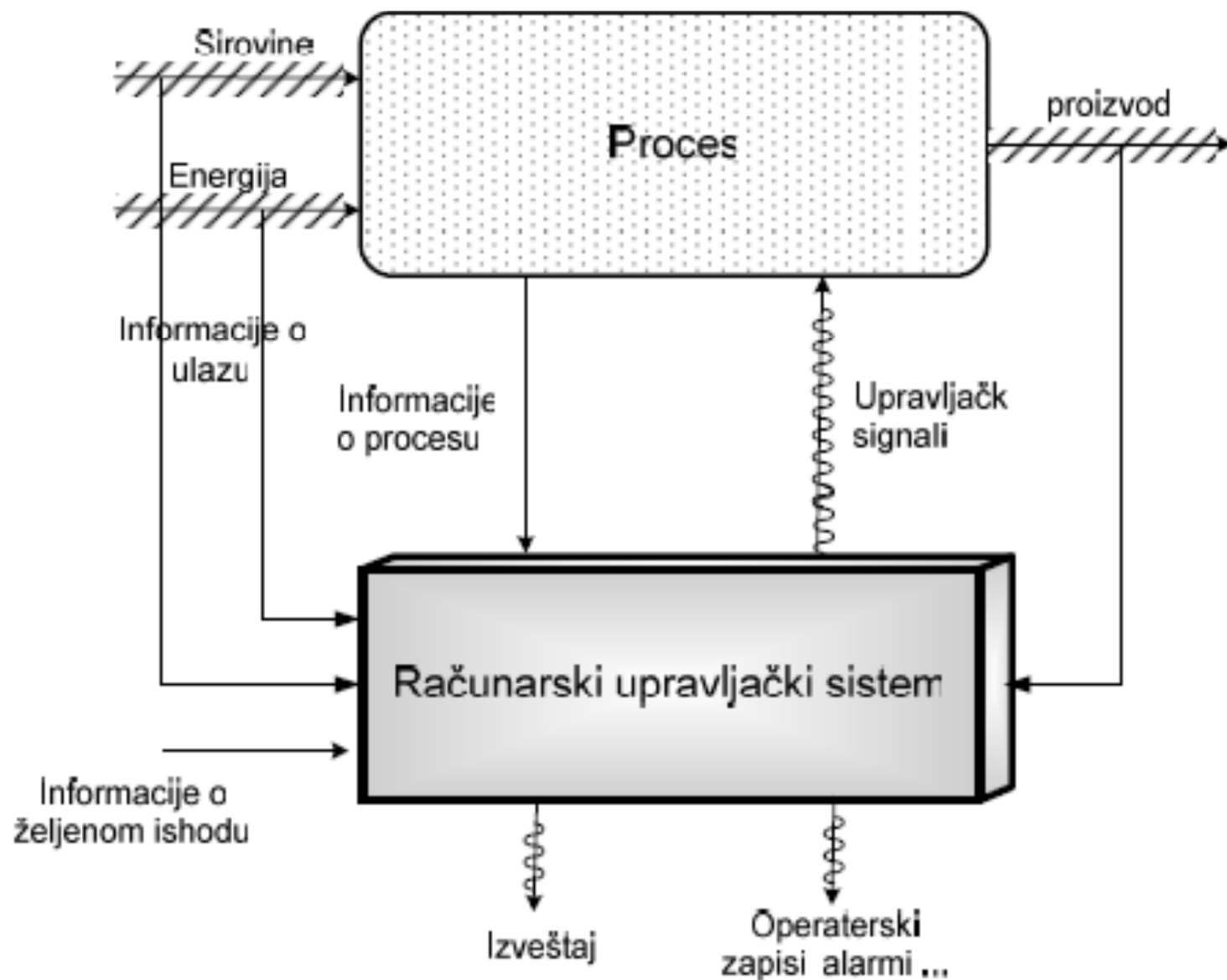
**Kontinualni procesi** - procesi kod kojih se proizvodnja održava tokom dužeg vremenskog perioda (nekoliko mjeseci ili godina).

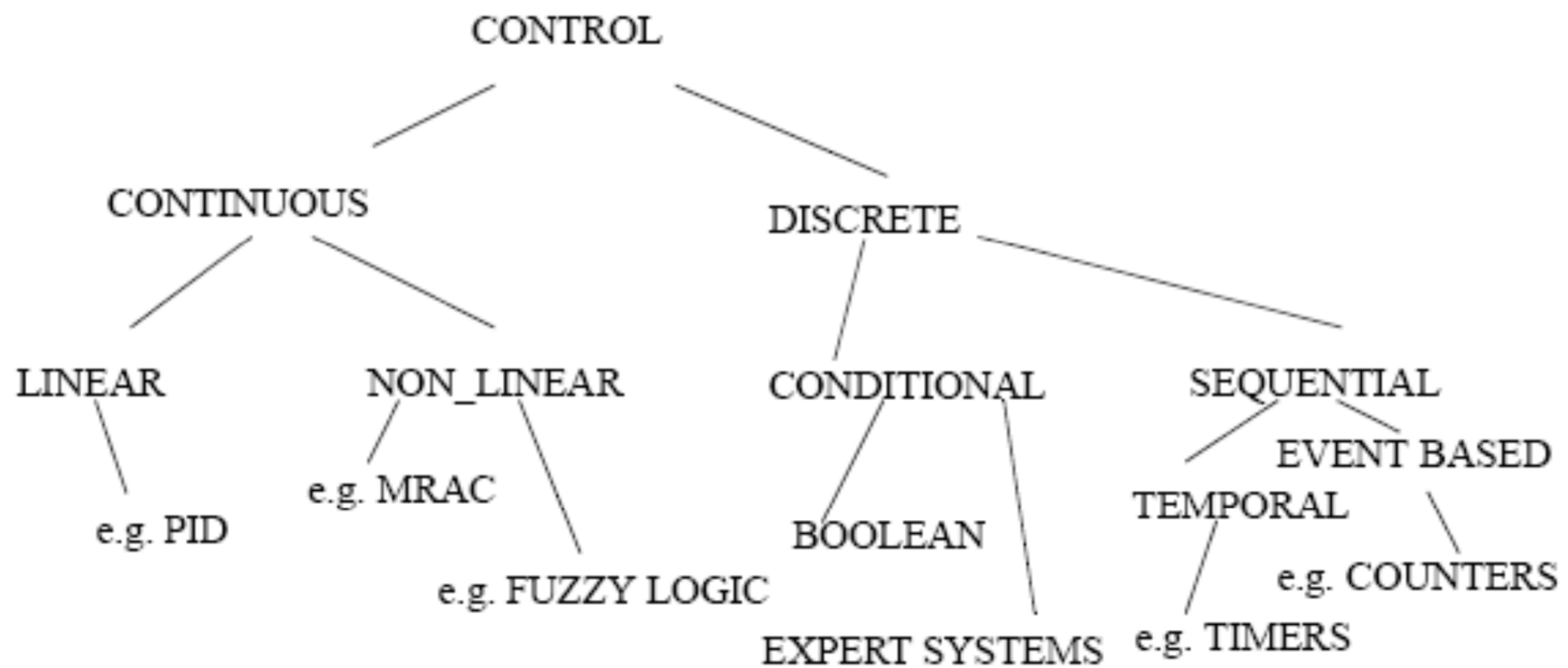
Tipičan primjer ovih procesa je proces prerade nafte u okviru koga se dobijaju različiti derivati. U toku proizvodnje moguće je mijenjanje odnosa pojedinih derivata ali to se postiže bez zaustavljanja samog procesa.

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



# RAČUNARSKI UPRAVLJAN PROCES





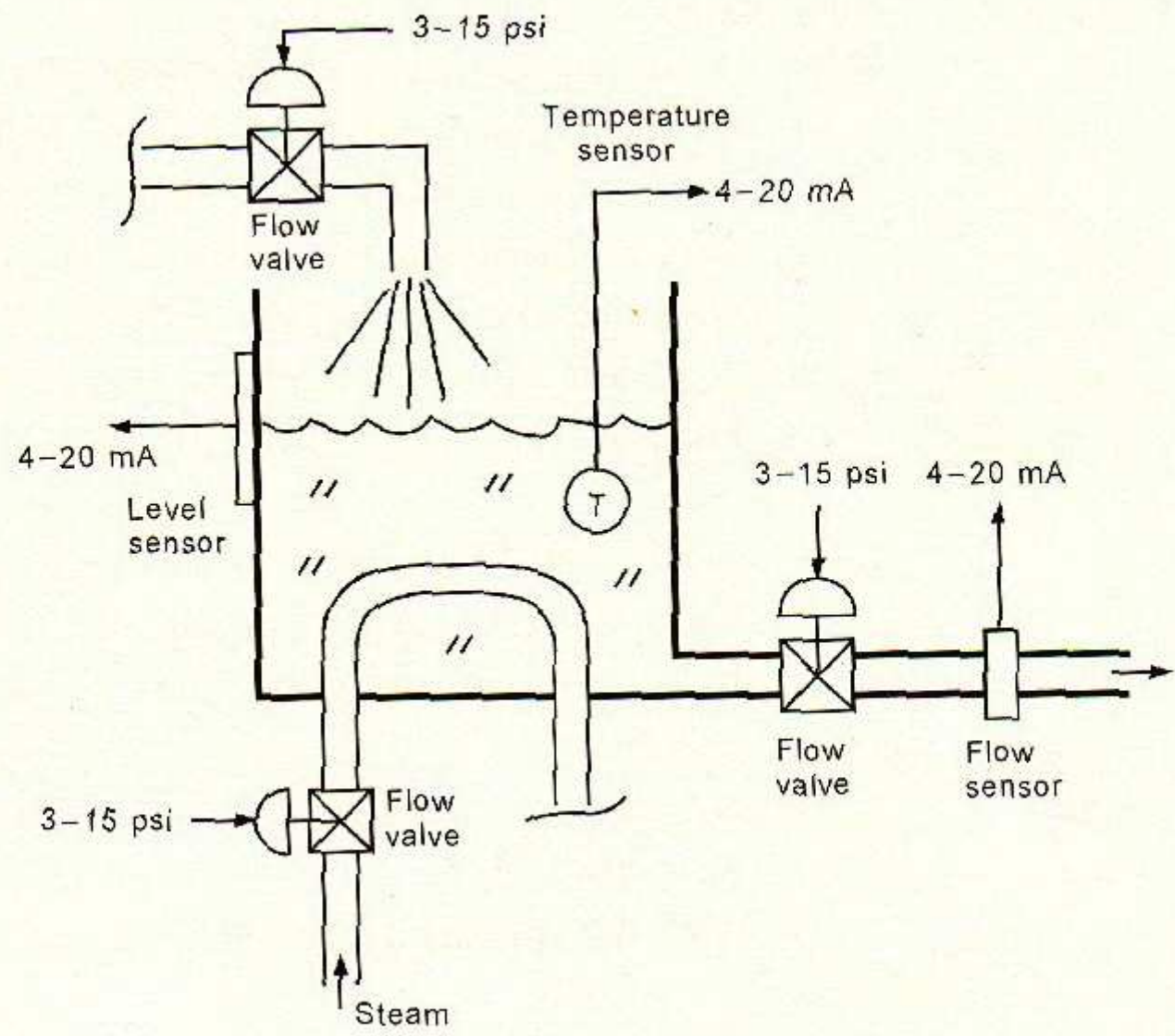
# Šeme sistema automatskog upravljanja

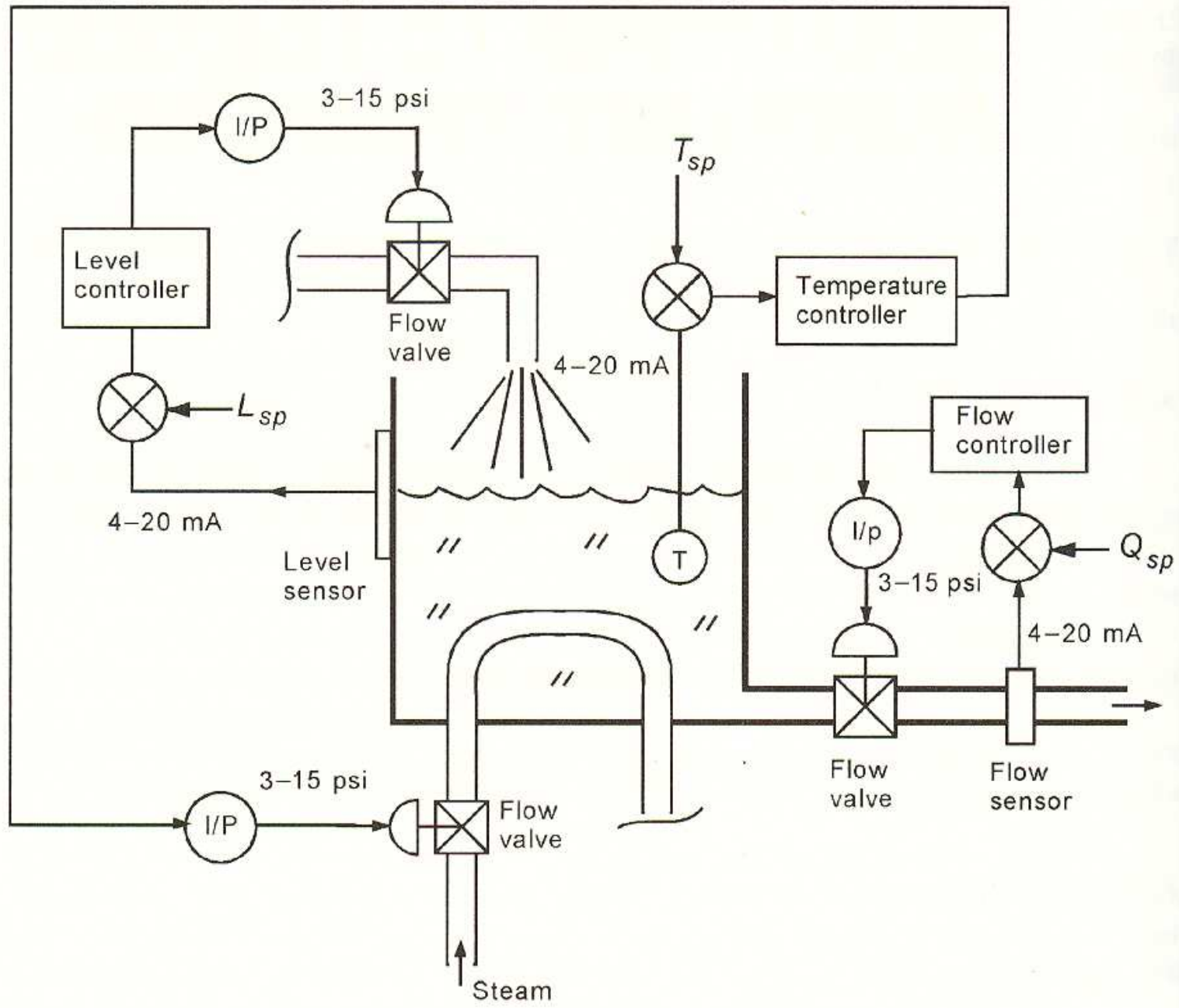
*The Instrument Society of America* je pripremila standard, “*Instrumentation Symbols and Identification*”, ANSI/ISA-S5.1-1984, kako bi “ustanovili uniforman način predstavljanja instrumenata i sistema koji se koriste za mjerenje i upravljanje”.

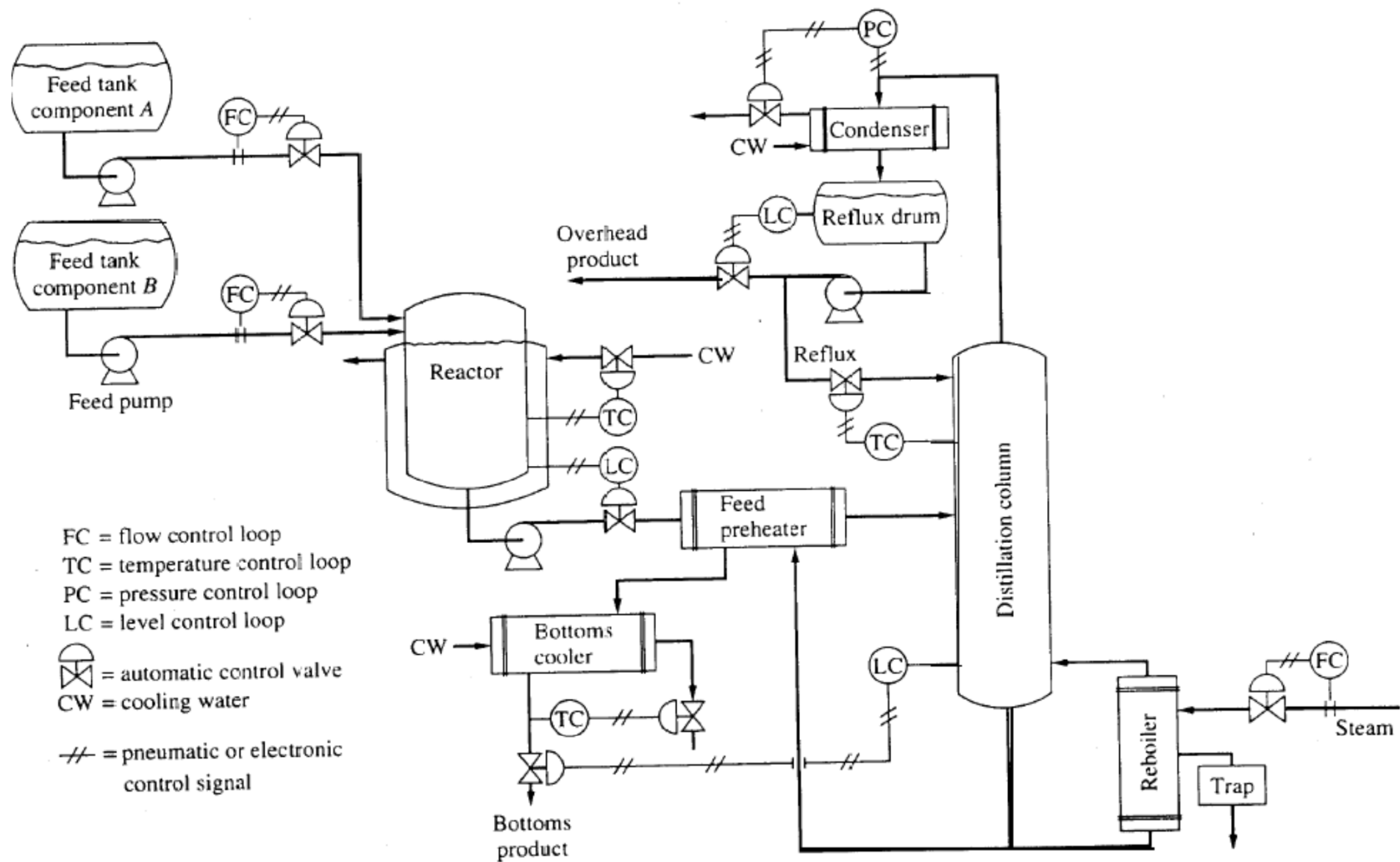
Ovaj standard predstavlja sistem simbola i identifikacionih kodova koji su “pogodni za korišćenje kada god je potrebna referenca za neki instrument”.

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.







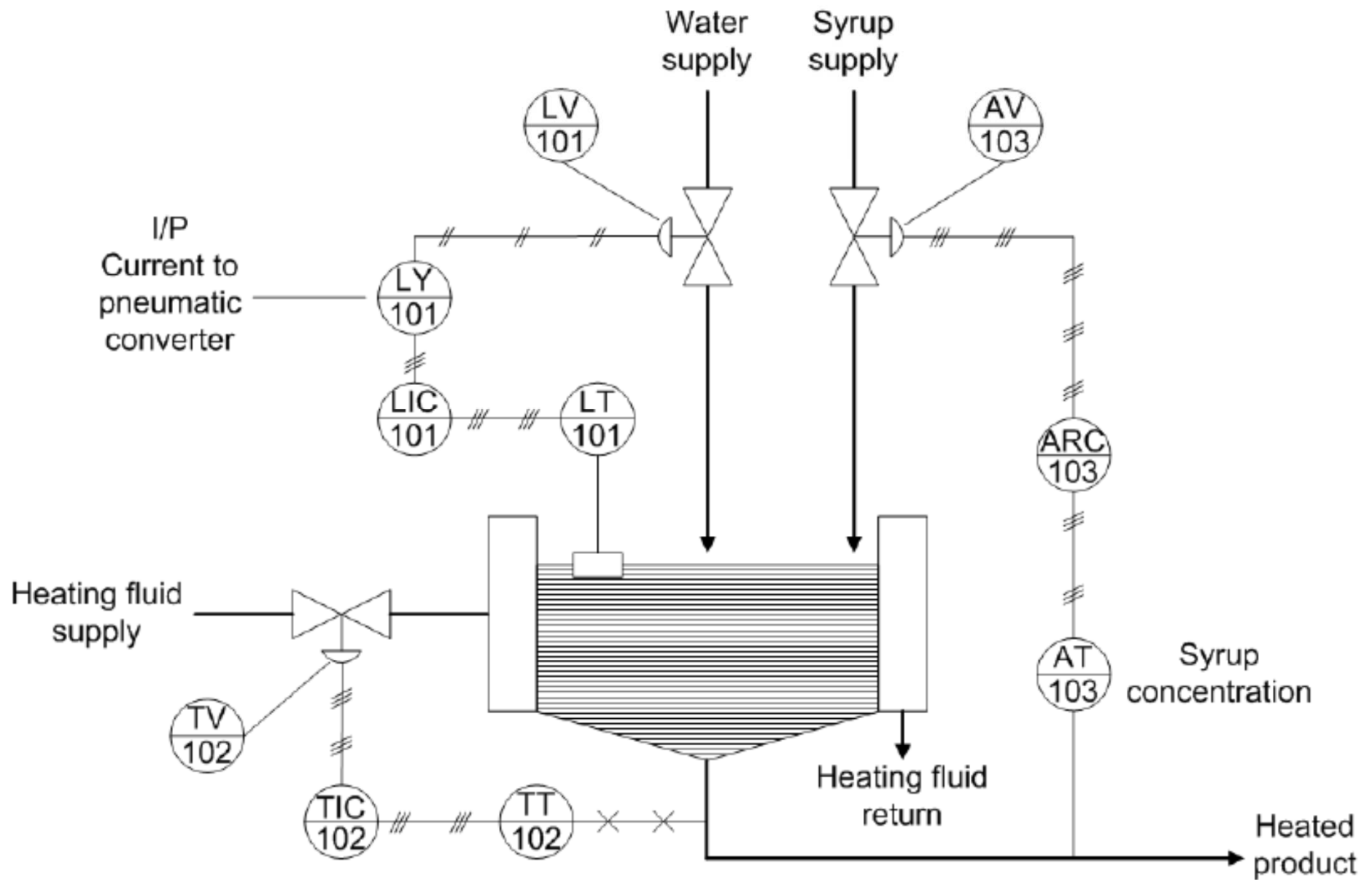
**FIGURE 1.5**

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, aktuatore, primarne elemente,...




# P&I diagrami – primer





# 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)

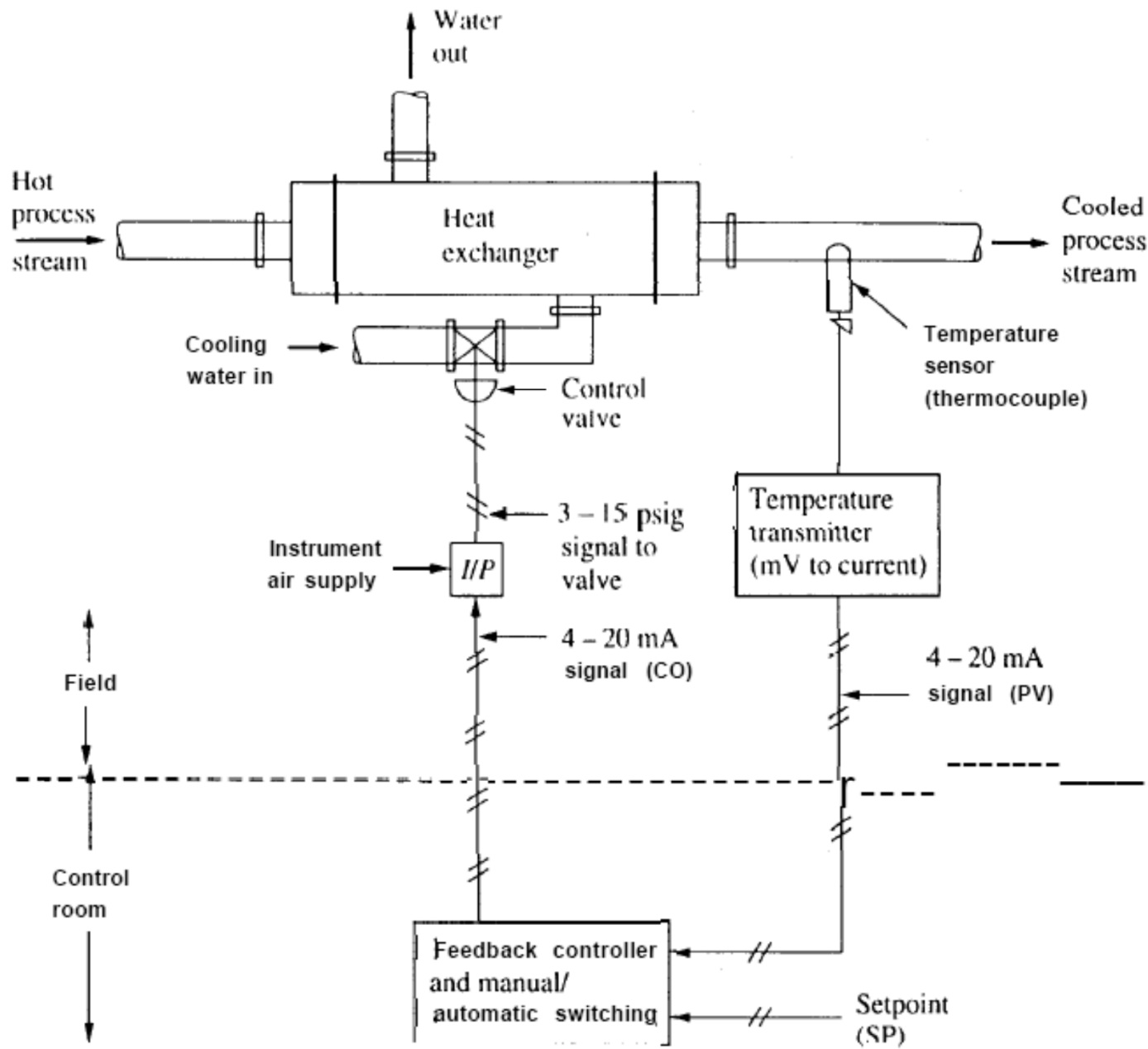
T – senzor (transmitter)

V – ventil (valve)

Y – relej (relay)

- **Opis elemenata na prethodnom primjeru**

LT-101	Level Transmitter –Odredjuje 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 – odredjuje temperaturu i pretvara je u elektročnu 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.

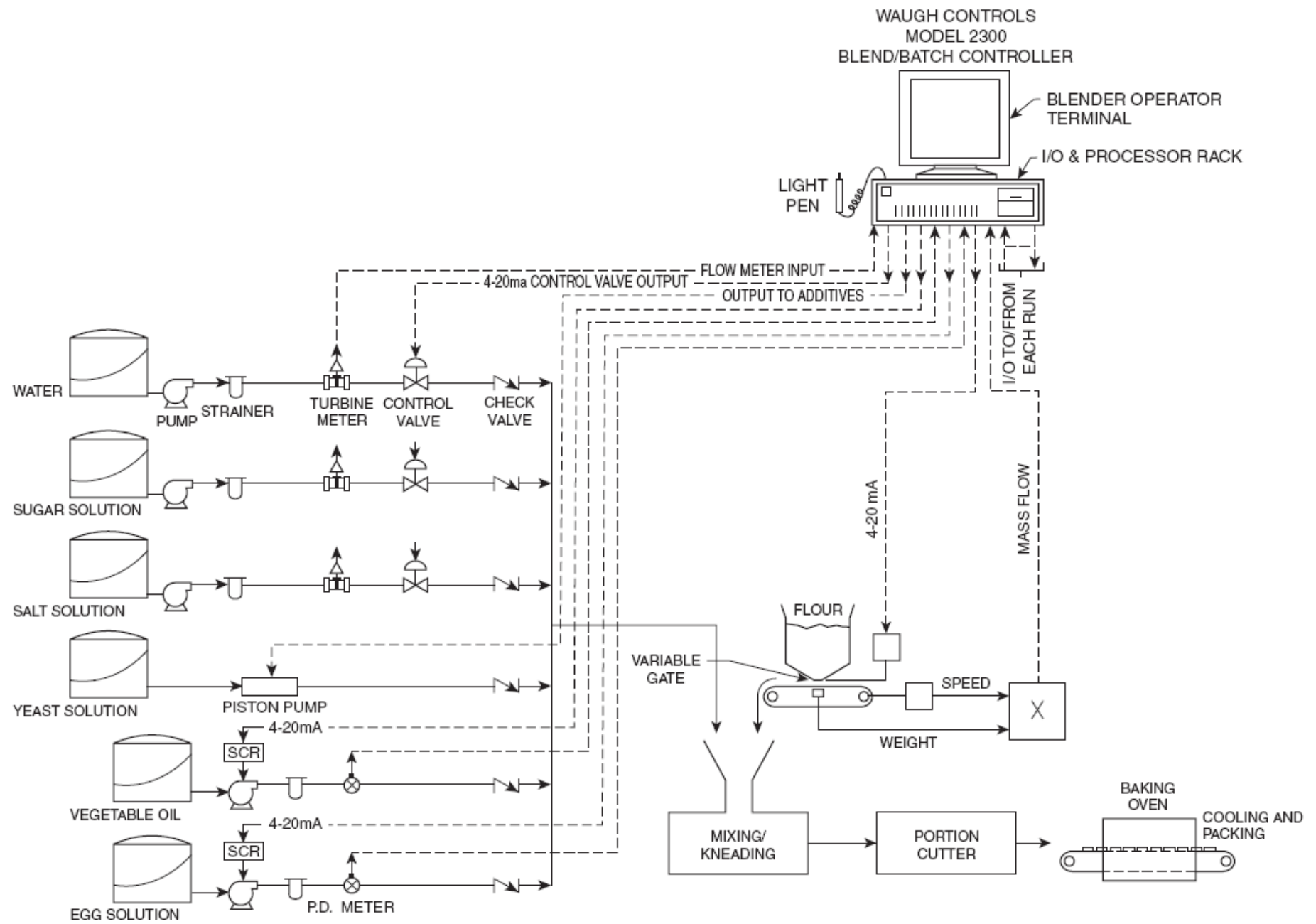
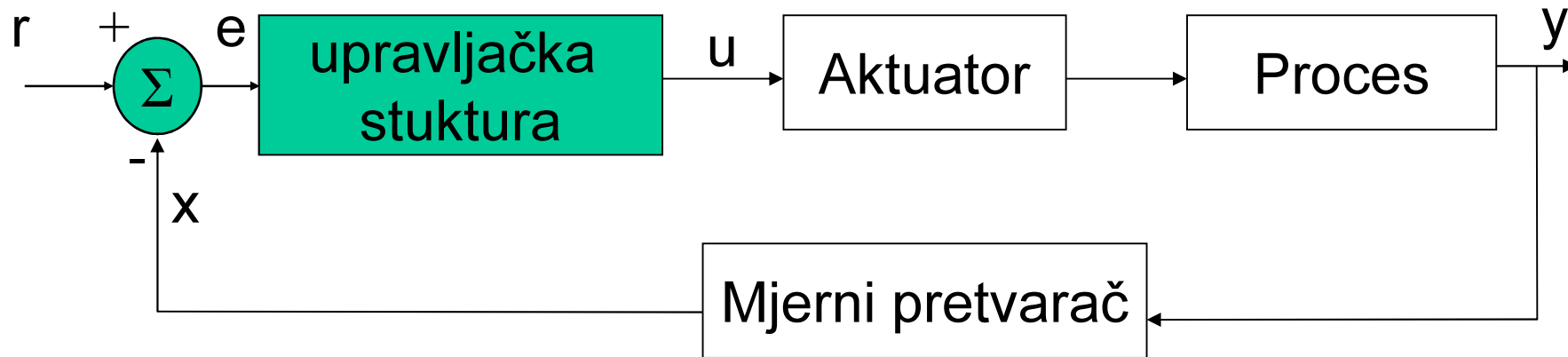


FIGURE 2 Blending system for preparing bread and pastry dough. (Controls Corporation.)

# Klasifikacija algoritama upravljanja



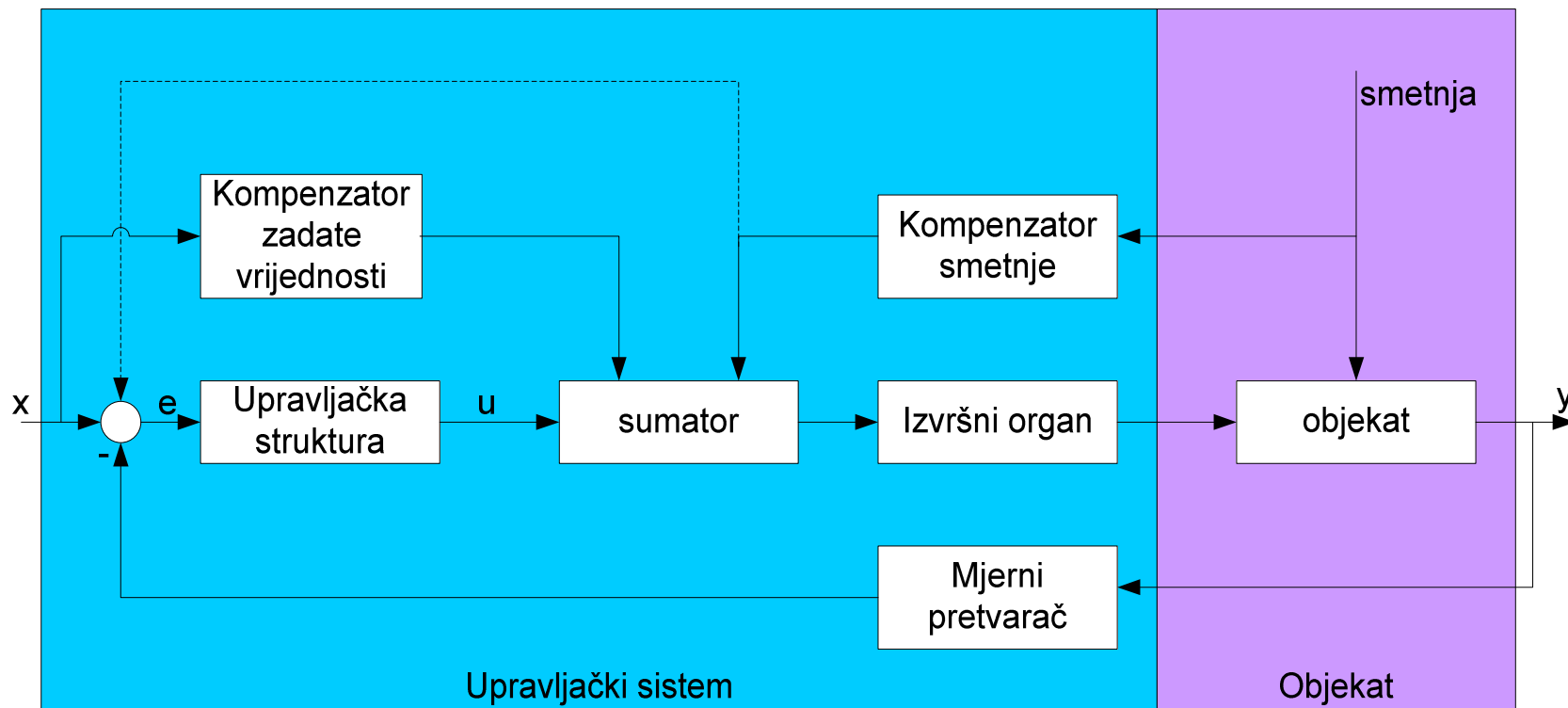
Postoje razni kriterijumi za klasifikaciju algoritama upravljanja.

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.

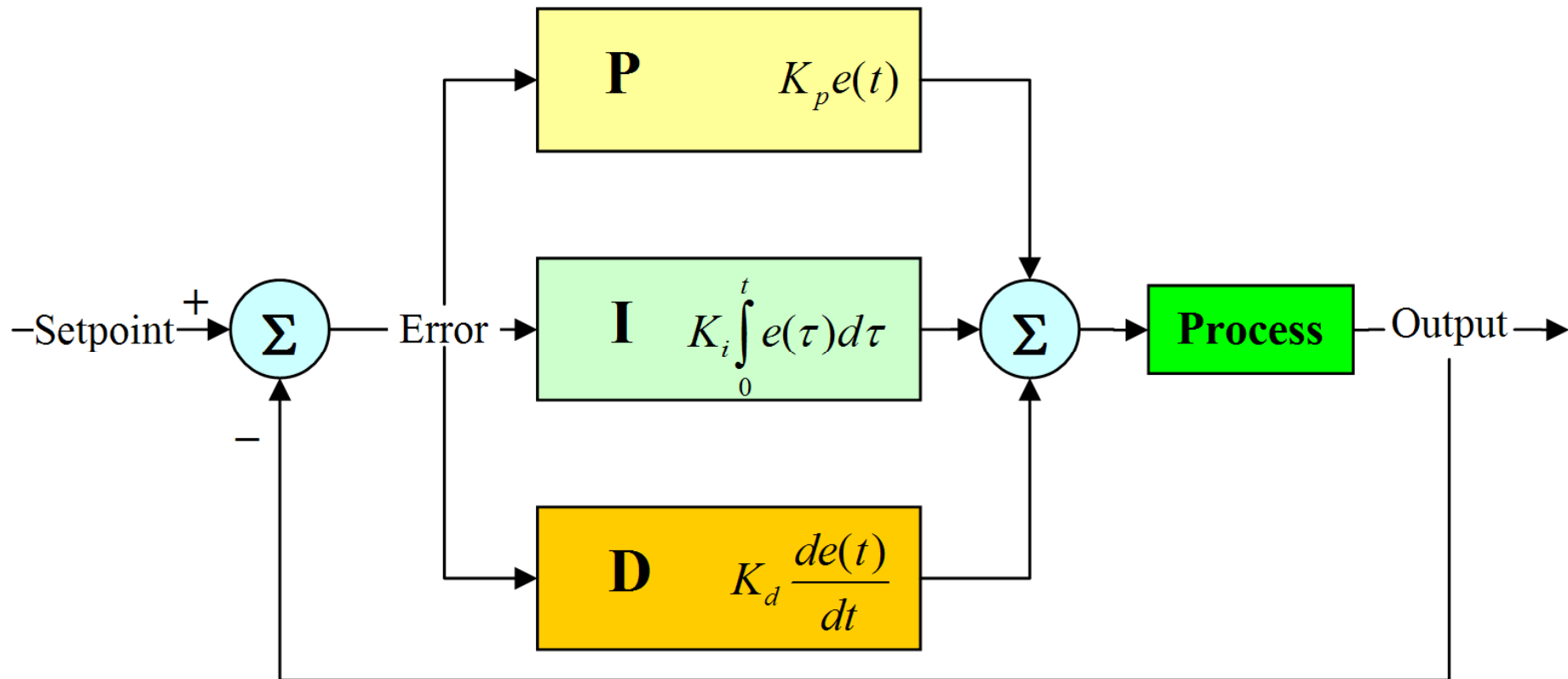
# Analogni algoritmi upravljanja

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  $u=f(e)$



Ако је зависност  $u=f(e)$  линеарна диференцијална једначина, онда се и закон регулисања назива линеарним. Закон регулисања је континуалан ако континуалној промјени улазне величине  $\varepsilon$  одговара континуална промјена регулишуће величине  $u$ .

У регулаторима серијске производње обично се реализују пет линеарних континуалних закона регулисања: пропорционални (P), интегрални (I), пропорционално-интегрални (PI), пропорционално-диференцијални (PD) и пропорционално-интегрално-диференцијални (PID). Регулатори се називају P, I, PI, PD, PID – регулатори. Исти закони регулисања примјењују се и при непосредном дигиталном управљању помоћу рачунара. У том случају рачунар израчунава управљачку величину према одговарајућем алгоритму, користећи податке о стварној вриједности одступања  $\varepsilon$ .





# 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

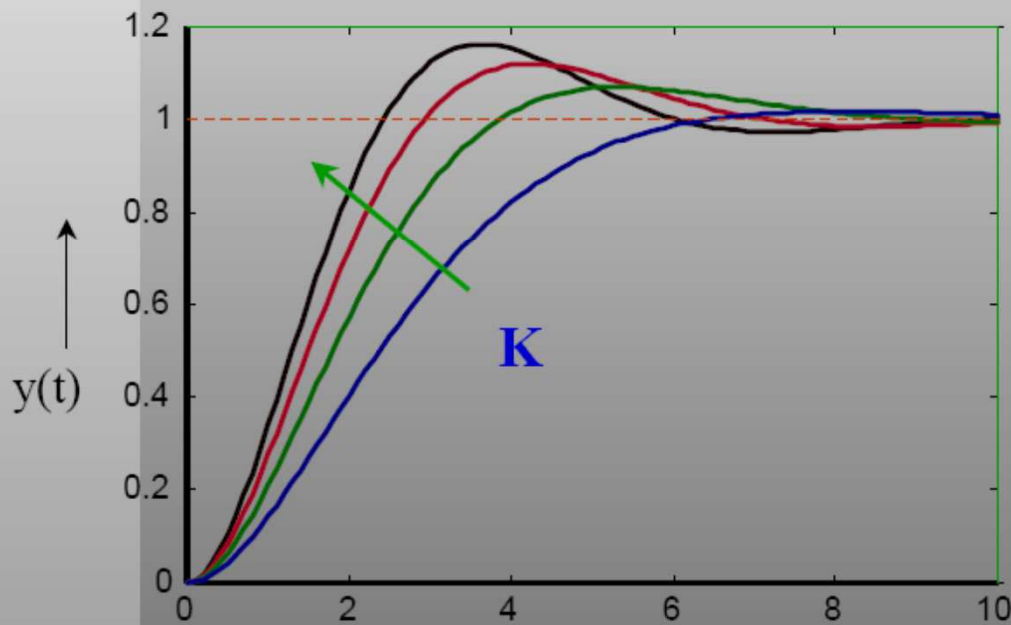
$$P_p = \frac{1}{K_p} \cdot 100\%$$

i naziva se proporcionalno područje.

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

## Povratna veza

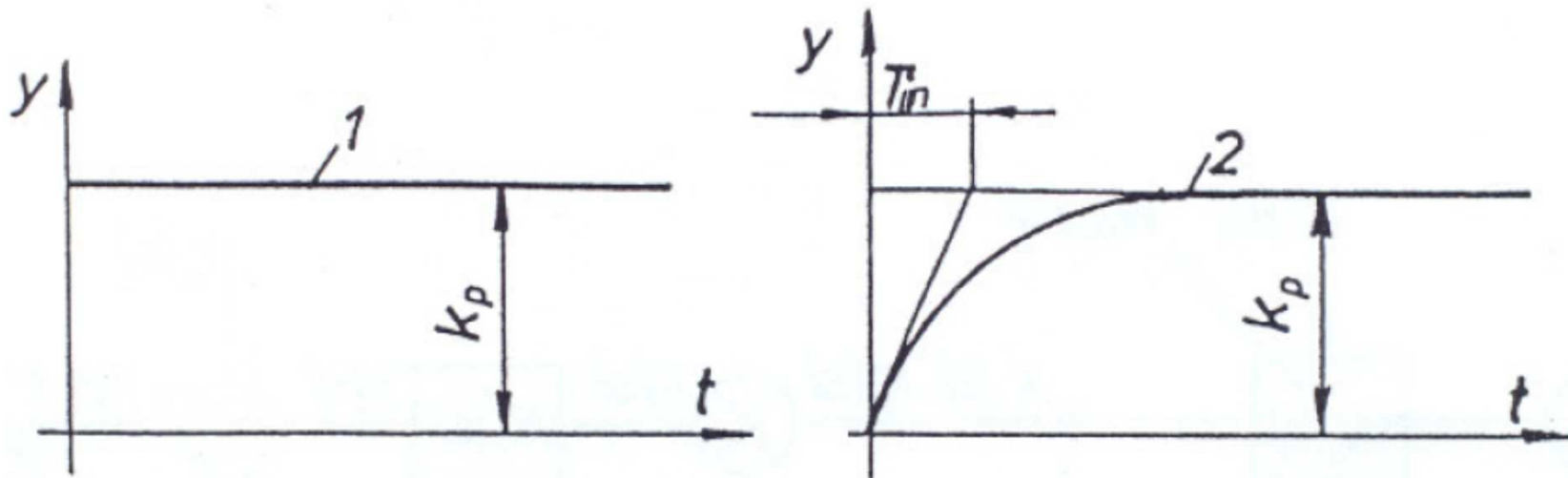
- Učinak promjena parametara → Smanjuje
- Učinak poremećaja → Smanjuje
- Odziv sustava → Poboljšava
- Točnost praćenja post. veličine → Povećava



Povećanje  
pojačanja  $K$



**NESTABILNOST**



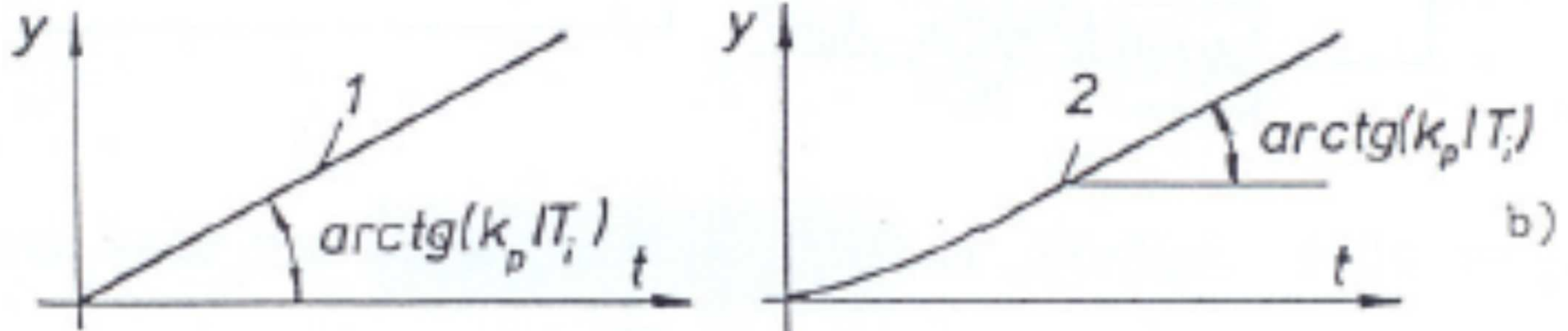
Prenosna funkcija (1) idealnog i (2) realnog P regulatora

**Интегрални регулатор.** Садржи само једну интегралну компоненту и зато је његове једначина:

$$u = K_I \int_0^t e dt = \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e dt$$

где је  $K_I$  фактор преноса интегралног регулатора,  $K_I = \frac{K_p}{T_i}$

$K_p$  фактор преноса  $P$  регулатора,  $T_i$  временска константа интеграљења



Prenosna funkcija (1) idealnog i (2) realnog **!** regulatora

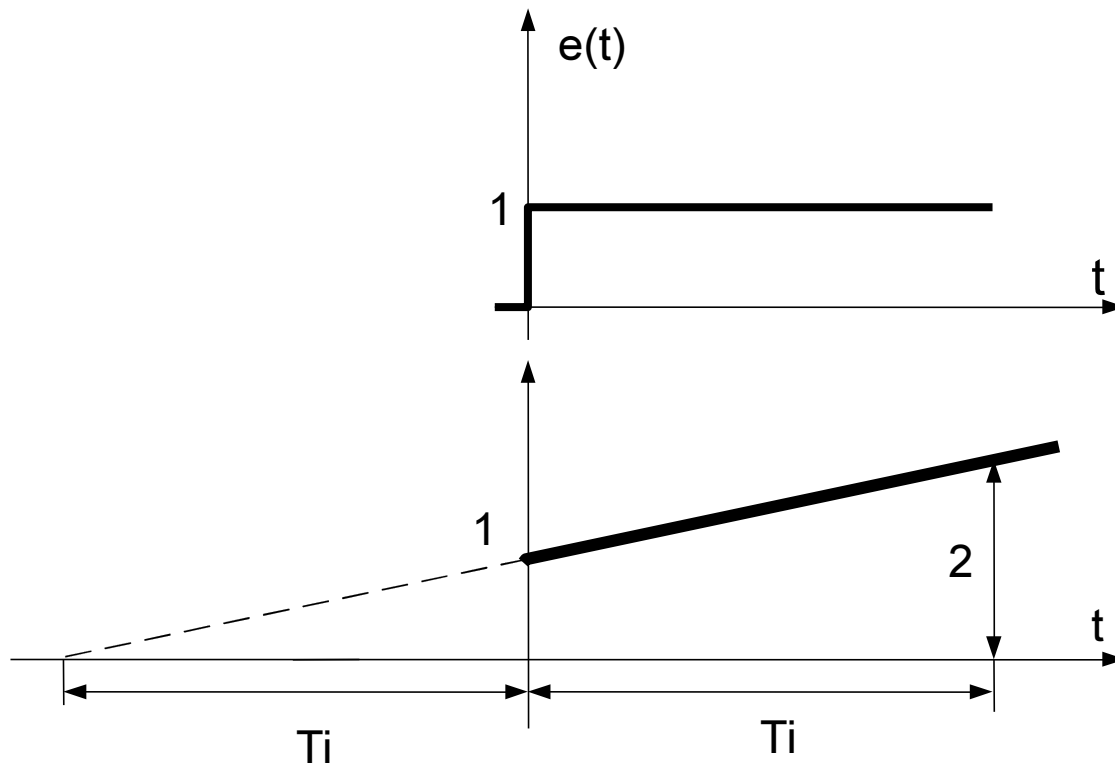
## 2. Proporcionalno integralni zakon upravljanja

$$u = K_P \left( e + K_I \int_0^t e dt \right) \quad \text{PI - regulator}$$

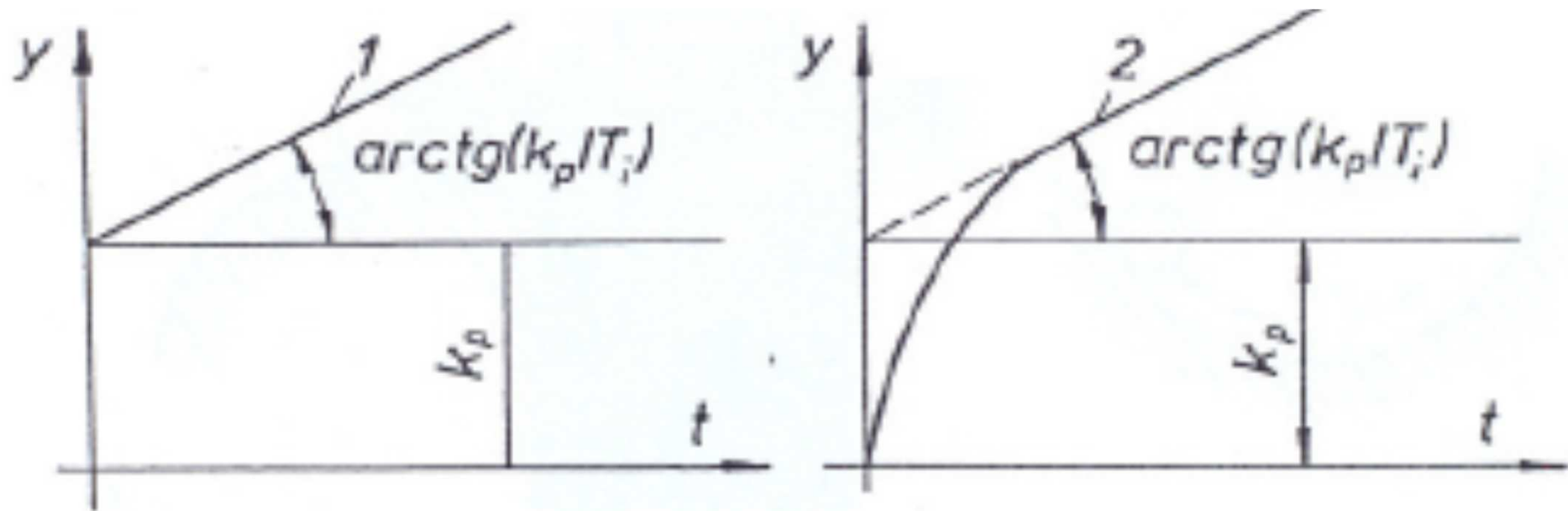
$$G_R(s) = K_P \left[ 1 + \frac{1}{K_p / K_i} \frac{1}{s} \right] = K_P \left[ 1 + \frac{1}{T_I s} \right]$$

integralno vrijeme PI regulatora

odziv PI regulatora na jedinični step  $K_p=1$  omogućava grafičko određivanje  $T_i$



$K_p$  i  $T_i$  su stepeni slobode PI regulatora i služe za njegovo podešavanje prema dinamici objekta



Prenosna funkcija (1) idealnog i (2) realnog PI regulatora

## 2. Proporcionalno-integralni-diferencijalni zakon upravljanja

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

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



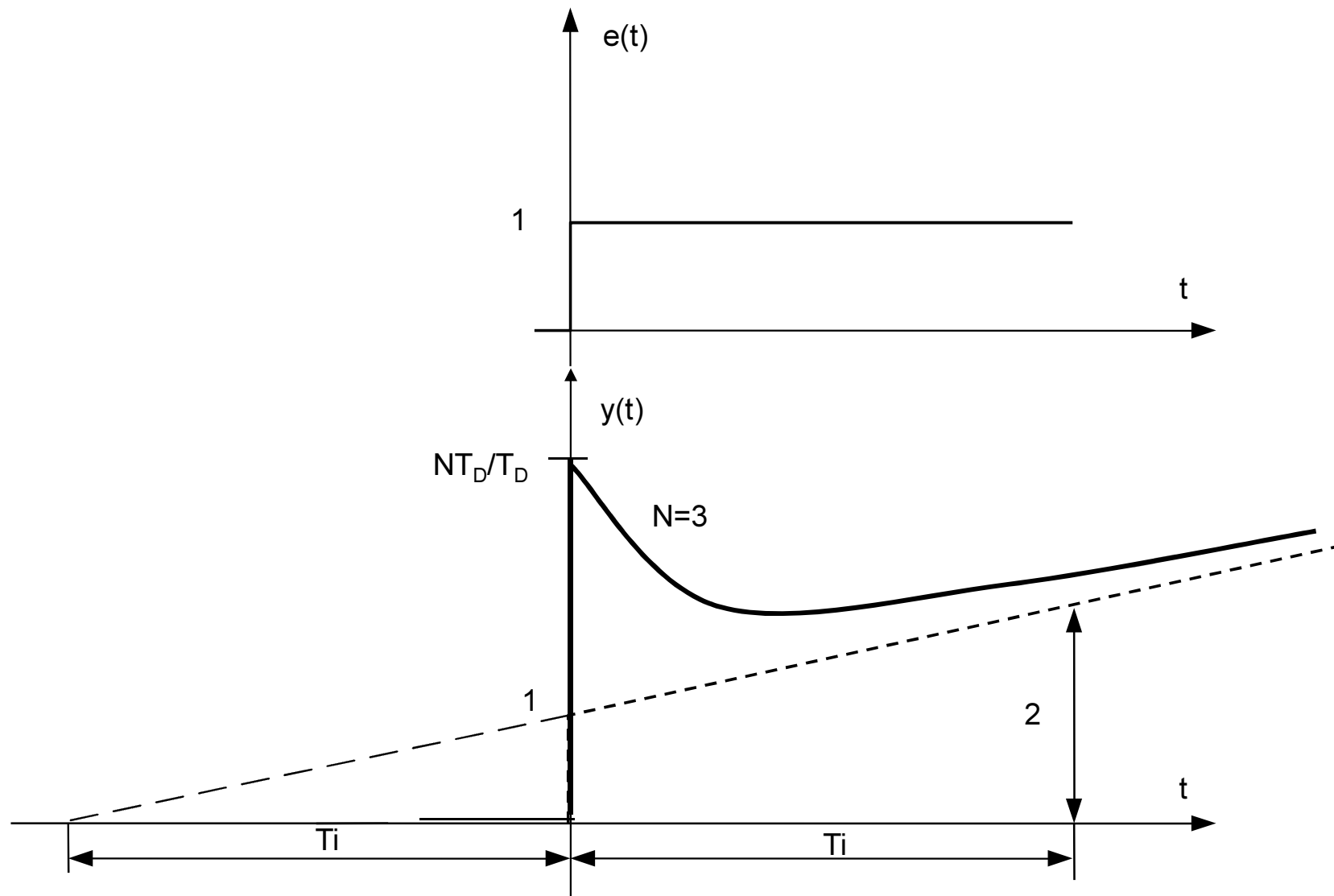
funkcija prenosa realnog PID regulatora:

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

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

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

## odziv PID regulatora na jedinični step $K_p=1$



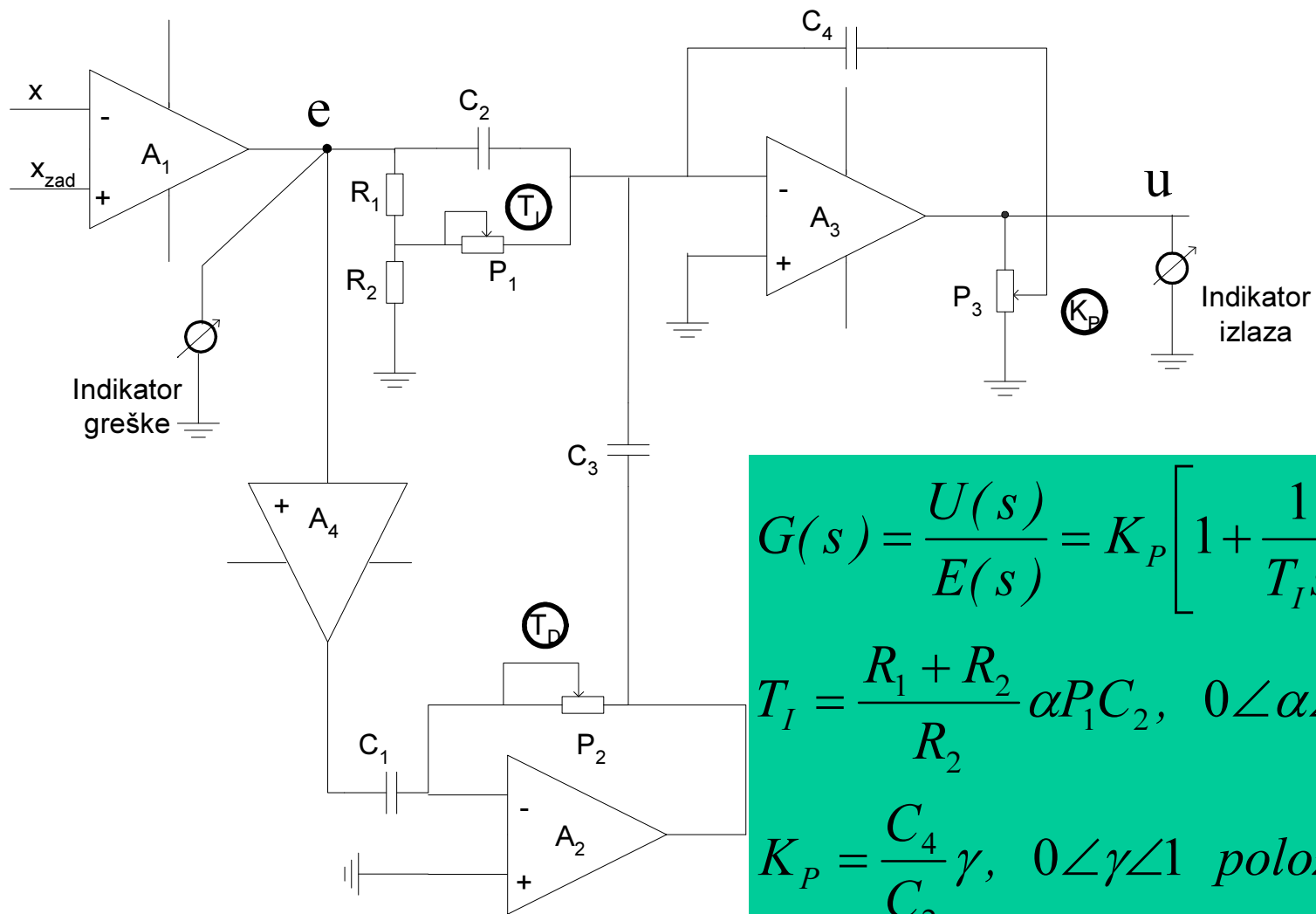
Opsezi parametara koji se susreću u tehničkoj praksi kod najpoznatijih proizvođača kreću se za:

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

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

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

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



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

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

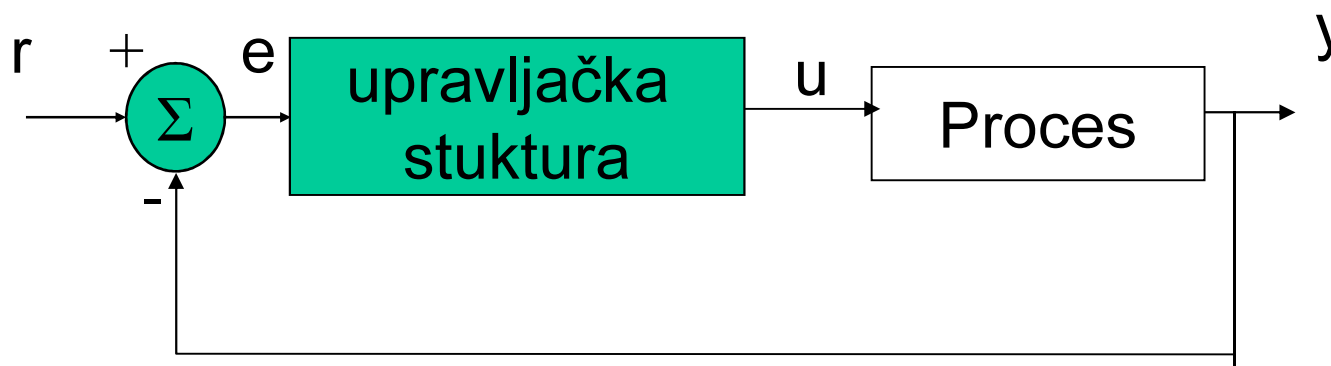
$$K_P = \frac{C_4}{C_2} \gamma, \quad 0 < \gamma < 1 \text{ položaj } P_3$$

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

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

# Uvod u PID Control

U ovom uvodu prikazaćemo karakteristike proporcionalnog (P), integralnog(I) i diferencijalnog(D) upravljanja, i kako se koriste u cilju dobijanja željenog odziva. U ovom pregledu razmatraćemo sistem sa jediničnom povratnom spregom



Proces: Sistem je upravljiv

Kontroler (Upravljačka struktura): Obezbjeđuje ulaze (pobudu) procesu;  
Projektovan da kontoliše cjelokupno ponašanje sistema

- Prenosna funkcija PID kontrolera data je kao:

$$G_R(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s = \frac{K_D s^2 + K_P s + K_I}{s}$$

$K_P$  – proporcionalno pojačanje

$K_I$  – integralno pojačanje

$K_D$  – dif. pojačanje

Signal greške  $e(t)$  ulazi u kontroler, na čijem se izlazu formira signal upravljanja  $u(t)$

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

# Karakteristike P, I i D upravljanja

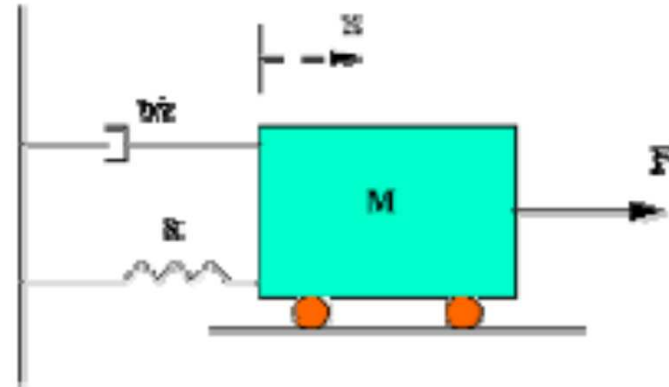
Efekat svakog od upravljanja  $K_p$ ,  $K_d$  i  $K_i$  u sistemu sa zatvorenom petljom sumarno je prikazan sledećom tabelom

CL RESPONSE	RISE TIME	OVERSHOOT	SETTLING TIME	S-S ERROR
$K_p$	Decrease	Increase	Small Change	Decrease
$K_i$	Decrease	Increase	Increase	Eliminate
$K_d$	Small Change	Decrease	Decrease	Small Change

Napomenimo da je posmatrano pojedinačno dejstvo svakog upravljanja. Realno promjena bilo koje od ovih varijabli utiče na efekat druge dvije.

# Primjer

- Razmatraćemo sistem koji smo naveli u dijelu modelovanja. Sistem se čini tijelo mase  $M$ , povezano oprugom i amortizerom za bočni zid na koji djeluje sila  $F$



$$M\ddot{x} + b\dot{x} + kx = F$$

$$Ms^2 X(s) + bsX(s) + kX(s) = F(s)$$

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{Ms^2 + bs + k} ,$$

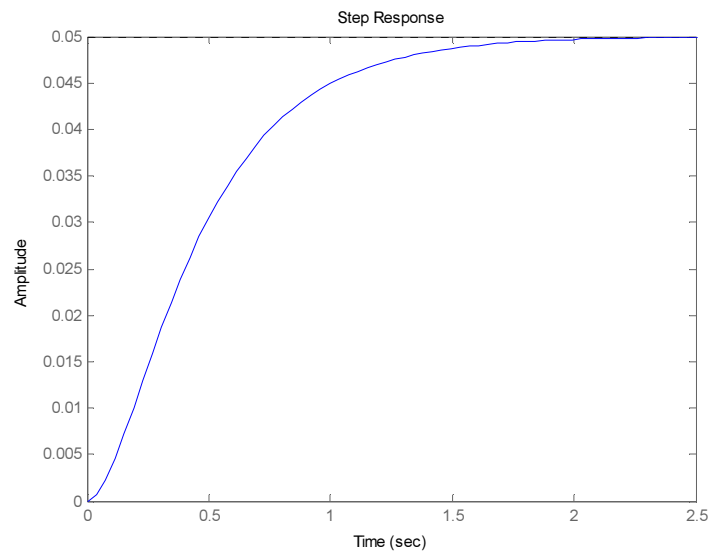
neka je  $M = 1\text{kg}$ ,  $b = 10\text{Ns/m}$ ,  $k = 20\text{N/m}$ ,  $F(s) = 1$



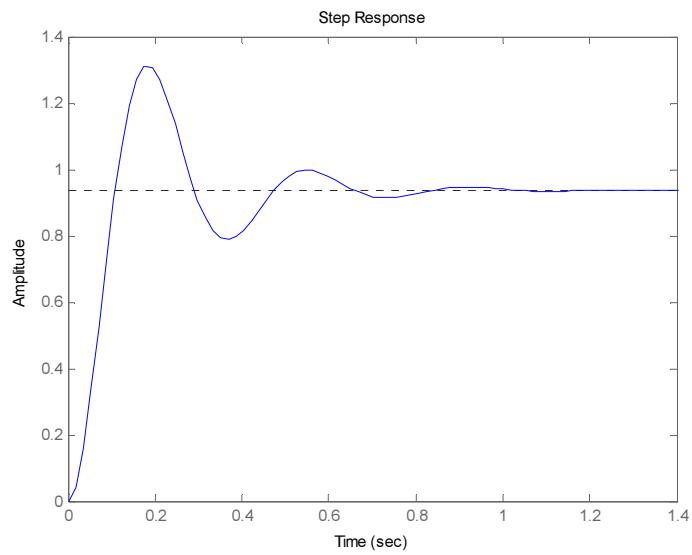
- Ako uvrstimo date vrijednosti u prenosnu funkciju objekat je opisan sledećom prenosnom funkcijom

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{s^2 + 10s + 20}$$

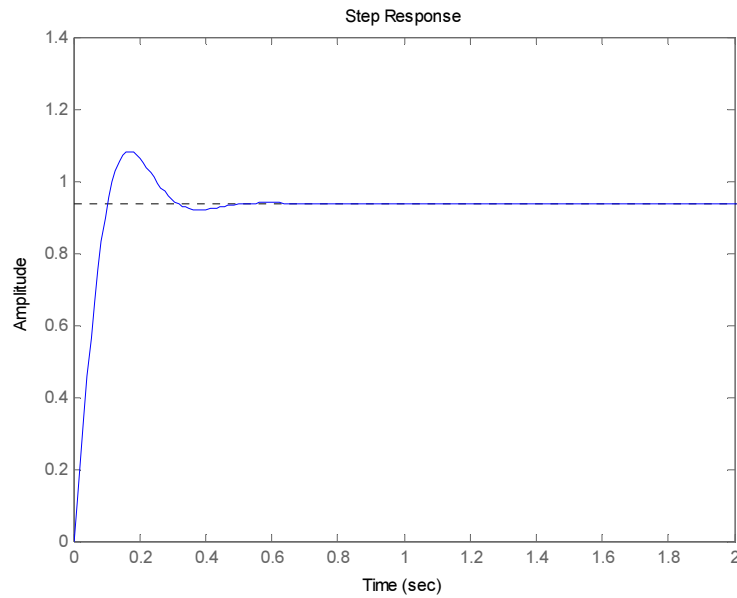
- Cilj nam je da na ovom problemu pokažemo kako svaki od parametara  $K_p$ ,  $K_i$  i  $K_d$  izabrati da dobijemo:
  - Što manje vrijeme uspona
  - Minimalni preskok
  - Eliminišemo grešku ustaljenog stanja



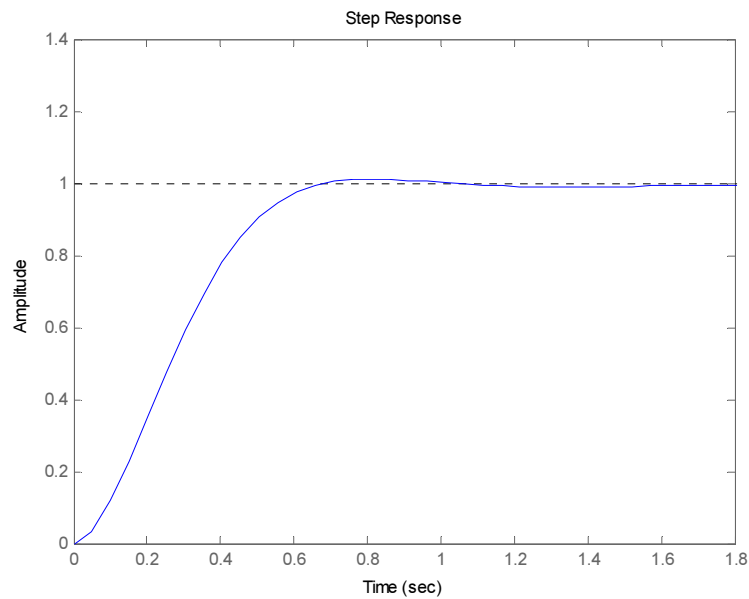
Odziv sistema na jediničnu pobudu u otvorenoj petlji



Odziv sistema na jediničnu pobudu u zatvorenoj petlji za  $K_p=300$

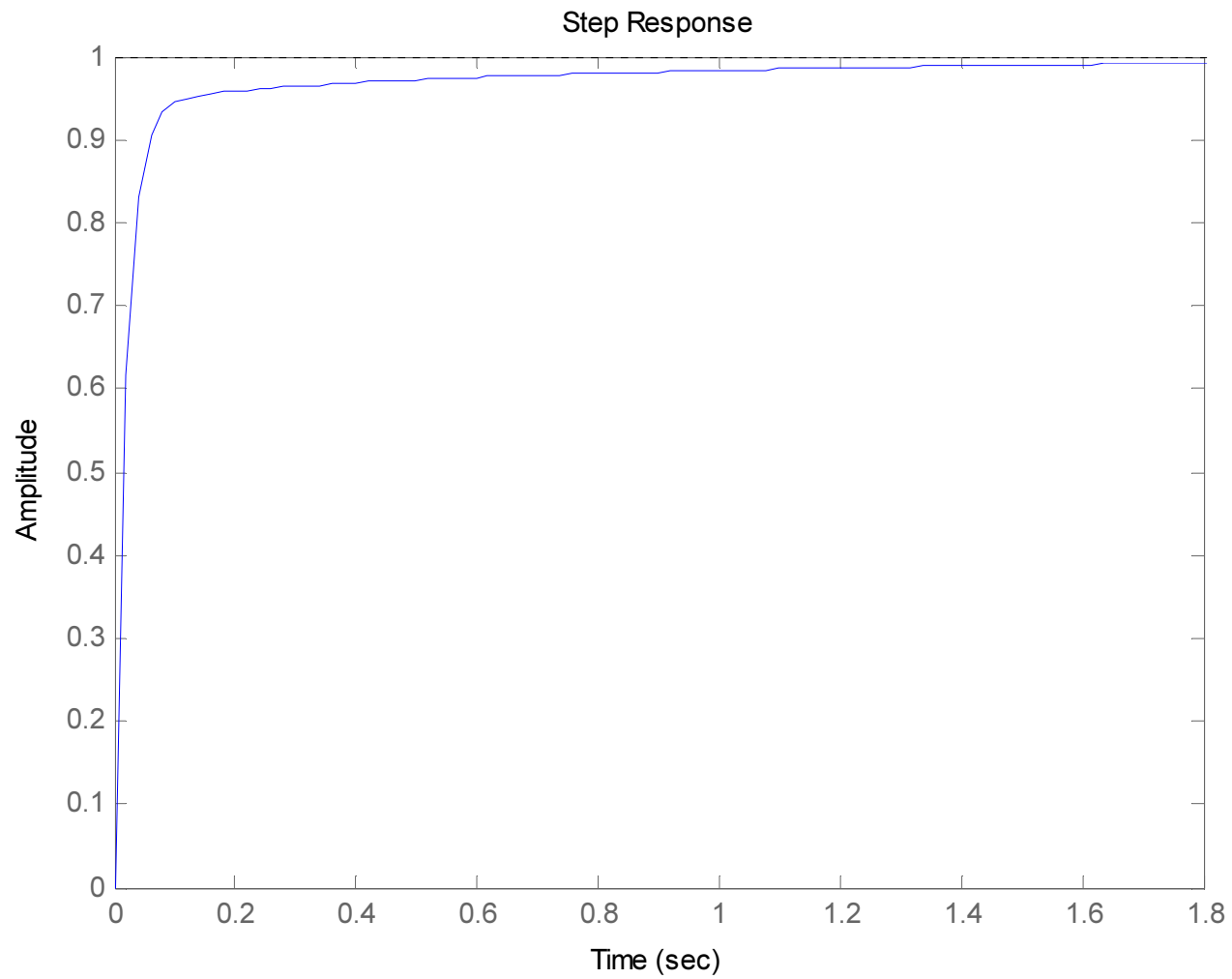


Odziv sistema na jediničnu pobudu u zatvorenoj petlji za  $K_p=300$  i  $K_d=10$



Odziv sistema na jediničnu pobudu u zatvorenoj petlji za  $K_p=30$  i  $K_i=70$

Odziv sistema na jediničnu pobudu u zatvorenoj petlji za  $K_p=350$  ,  
 $K_i=300$  i  $K_d=50$



## 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 histerezisa)

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 upravljan 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 peć.

Zakon upravljanja određen je sa

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

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

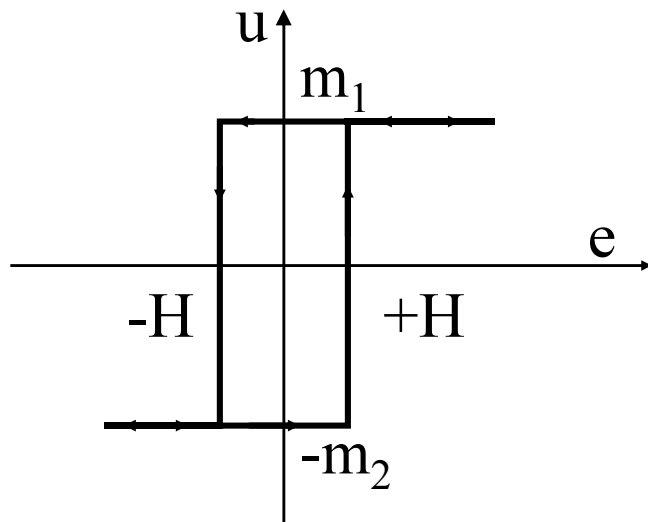
Druga prednost algoritma je da se može koristiti za upravljanje objekta sa nepoznatim parametrima.

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

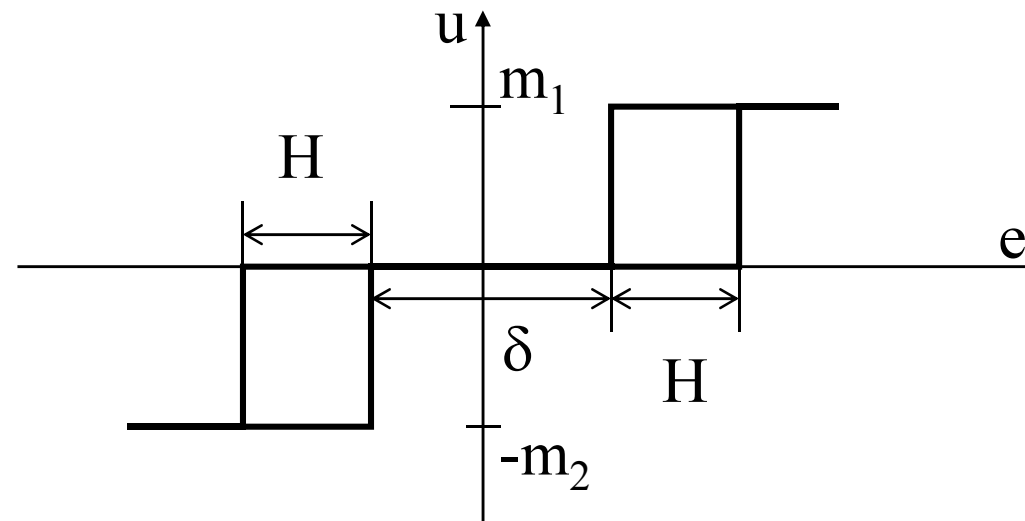


$$u = \begin{cases} +m_1 \text{sign}(e - H), & e > 0 \\ -m_2 \text{sign}(e - H), & e \leq 0 \end{cases}$$

$2H$  – 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.



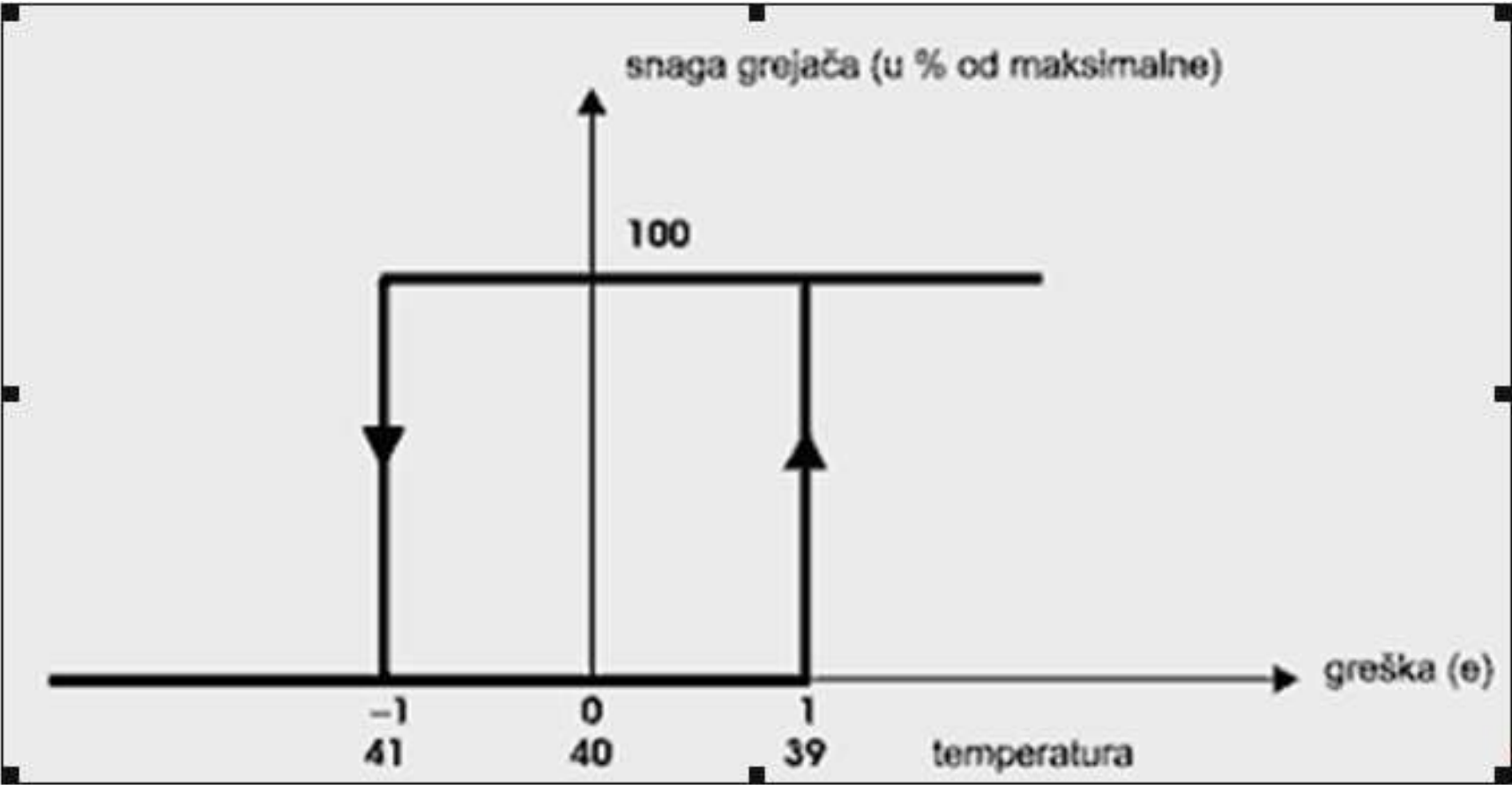
## Dvopoložajni regulator temperature

Dvopoložajni algoritam upravljana se riječima može opisati: ako je stvarna temperatura (npr.  $8^{\circ}\text{C}$ ) manja od zadane ( $40^{\circ}\text{C}$ ) neka je snaga grijača maksimalna. Dakle, grijač grije “svom snagom” sve dok se ne postigne zadana 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  $15^{\circ}\text{C}$  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:

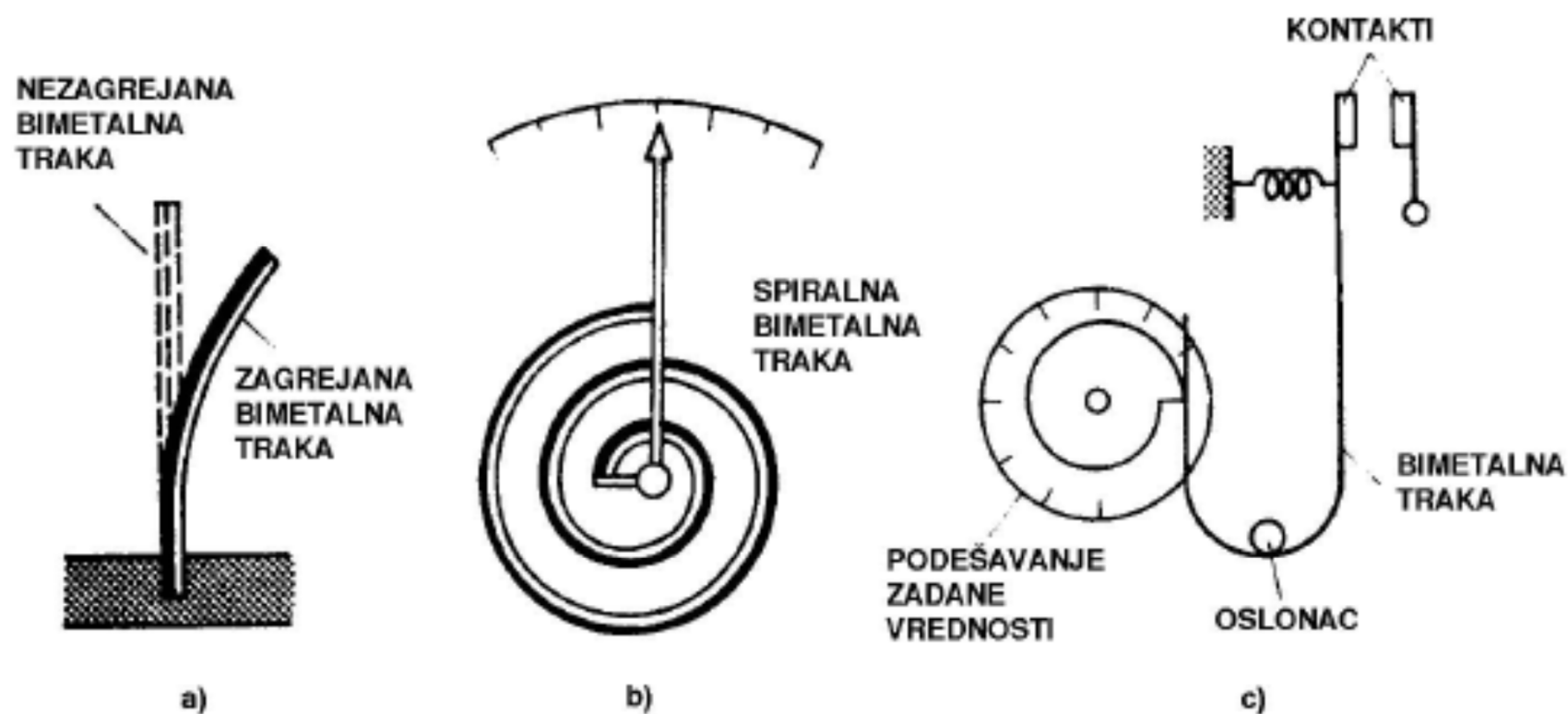
**ako je temperatura manja od  $39^{\circ}\text{C}$  snaga grejača max.**

**ako je temperatura veća od  $41^{\circ}\text{C}$  snaga grejača je 0.**

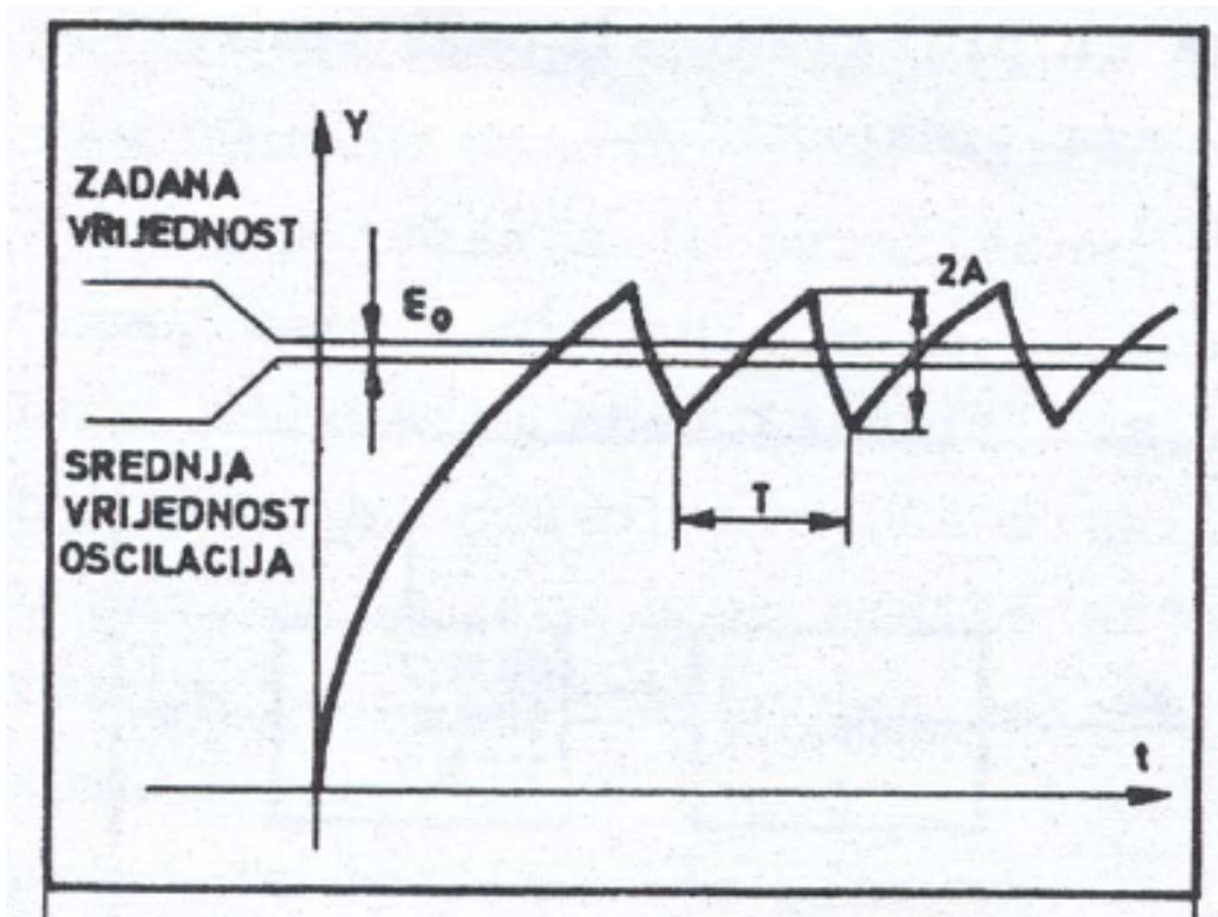
Gornji način regulacije je poznat kao *dvopoložajni regulator sa histerezisom* i upotrebljava se kada se ne zahtijeva visok kvalitet regulacije pri čemu treba težiti da se dobije što jeftiniji regulator.



**Bimetalni senzori temperature** prave se u obliku trake (slika 21.2.a), spirale (slika 21.2.b) ili helikoide od dva sloja različitih metala, na primer invar-mesing, invar-čelik i dr. Zbog različitih koeficijenata linearnog širenja pri porastu temperature bimetalna traka se savija na stranu metala sa manjim koeficijentom linearnog širenja. Raširena je upotreba bimetalne trake u gradnji termostata (slika 21.2.c) za temperature u oblasti  $-30^{\circ}\text{C}$  do  $300^{\circ}\text{C}$ .



Slika 21.2. Bimetalni senzor temperature: a) bimetalna traka, b) bimetalna spirala, c) termostat



$T$  - period oscilacija

$A$  - amplituda oscilacija

$\epsilon_0$  - statička greška srednje vrijednosti oscilacija



## Digitalni algoritmi upravljanja

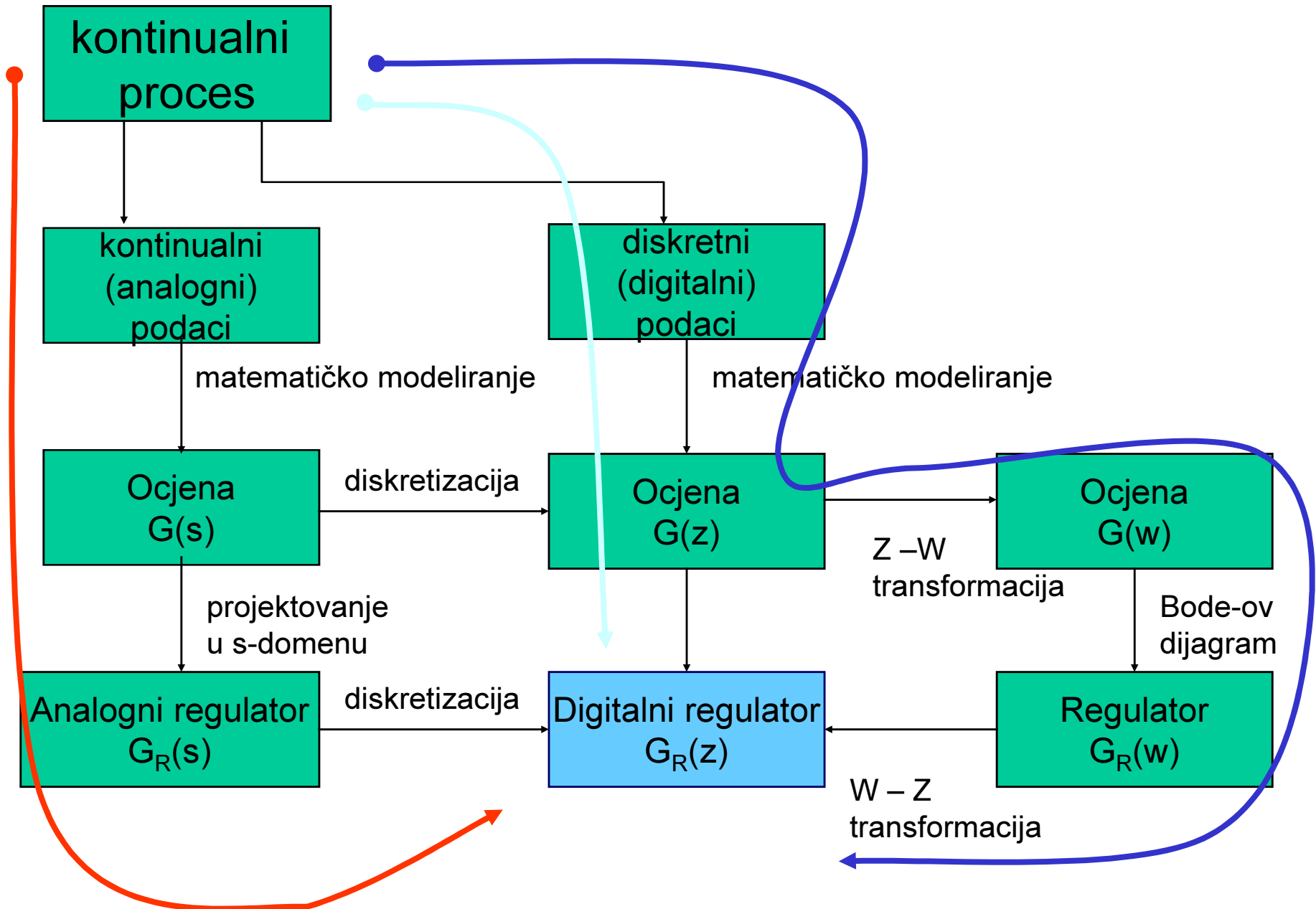
Ovdje ćemo posmatrati projektovanje digitalnih, diskretnih u vremenu, regulatora za upravljanje kontinualnim procesima.

Projektovanje SAU može se odvijati u dvije etape:

- dobijanje matematičkog modela koji treba da bude upravljani

- projektovanje/sinteza algoritma upravljanja.

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



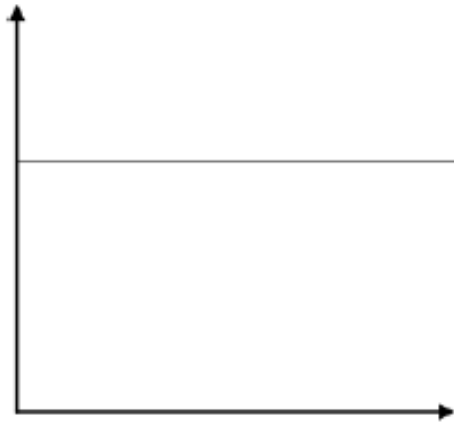
# REZIME

- *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

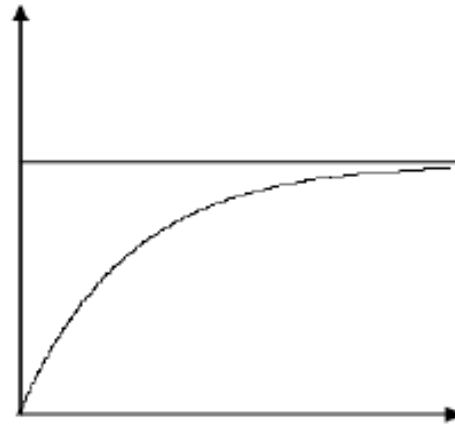
# Prigušenje i nestabilnost

- 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

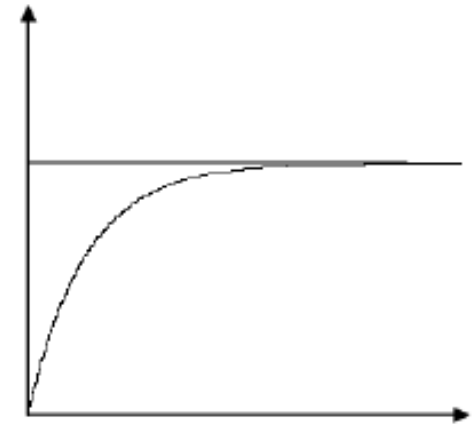
## Prigušenje i nestabilnost



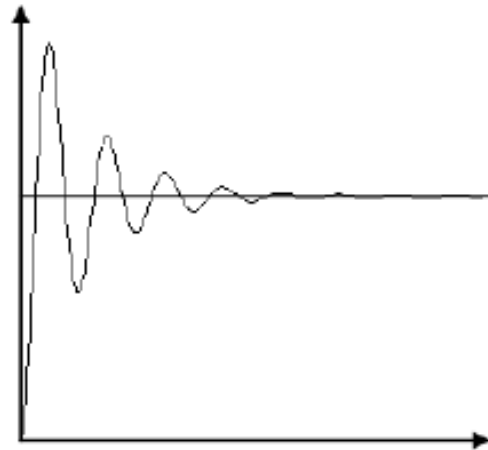
Step odziv



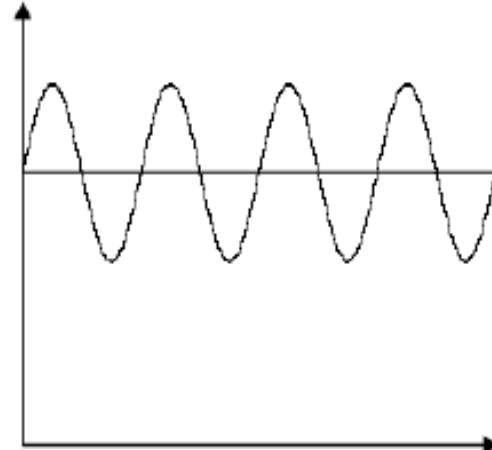
Aperiodičan odziv



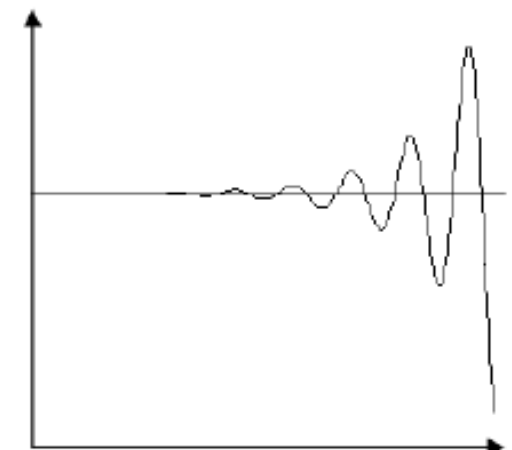
Kritično aperiodičan odziv



Prigušeno oscilatoran odziv



Oscilatoran odziv sa konstantnom amplitudom



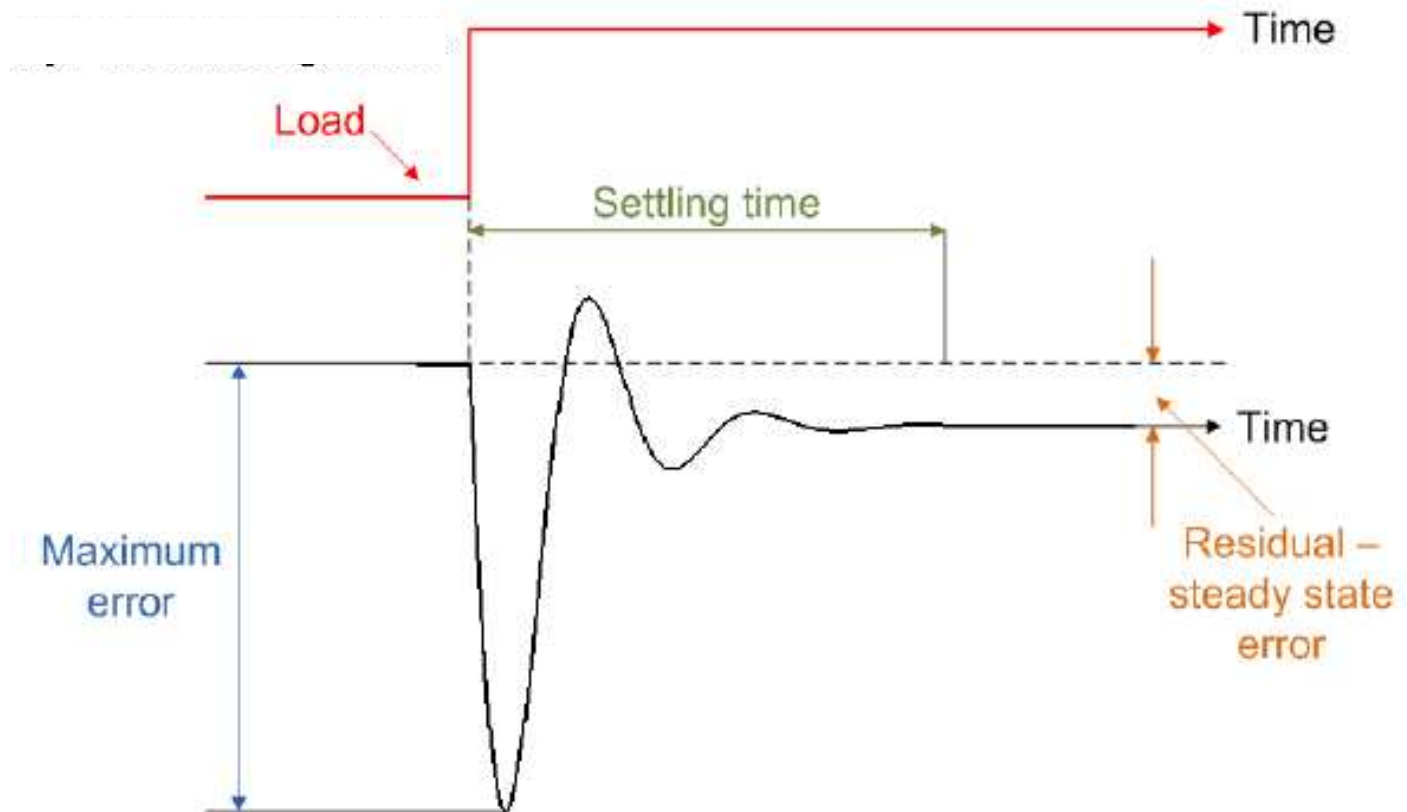
Oscilatoran odziv sa rastućom amplitudom

# 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 promjenljivu; ovo proizvodi grešku
  - Kontroler reaguje na grešku tako što mijenja manipulisanu promjenljivu
  - Promjena manipulisane promjenljive vraća kontrolisanu promjenljivu 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

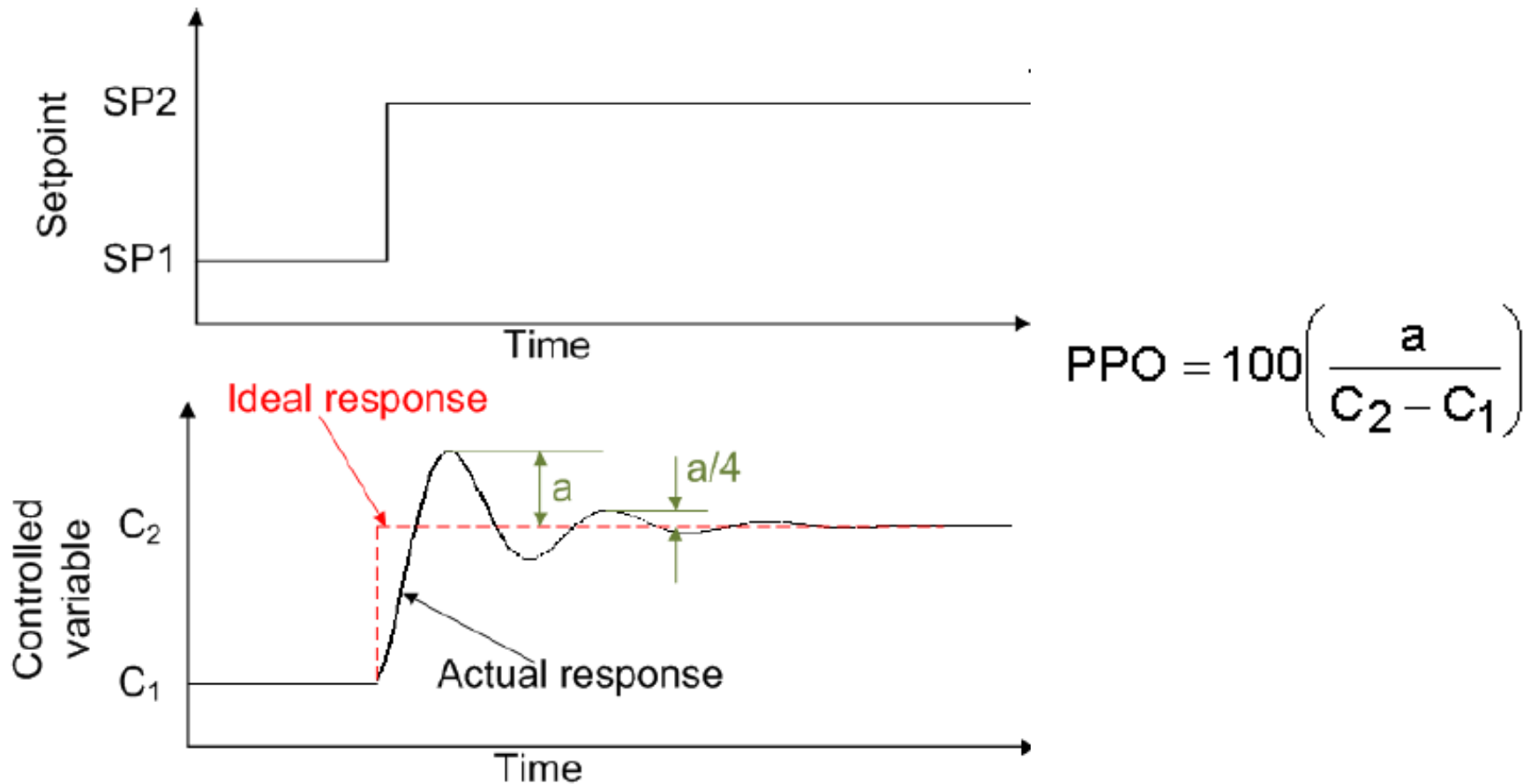
Da bismo efikasno testirali SAU sledeći uslovi:

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

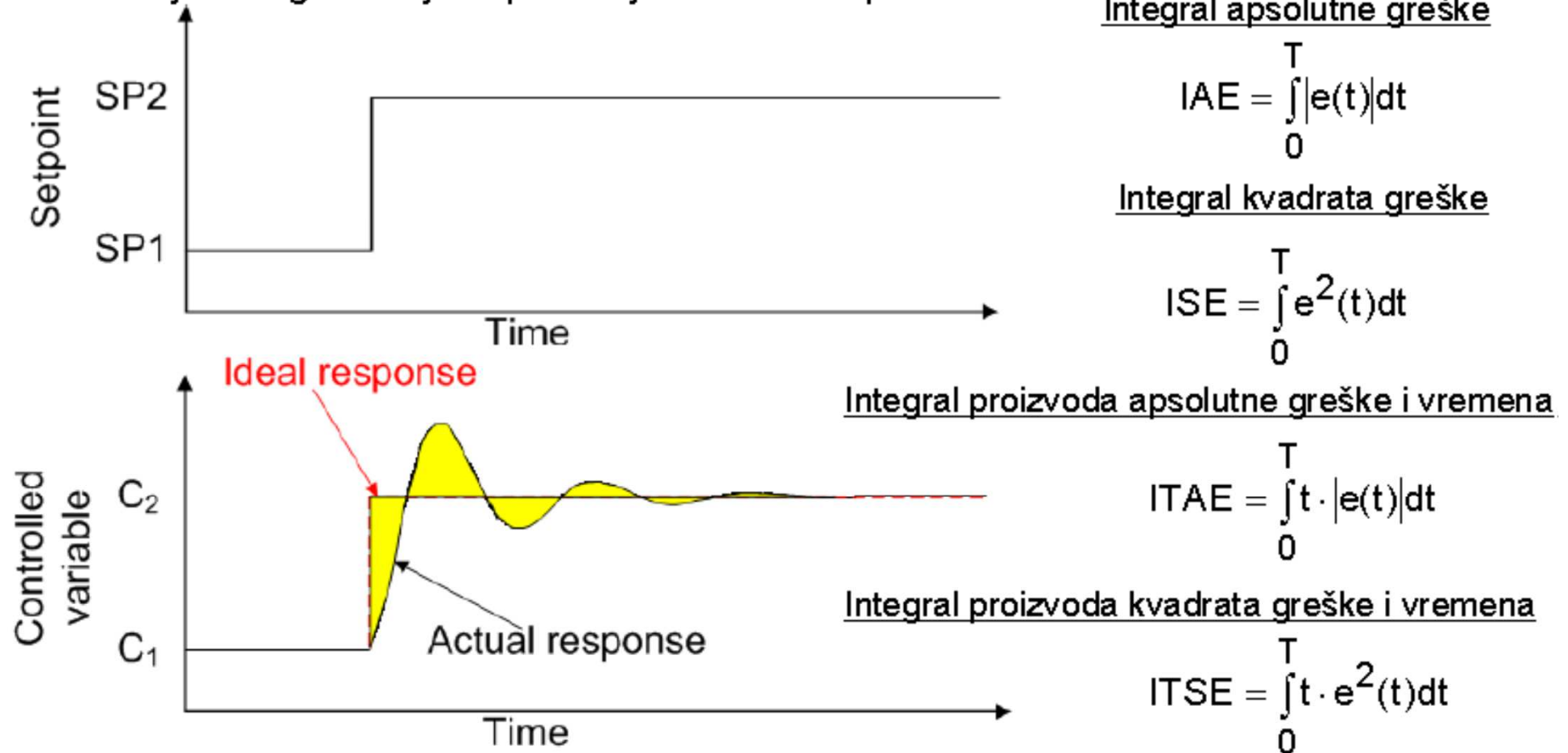
- Kriterijum podrazumijeva oscilatoran odziv u kome je naredna pozitivna amplituda kontrolisane promenljive manja za jednu četvrtinu od prethodne.
- Varijacija kriterijuma procenat preskoka (PPO).  
Preskok od 50% grubo govoreći je ekvivalentan ovom kriterijumu.



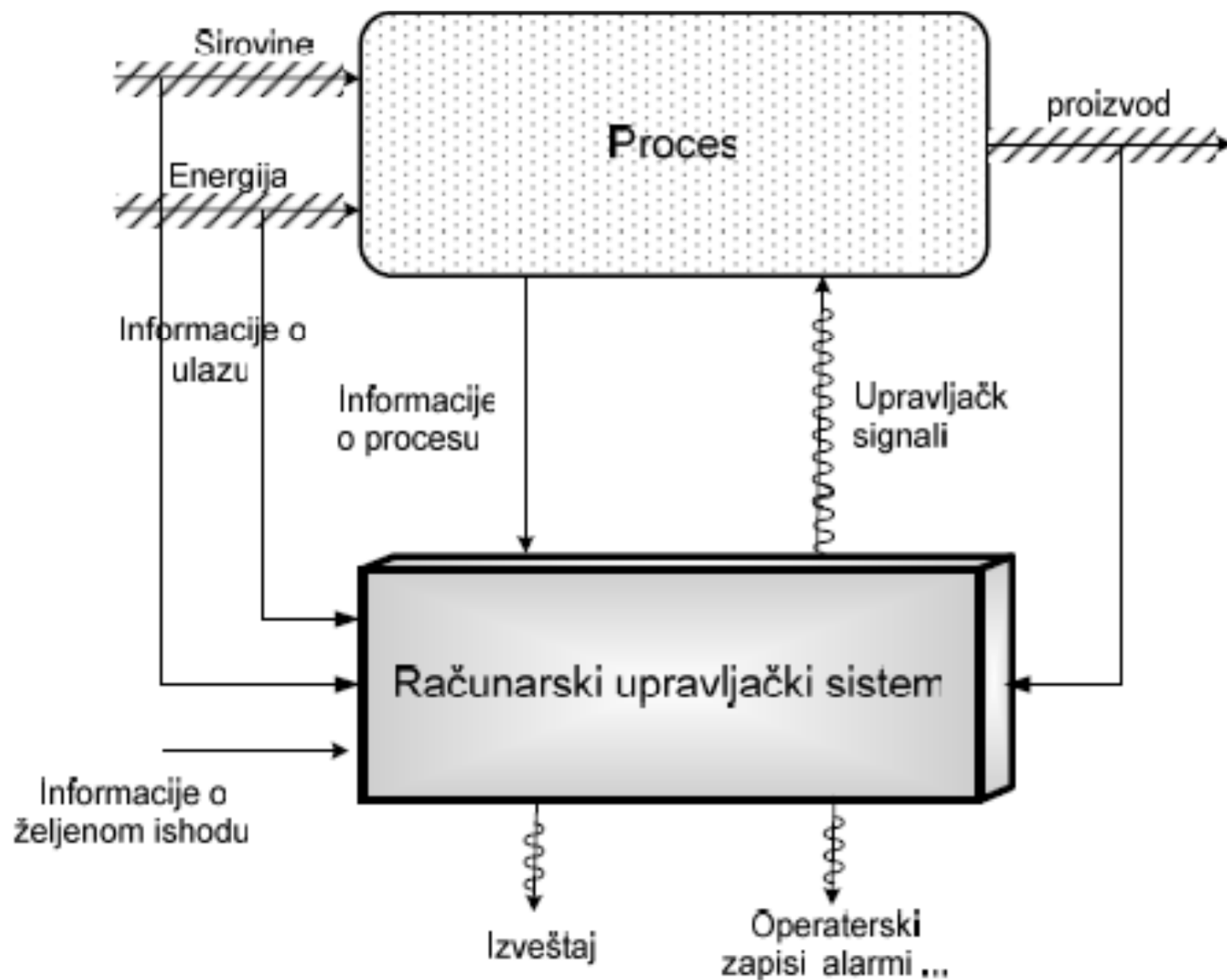
# Minimum integrala apsolutne greške

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

Postoje i drugi kriterijumi poznatiji kao indeksi performanse.



# RAČUNARSKI UPRAVLJAN PROCES



## PRIMJER FAZI KONTROLERA

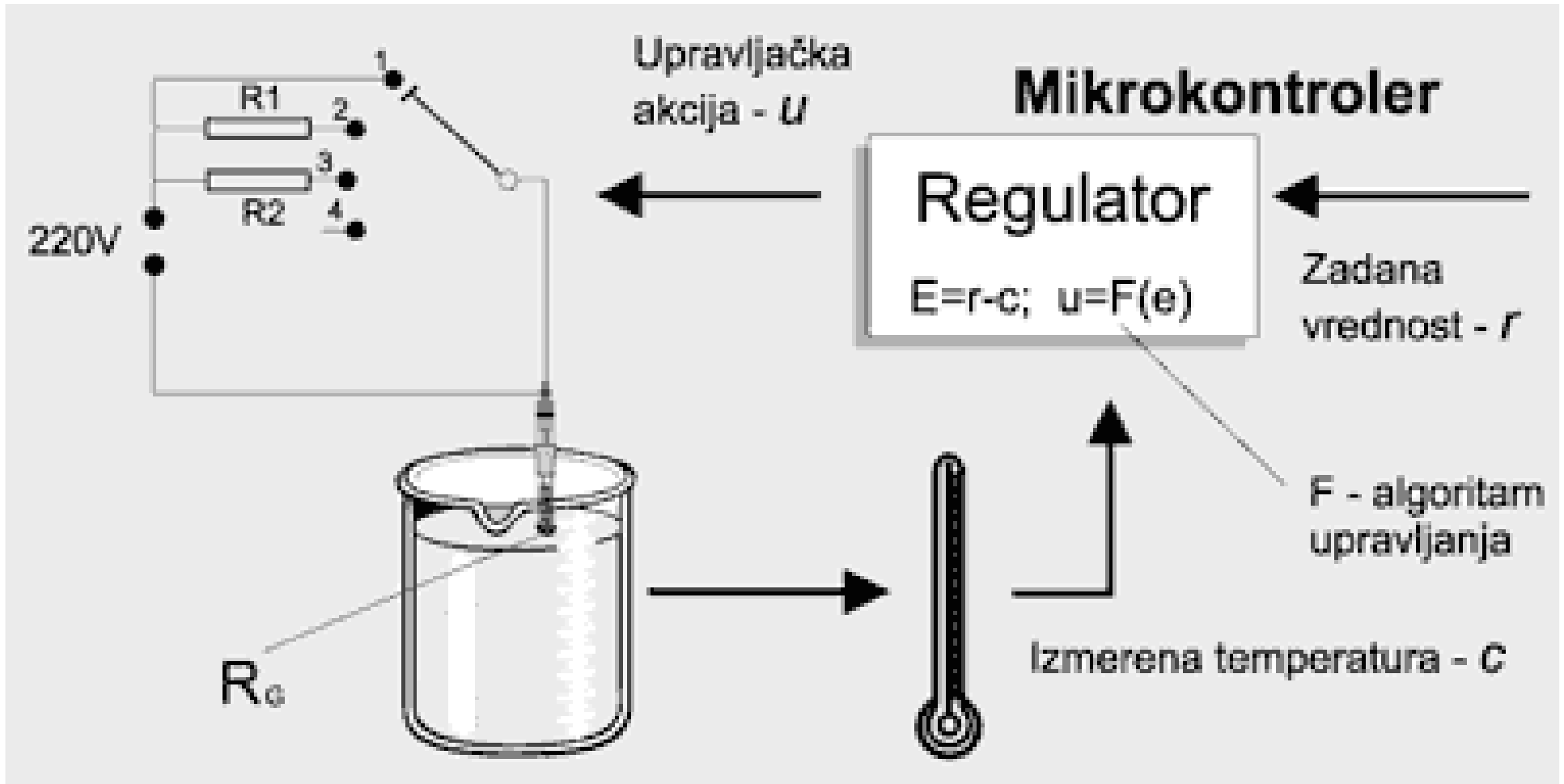
Današnji trend u oblasti regulacione tehnike je da se analogni regulatori zamijene digitalnim (mikrokontroleri, PLC-ovi i drugi digitalni uređaji koji se mogu programirati). Kod digitalnog upravljanja procesima kvalitet regulacije zavisi od kvaliteta programiranja čime se djelovanje inženjera automatike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

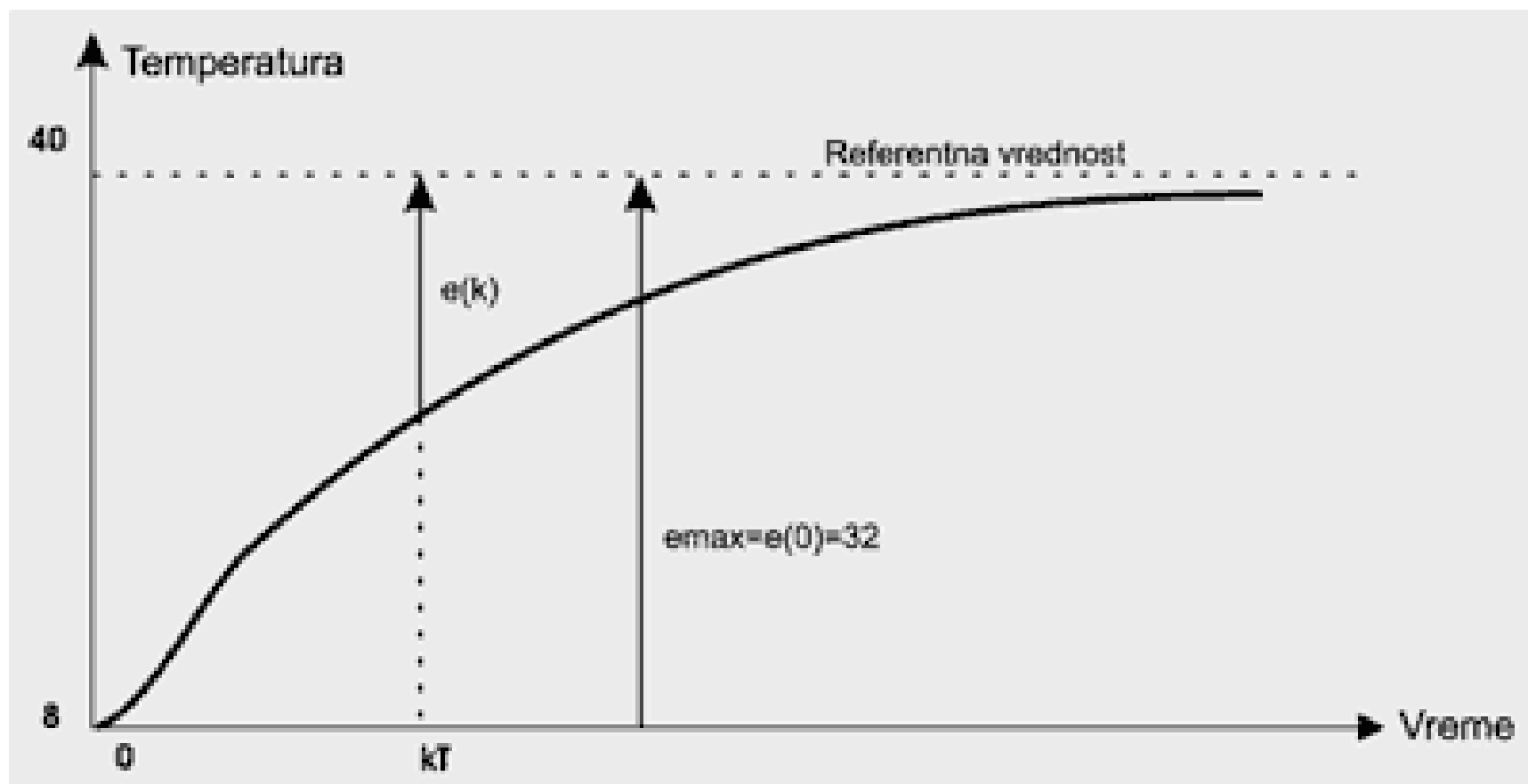
# Fazi u običnom životu

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.





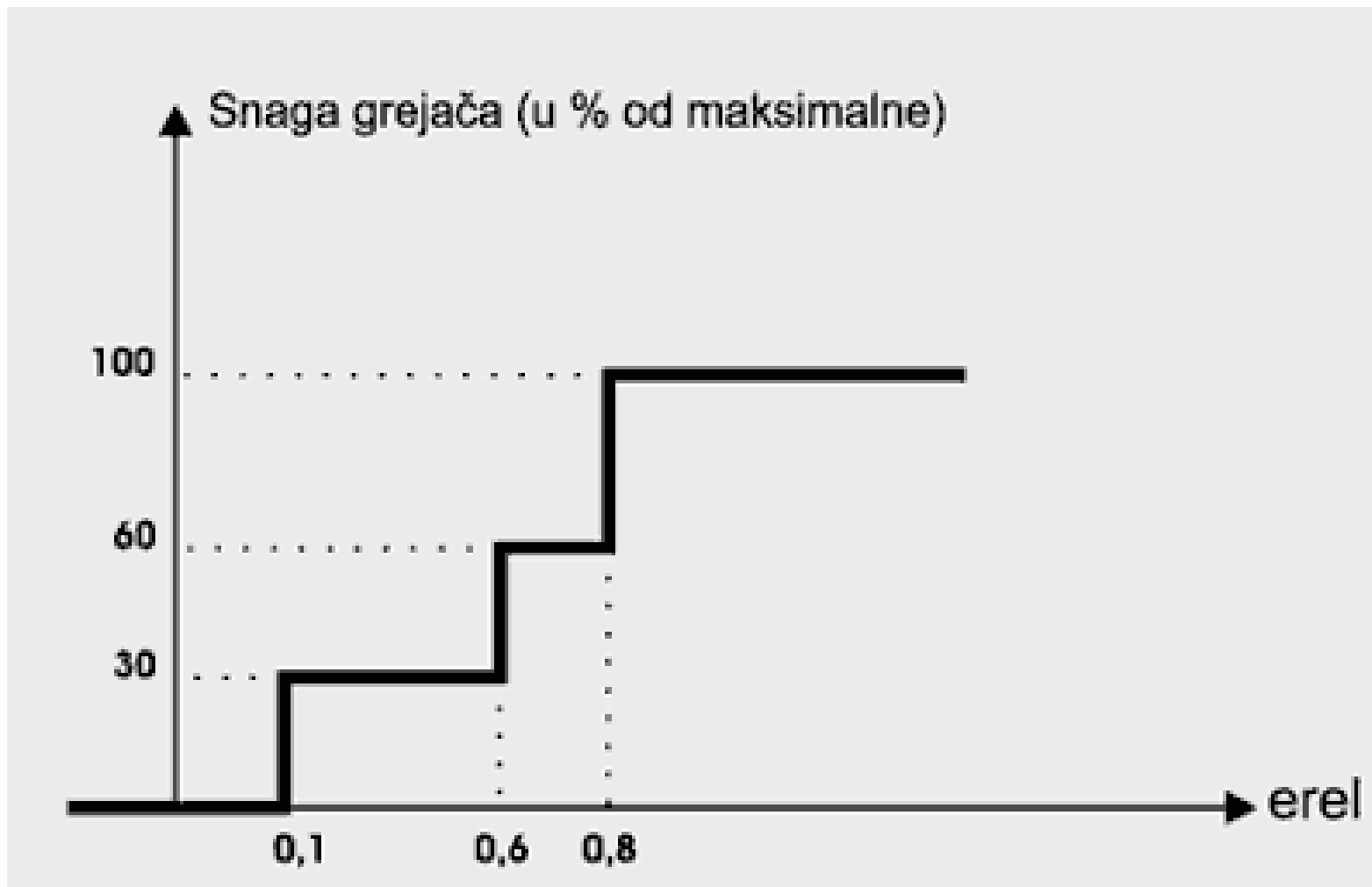
U odnosu na ranije izloženi pristup dvopoložajne regulacije Fazi pristup cijelom problemu je malo finiji. Ono što slijedi nije pravo fazi-logičko zaključivanje ali se radi boljeg razumijevanja može smatrati kao da jeste.

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 zadane onda je snaga grijača malo manja od maksimalne
- ako je temperatura malo manja od zadane onda je snaga grijača puno manja od max.
- ako je temperatura približna zadanoj onda je snaga grijača 0.

U gornjem primeru postoje 4 fazi pravila. Fazi pravilo na razumljiv način opisuje akciju (kolika treba da bude snaga grijača) na osnovu poznatog podatka (trenutna vrijednost temperature).





Pseudo - fazi ili četvoropoložajni regulator

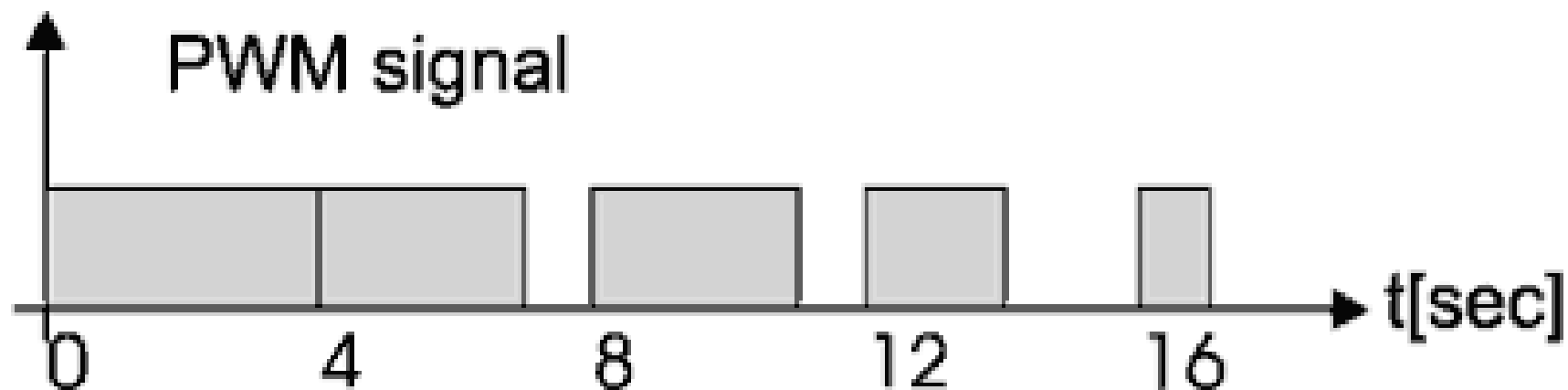
Broj fazi pravila se može mijenjati kao i upravljačka akcija “kolikom snagom treba grijati” na osnovu poznavanja realnog sistema.

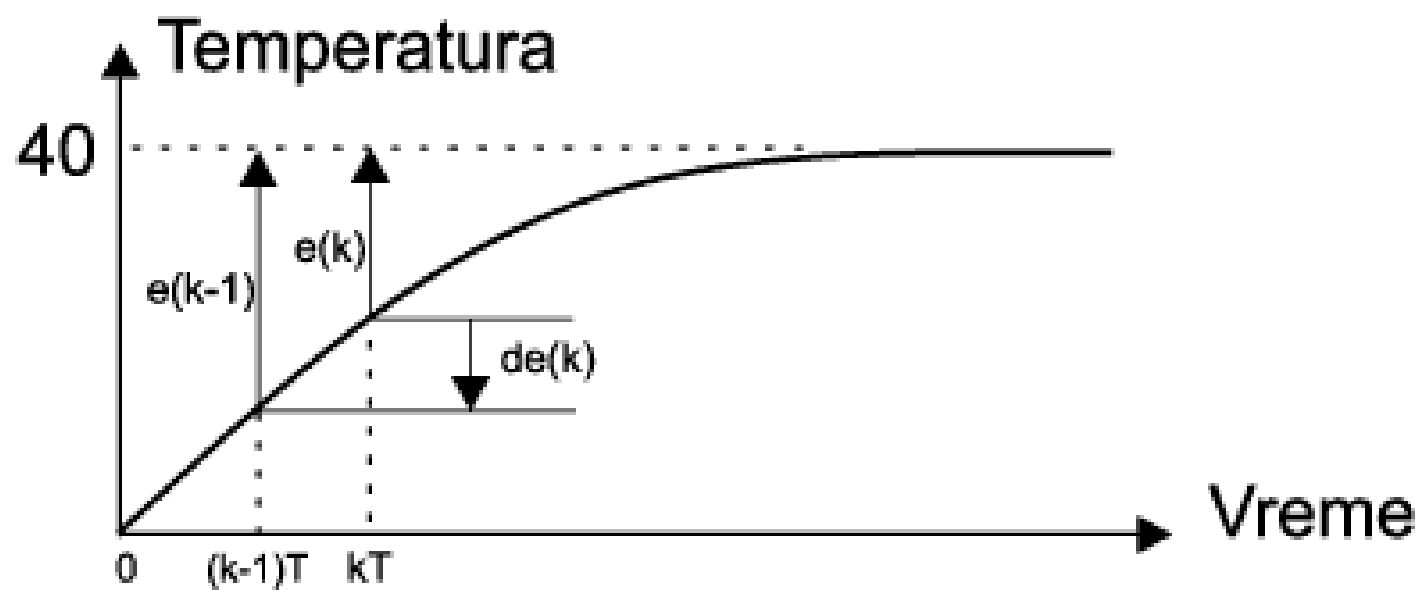
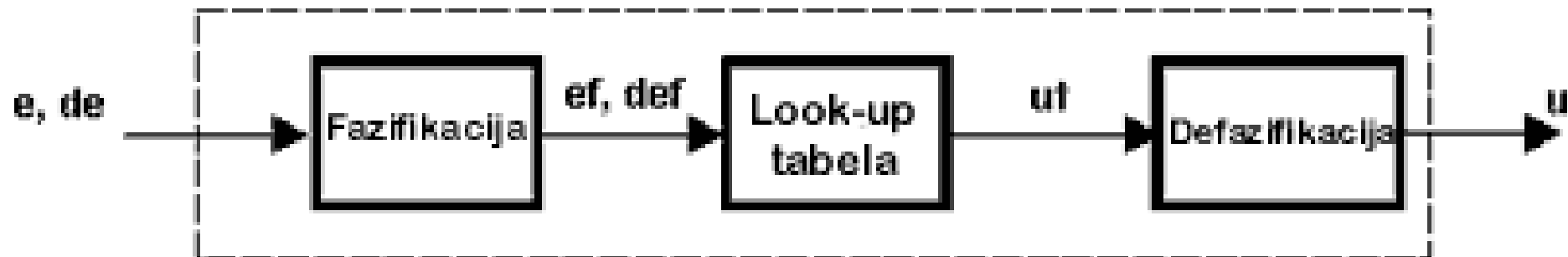
Snaga grijača se izračunava po formuli  $P=(U/(R_G+R))^2 * R$

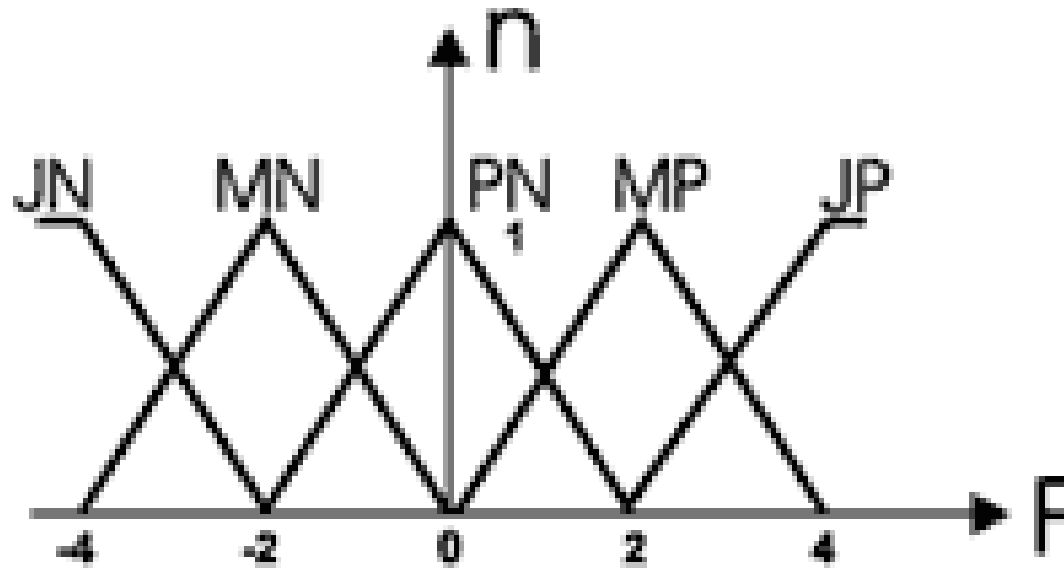
(R je ili  $R_1$  ili  $R_2$ ), gde je U mrežni napon od 220V,  $R_G$  je otpornost grejača, a R je otpornost otpornika vezanog na red čiji je zadatak da kontroliše struju kroz kolo. Otpornici su tako podešeni da se dobije odgovarajuća snaga na grijaču.

Maksimalna snaga je  $P_{max}=U^2/R_G$  (položaj 1), a minimalna je 0 (položaj 2). 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 promenljiva snaga grejača.







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 dve veličine (greška i promena greške) izračunava upravljanje odnosno koliko (u okviru periode  $T=4$  sekunde) grijati da bi postigli zadatu vrednost temperature