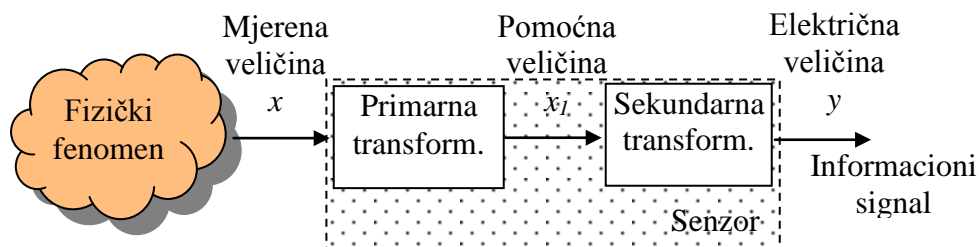


### **3. OPŠTE KARAKTERISTIKE SENZORA**

Imajući u vidu napomenu da tačnost sistema sa računarskim vođenjem procesa u potpunosti zavisi od statičkog i dinamičkog ponašanja podsistema za akviziciju podataka tom dijelu je potrebno posvetiti posebnu pažnju. Senzori/pretvarači su primarni ulazni elementi za akviziciju podataka o vrijednostima fizičkih veličina (kao što su temperatura, sila, pritisak, položaj i drugi) koje karakterišu rad vođenog procesa. U opštem slučaju oni se koriste za mjerenje analognih veličina mada se u ove elemente ubrajaju i neki elementi koji registruju diskretna ili specijalno binarna stanja, kao što su senzori blizne i drugi.

#### **3.1 OSNOVNI POJMOVI O SENZORIMA**

U literaturi se uz pojam akvizicije podataka i mjerenja obično koriste pojmovi: senzor, pretvarač, transdjuser, davač, transmitter itd. Često se ovi termini koriste kao sinonimi što nije potpuno ispravno. Istina, ne postoji jedinstveno usvojena terminologija, ali je značenje ovih termina ipak potrebno razjasniti da bi se izbjegli potencijalni nesporazumi. Takođe, detaljnije poznavanje procesa u elementima sistema za akviziciju podataka je potrebno za njihovo uspješnije projektovanje i korištenje. U tom cilju je na Sl.3.1 data funkcionalna šema prvog elementa u sistemu za akviziciju (mjernog pretvarača, transdjusera), koja prikazuje transformaciju mjerene veličine u električni signal. Ova transformacija se po pravilu dešava u dva koraka. U prvom koraku se mjerena veličina ( $x$ ) pretvara u pomoćnu veličinu ( $x_1$ ) a zatim se ova veličina pretvara u električni signal ( $x_2$ ). Nekada se radi o stvarno konstruktivno odvojena dva elementa, a nekada je to prije svega pogodan način predstavljanja transformacije signala.



Sl.3.1

- Prvi elemenat koji obavlja primarnu transformaciju se obično naziva: davač, senzor, ulazni pretvarač, primarni osjetni elemenat. Najčešće korišćen termini su senzor i pretvarač. Promjenom mjerne veličine dolazi do promjene odgovarajućeg parametra samog senzora, tj. senzor vrši pretvaranje mjerene veličine u pomoćnu veličinu. On pretvara fizičku (procesnu) mjerenu veličinu u drugu fizičku veličinu - pomoćnu veličinu. Zakon preslikavanja  $x$  u  $x_I$  opisan je funkcionalnim preslikavanjem  $x_I = f_I(x)$ , gdje je operator  $f_I$  po pravilu nelinearan. Transformacija  $x_I = f_I(x)$  obično se naziva primarnom i treba dati signal  $x_I$  koji je pogodan za konverziju u standardni električni (unificirani) signal  $y$ .

Za idealan senzor je veza ulaza i izlaza u stacionarnom stanju linearna, statička karakteristika je pravac (Sl.3.3):

$$x_I = ax.$$

Koeficijent  $a$  je konstantan za sve vrijednosti mjerene veličine  $x$  i predstavlja osjetljivost senzora/transdjusera, jer je:

$$\text{tg}(\alpha) = \Delta x_I / \Delta x = a = \text{const.}$$

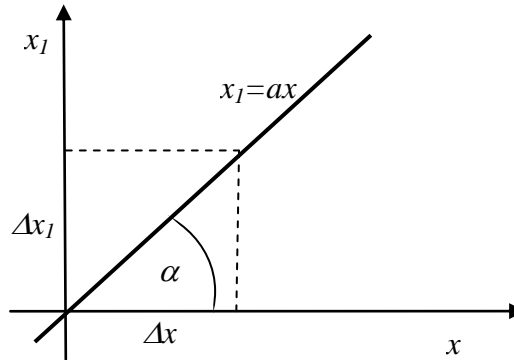
Dakle, osjetljivost senzora je veličina promjene izlaznog signala za jediničnu (specificiranu) promjenu mjerene veličine. Signal  $x_I$  nije iste fizičke prirode kao  $x$  pa se osjetljivost obično izražava kao procentualna promjena izlaza za jediničnu promjenu ulaza. Poželjno je da je osjetljivost senzora što veća, jer tada male greške u očitavanju izlaznog signala neće dati velike greške u procjeni vrijednosti mjerene veličine. Iz tog razloga je osjetljivost vrlo važan parametar senzora, koji nije direktan pokazatelj

### 3. Osnovni pojmovi i karakteristike senzora

17

njegove tačnosti, ali može mnogo da utiče na tačnost u zavisnosti od načina narednih transformacija pomoćne promjenljive.

Osnovni zahtjev je **da se  $x_I$  što više mijenja** sa promjenom mjerene



Sl.3.3 Idealna statička karakteristika senzora

veliĉine (osjetljivost senzora), a da istovremeno **ne zavisi od drugih veliĉina**.

Druga vrlo vaŹna karakteristika senzora i vrlo vaŹna karakteristika akvizicionog sistema je donja i gornja granica mjerene veliĉine za koju se senzor moŹe koristiti i naziva se **mjernim podruĉjem** senzora. Mjerno podruĉje moŹe biti:

- **unipolarno** (npr.  $0 \div 10 [kPa]$ ,  $5 \div 25 [mm]$ ),
  - **bez prave nule** (npr.  $30 \div 80 [kPa]$ ).
  - **sa pravom nulom** (npr.  $0 \div 80 [kPa]$ ).
- **bipolarno** (npr.  $\pm 10 [kPa]$ ,  $-10 \div +25 [mm]$ ),
  - **simetriĉno bipolarno** (npr.  $\pm 10 [kPa]$ ,  $\pm 25 [mm]$ ),
  - **asimetriĉno bipolarno** (npr.  $-10 \div +20 [kPa]$ ,  $-10 \div +25 [mm]$ ).

Algebarska razlika izmeĊu gornje i donje granice mjernog podruĉja naziva se rasponom pune skale (Eng. *Full Scale Span- FSS*) ili mjernim opsegom. Raspon pune skale senzora namjenjenog za mjerno podruĉje  $-10 \div +20$

[kPa] je 30 [kPa], a senzora sa mjernim područjem  $30 \div 80$  [kPa] je 50 [kPa].

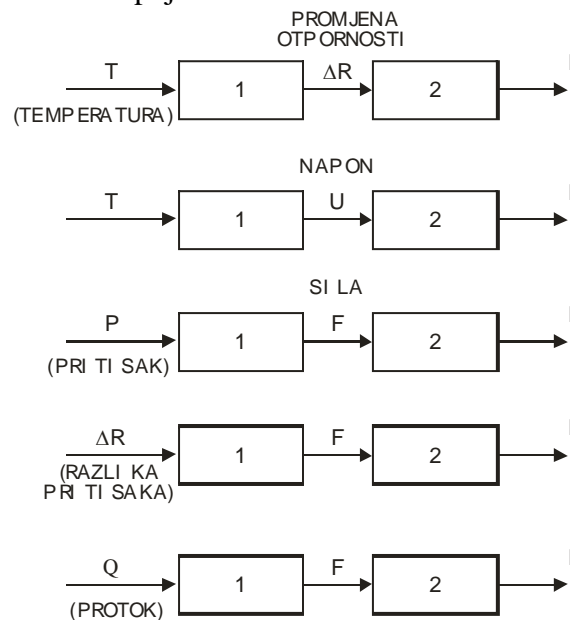
- Drugi elemenat koji obavlja sekundarnu transformaciju se obočno naziva: **kolo za uobličavanje**, adapter, bazni elemnat, kolo za interfejs.

Osnovna funkcija elementa je da pretvara pomoćnu fizičku veličinu  $x_I$  (izlaz iz senzora) u električni signal  $y$ . Pri konverziji je neophodno pored promjene fizikalne prirode signala, da električni signal bude u standardnoj formi pogodnoj za dalje procesiranje kroz akvizicioni sistem. Može se raditi o naponskom ili strujnom, analognom ili digitalnom, ili nekoj drugoj formi električnog signala. Zbog toga se ovaj signal često naziva i informacioni signal.

Kolo za uobličavanje paralelno sa osnovnom funkcijom izvršava i druge vrlo značajne kao što su: linearizacija statičke karakteristike mjernog elementa, kompenzacija neželjenih uticaja na pomoćnu veličinu (Npr. kompenzacija promjene otpornosti termootpornog senzora pritiska usljed promjene temperature).

Zadaci postavljeni pred kola za uobličavanje signala po pravilu su višestruki i dosta složeni, te se ona uglavnom izrađuju kao integrisana kola (Eng. *Integrated Circuit - IC*).

Za ilustraciju je na Sl.3.2 dato više mjernih elemenata koji odgovaraju strukturi sa Sl.3.1 (za mjerenje temperature  $T$ , pritiska  $P$  i protoka  $Q$  na koje otpada 90 % od svih mjerenja u sistemima upravljanja industrijskim procesima).



Sl.3.2

Nakon datih objašnjenja potrebno je dodatno obrazložiti terminologiju koja se koristi u akviziciji mjernih podataka. Mjerni pretvarač se u sistemu za akviziciju podataka obično naziva transdjuserom i podrazumijeva se da on generiše električni signal na osnovu fizičkih mjerenja u realnom svijetu. Ukoliko se transdjuser (mjerni pretvarač) sa Sl.3.1 sastoji od dva elementa tada se prvi naziva senzorom, a drugi elementom za uobličavanje.

Unapređenjem poluprovodničkih tehnologija sve više senzora je realizovano kao poluprovodničkike komponente. U tom slučaju su po pravilu primarna i sekundarna transformacija integrisene u jednom poluprovodničkom čipu. Tada se umjesto termina transdjuser, za konverziju mjerene veličine u standardan informacioni električni signal, naziva senzorom. Ovaj trend je opšte prihvaćen pa se često koristi i za senzore/transdjusere zasnovane na drugim tehnologijama.

### 3.2 KARAKTERISTIKE SENZORA

U svakoj akviziciji mjernih podataka senzor je primarni elemenata pa otuda ima vrlo bitan uticaj na rad čitavog sistema za akviziciju. Iz tog razloga će detaljnije biti navedene neke njihove opšte karakteristike.

- **Visoka tačnost** (satička i dinamaička) znači što vjerniju konverziju informacije iz jednog u drugi vid, odnosno koliko tačno vrijednosti električnog mjernog signala u svakom trenutku reprezentuju stvarnu trenutnu vrijednost mjerene veličine. Tačnost se opisuje maksimalnom greškom koja se može očekivati na osnovu dobijenih mjerenja u bilo kojoj tački mjernog područja senzora. Proizvođači obično daju tačnost senzora kao procentualnu grešku u čitavom mjernom području. Izvori greške mogu biti različite prirode i manifestacija pa će zbog njihovog velikog zanačaja za tačnost procesa akvizicije biti kasnije detaljnije razmatrani.
- **Visoka sigurnost i dug vijek trajanja.** S obzirom na trend sve veće automatizacije svih ljudskih aktivnosti akvizicija podataka je obično samo početni korak u složenim automatizovanim sistemima. To znači da akvizicije po pravilu ima efekte na mnoge procese koji se odvijaju automatski bez intervencije čovjeka u dužem vremenskom periodu. Iz tog razloga nepravilan rad sistema za akviziciju često može imati vrlo velike negativne posljedice. Zato je potrebno da sistem za akviziciju bude dugog vijeka trajanja, te postojan na različite fizičke i hemijske uticaje.
- **Galvansko razdvajanje** od izlaznih kola srednje ili velike snage. Ukoliko postoje galvanska veza sa kolima srednje i visoke snage to je potencijalna opasnost za operatere koji rukuju opremom. Takođe, u slučaju bilo kakvog otkaza skupocjena oprema za akviziciju bi mogla biti uništena.
- **Uticaj promjena napona napajanja.** Mali je broj senzora koji su istovremeno i transdjuseri, odnosno koji na svom izlazu daju električni signal direktno bez dodatnih električnih izvora. Za sve senzore/transdjusere gdje se koristi eksterno električno napajanje potrebno je da izlazna veličina ostane u klasi tačnosti elementa pri promjeni napona napajanja u širokim granicama.

- **Zaštita od uticaja šumova i smetnji.** Jedan od vrlo značajnih faktora koji utiču na kvalitet akvizicije podataka jesu djelovanja šumova i smetnji. Akvizicija podataka se često odvija u uslovima vrlo intenzivnog djelovanja ovih uticaja. To je posebno karakteristično za primjene u industriji, gdje su pojedini dijelovi akvizicionog sistema pod djelovanjem smetnji i šumova velike snage.
- **Kompatibilnost** senzora/transdjusera se odnosi na to da su nivoi i oblici signala koje generišu kao i uslovi instalacije u skladu sa propisanim standardima. Ovo svojstvo omogućava da se elementi proizvedeni od različitih proizvođača ili elementi različitih generacija mogu međusobno zamjenjivati.
- Ukoliko se u elementu za akviziciju podataka nalaze komponente koja mogu da **akumuliraju veliku energiju** to po pravilu predstavlja potencijalnu opasnost za rukovaoce sistemom ili druge komponente sa kojima su spregnuti. Ta energija može da u nekim trenucima bude nekontrolisano oslobođena. Iz tog razloga elementi za akviziciju podataka ne smiju da sadrže komponente (kondenzatore i zavojnice) koje u normalnom radnom režimu akumuliraju energiju veću od 20 [ $\mu$ NJs] .
- **Nivo izlaznog signala, ulaznu i izlaznu impedansu** je potrebno poznavati za senzore da bi se mogli pravilno koristiti. Nivo izlaznog signala senzora mora biti usklađen sa nivoom narednih kola za akviziciju na koja se povezuje. Ako je poznata ulazna impedansa tada se može procijeniti ili izračunati u kojoj mjeri će postavljanje senzora uticati na odvijanje procesa. Za valjanost mjerenja je potrebno da uticaj senzora na odvijanje procesa bude zanemarivo. Od vrijednosti izlazne impedanse senzora zavisi koliko se kola na njih može vezati a da se bitno ne smanji tačnost dobijenih podataka.

Navedene su samo osnovne karakteristike koje treba da zadovolji svaki kvalitetan senzor/transdjuser. Lista nije u potpunosti iscrpljena. U mnogim primjenama potrebno je da senzori zadovoljavaju dodatne karakteristike (Npr. jednostavna montaža i demontaža, ograničene dimenzije i težina).

### **Podjele senzora**

Mjerni elementi se mogu podijeliti prema različitim kriterijima. U tom kontekstu najopštija podjela bi bila prema sljedećih šest vidova energije:

- Mjerenje mehaničke energije
- Mjerenje termičke energije
- Mjerenje hemijske energije
- Mjerenje nuklearne energije
- Mjerenje energije zračenja
- Mjerenje električne energije.

Podjela koja se najčešće koristi se zasniva na vrsti mjerene veličine. Ova podjela je od posebnog značaja jer omogućava brz izbor odgovarajućeg senzora/transdjusera za potrebno mjerenje. Ovdeje će uglavnom biti korištena ovakva podjela.

Podjela se može vršiti i prema fizičkom ili hemijskom principu na kome se zasniva njegov rad. Naprimjer, mjerenje pomaka se može realizovati otporničkim, kapacitivnim, induktivnim elementima. Ovaj kriterij se obično koristi kao drugi u klasifikaciji.

Navedene dvije podjele dominantno se koriste u klasifikaciji senzora/transdjusera. Pored njih postoje i druge.

Mogu se podijeliti na analogne i digitalne. Izlaz analognih elemenata se kontinualno mijenja sa promjenom mjerene veličine. Digitalni elementi na izlazu daju digitalni ekvivalent, prema odgovarajućem načinu kodovanja ulazne mjerene veličine.

Takođe, svi senzori/transdjuseri se mogu podijeliti na takozvane: pasivne i aktivne. Kod pasivnih senzora/transdjusera izlazni signal nastaje na osnovu energije mjernog signala. Na svom izlazu po pravilu daju signal vrlo niskog nivoa. Aktivni senzori/transdjuseri koriste vanjski izvor energije. Mjerena veličina moduliše energiju iz vanjskog izvora i zato se na ovaj način na izlazu može dobiti električni signal visokog nivoa.



### 3.3 POKAZATELJI TAČNOSTI SENZORA

#### 3.3.1 Statička tačnost

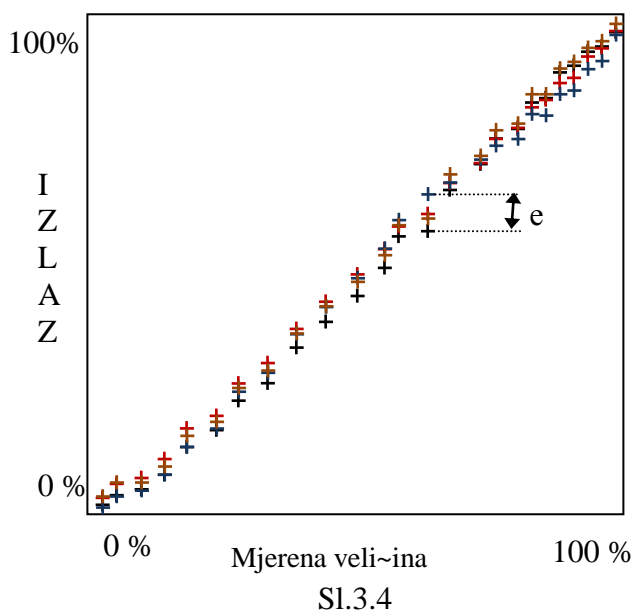
Tačnost senzora opisuje koliko je njegovo pokazivanje blisko stvarnoj vrijednosti veličine koja se mjeri. Po pravilu prvo se posmatra statička tačnost jer je ona od primarnog značaja. Ona opisuje maksimalnu grešku koja se može očekivati u stacionarnom stanju (kada se nakon promjene mjerene veličine sačeka da izlaz senzora postane konstantan), za bilo koje mjerenje realizovano u mjernom području elementa. Greška se obično izražava u procentima mjernog opsega njegovog izlaza. Karakteriše se sa više pokazatelja uzimajući u obzir stvarnu statičku karakteristiku elementa (njen oblik i postojanost). Iskazuje se preko proračuna greške u odnosu na neki idealni elemenat (elemenat kod koga je statička karakteristika pravac fiksiran za sve uslove okoline i eksploatacije).

Određivanje i povećanje statičke tačnosti senzora se provodi u postupku kalibracije. Ono se realizuje u jednom ili više ciklusa kalibracije. Ciklus kalibracije predstavlja sporu promjenu mjerene veličine od minimalne do maksimalne vrijednosti i nazad ponovo do minimalne vrijednosti.

#### Ponovljivost

Ponovljivost senzora je njegova sposobnost da daje jednake vrijednosti izlazne veličine za uzastopna ponovljena mjerenja iste vrijednosti mjerene veličine. Greška ponovljivosti garantuje da za više uzastopnih mjerenja maksimalna razlika izlaza neće biti veća od  $e[\%]$  za bilo koje ali jednake vrijednosti mjerene veličine.

U toku eksploatacije senzora nisu isti uslovi u kojima se vrše mjerenja, a prije sveg temperatura okoline. Svi ti uticaji dovode do greške ponovljivosti senzora. Skica mogućih statičkih karakteristika za element veoma loše ponovljivosti data je na Sl.3.4. Različite krive ilustruju promjene izlaza za više ponovljenih mjerenja za promjene mjerene veličine od 0% do 100% mjernog područja i «normalne» uslove eksploatacije. Pojam «normalni» podrazumijeva da se senzor ne koristi suprotno propisanim uslovima eksploatacije i da se ne koriste nikakvi dodatni mehanizmi zaštite od uticaja okruženja (električno oklopljavanje, posebni stabilizatori napona napajanja, konstantna radna temperatura i drugi).



### Linearnost

Kod realnih senzora statička karakteristika nije pravac, što znači da im osjetljivost nije konstantna nego zavisi od nivoa mjerene veličine. Po pravilu je zadovoljavajuće da statička karakteristika senzora bude u mjernom području

približno oblika pravca. Na krajevima mjernog područja, a pogotovo van tog područja karakteristika je nelinearna (vrlo često oblika nelinearnog zasićenja).

Većina sistema za akviziciju podataka ima projektovane komponente uz pretpostavku da je linearna veza između mjerne veličine i izlaza senzora u stacionarnom stanju. Iz tog razloga se za senzore često koriste linearizovane statičke karakteristike, koje su pravci.

Bliskost stvarne i odgovarajuće linearizovane statičke karakteristike senzora je mjera njegove linearnosti. Izražava se kao maksimalno procentualno odstupanje tačke sa stvarne statičke karakteristike senzora od linearizovane statičke karakteristike predstavljene odgovarajućim pravcem i predstavlja grešku linearnosti. Ova vrijednost zavisi od toga kako je definisana linearizovana statička karakteristika pa se linearnost vezuje za način definisanja linearizovane statičke karakteristike.

*Linearizacija po minimumu kvadrata* odnosi se na pravac za koji je suma kvadrata reziduala minimalna. Termin reziduali se odnosi na odstupanje očitanih izlaza sa senzora od vrijednosti sa pravca koji definiše linearizovanu statičku karakteristiku. Ova prava se obično računa pomoću računara. Bez izvođenja ćemo samo navesti osnovni način proračuna.

- 1) Pravac koji se određuje, dat je jednačinom

$$y=ax+b$$

gdje je:  $y$ - očitani izlaz

$x$ - mjerna veličina

$a$  -nagib pravca

$b$  -presjek pravca sa  $y$  osom

- 2) Nagib i presjek pravca sa ordinatom (*offset*) dati su sa dvije jednačine:

$$a = \frac{n \sum_{l=1}^n xy - \sum_{l=1}^k x \sum_{l=1}^n y}{n \sum_{l=1}^n y^2 - \left( \sum_{l=1}^n y \right)^2}; \quad b = \frac{\sum_{l=1}^k x - a \sum_{l=1}^n y}{n} \quad (4)$$

Gdje je :  $k$ - ukupan broj vrijednosti mjerne veličine

$n$ - ukupan broj dobijenih tačaka ( parova: mjerna veličina-izlaz).

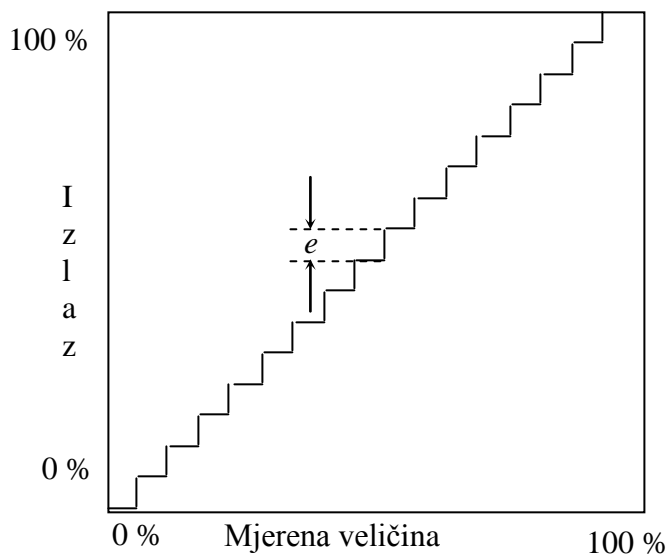
*Linearnost po teoretskoj strmini* se računa tako da se povuče pravac između krajnjih tačaka teoretske statičke karakteristike. Ovakva prava linija se može povući bez uzimanja u obzir mjernih tačaka.

*Rubna linearnost (end point)* se usvaja tako da se prava povuče kroz dvije krajnje mjerne tačke.

Specijalan slučaj rubne linearnosti je linearnost po teoretskoj strmini koja se računa tako da se pravac povuče između krajnjih tačaka teoretske statičke karakteristike (0% i 100% ili 10% i 90%). Ovakva prava linija se može odrediti bez uzimanja u obzir mjernih tačaka sa stvarnog senzora/transdjusera.

### Rezolucija statičke karakteristike

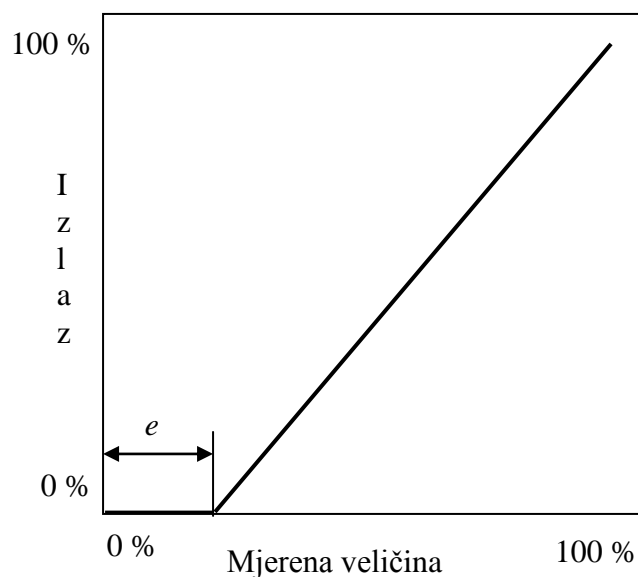
Kod nekih senzora se za kontinualnu promjenu mjerene veličine izlaz ne mijenja kontinualno. Promjena izlazne veličine može biti u nekim mjerljivim koracima za kontinualnu promjenu mjerne veličine. Ovakvo ponašanje kao rezultat daje statičku grešku koja se naziva greškom rezolucije ili rezolucijom. Rezolucija se izražava u % kao odnos najvećeg od svih koraka izlaza i



Sl.3.5

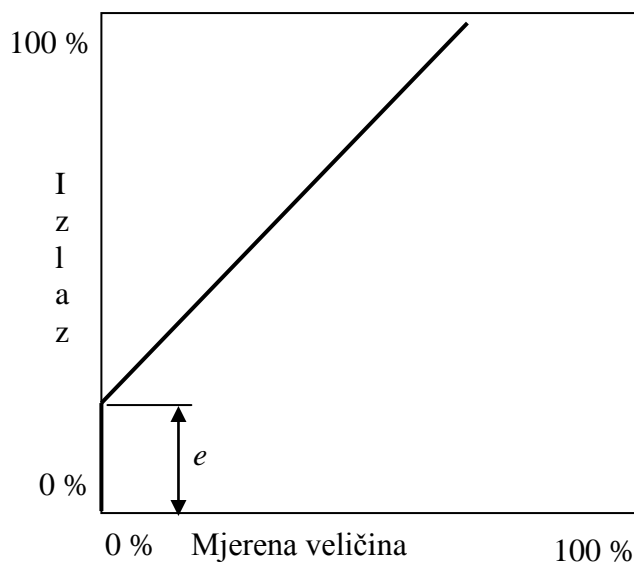
maksimalne vrijednosti izlaza. Greška rezolucije zavisno od načina aproksimacije obično je u granicama od polovine do cijelo vrijednosti rezolucije.

### Zona neosjetljivosti



SI.3.6

Zona neosjetljivosti je najmanja konačna vrijednost promjene mjerne veličine potrebna da se prouzrokuje mjerljiva promjena izlazne veličine (SI.3.6). U slučaju da se rad senzora/transdjusera zasniva na mehaničkim pomjeranjima tada je zona neosjetljivosti posljedica potrebe da se savlada sila trenja. Kada se koriste digitalni senzori/transdjuseri tada zona neosjetljivosti odgovara potrebnoj promjeni mjerene veličine da bi došlo do promjene stanja bita najmanje težine.



Sl.3.7

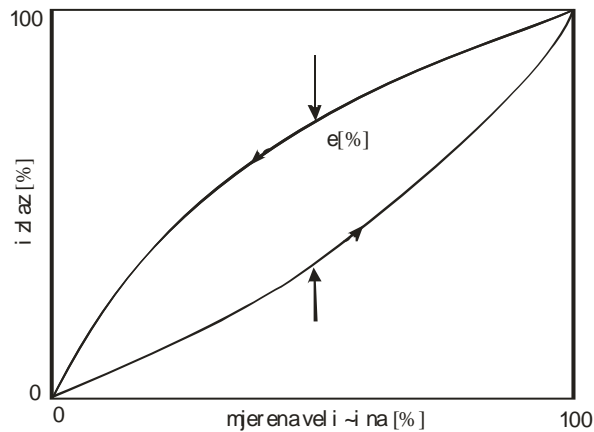
### **Offset**

Kada je mjerena veličina jednaka nuli tada je izlaz pasivnog senzora takođe jednak nuli. Ovo ne mora da vrijedi u slučaju aktivnog senzora. Vrijednost signala na izlazu senzora/transdjusera, kada je mjerena veličina jednaka nuli naziva se *offset*-om (Sl.3.7). Eliminacija *offset*-a se obično vrši tako što se ukloni dejstvo mjerene veličine (postavi se na nulu) i izlaz elementa podesi na nulu.

### **Histerezis**

Maksimalna razlika dva očitana izlaza na statičkoj karakteristici za istu vrijednost mjerene veličine, za jedan potpun ciklus kalibracije, naziva se histerezisom (Sl.3.8). Greška histerezisa se obično izražava u postotcima opsega maksimalne promjene izlaza. Histerezis je posebno prisutan pri magnećenju feromagnetnih materijala i naprezanju opruga iznad granice

elastičnosti (mehanički histerezis) kada se pri prestanku djelovanja sile javlja zaostala deformacija.



Sl.3.8 Statička karakteristika sa izraženim histerezisom

### 3.3.2 Dinamička tačnost

Statička tačnost senzora se definiše u odnosu na njegovu statičku karakteristiku, što znači da se ne uzima u obzir brzina promjene mjerene veličine. Ako su promjene mjerene veličine brze tada se zbog inercionosti pojavljuje dinamička greška:

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

gdje je  $y_s$  stacionarna vrijednost izlaza senzora/transdjusera.

Dinamička greška se može računati i u relativnom obliku:

$$\frac{y(t) - y_s}{y_s} 100 [\%] \quad \text{ili} \quad \frac{y_s - y(t)}{y(t)} 100 [\%].$$

Treba primjetiti bitnu razliku statičke i dinamičke greške. Za razliku od statičke greške koja ima fiksnu vrijednost za određeni senzor, dinamička greška

je funkcije promjenljiva u vremenu. Ona zavisi od način promjene mjerene veličine.

Preslikavanje mjerne veličine u izlaz senzora se daje diferencijalnom jednačinom oblika (ako se zanemare drugi uticaji):

$$\sum_{i=1}^n a_i \frac{d^i y}{dt^i} = \sum_{i=1}^m b_i \frac{d^i x}{dt^i} \quad (1)$$

Ako je statička tačnost senzora poznata tada se opisani nelinearni efekti uključuju u njegovo statičko ponašanje, a u analizi dinamike se pretpostavlja linearno ponašanje. Tada je pogodno njegovo dinamičko ponašanje opisati u Laplasovom području odgovarajućim funkcijama prenosa tako da vrijedi:

$$Y(s) = G(s)X(s),$$

gdje su:

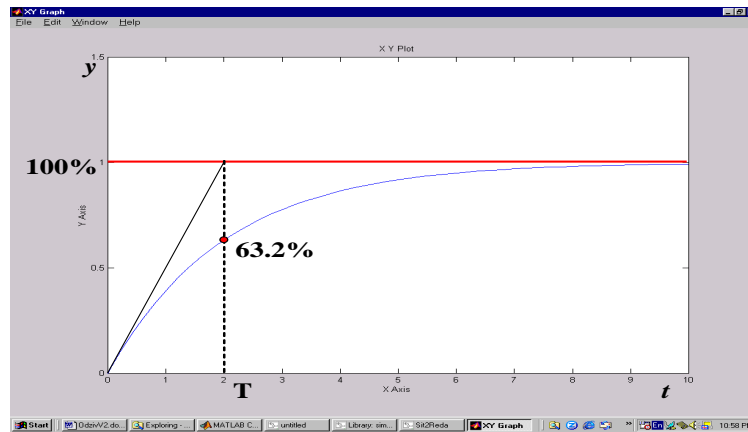
$G(s)$  – funkcija prenosa senzora,

$X(s)$  – Laplasova transformacija mjerene veličine,

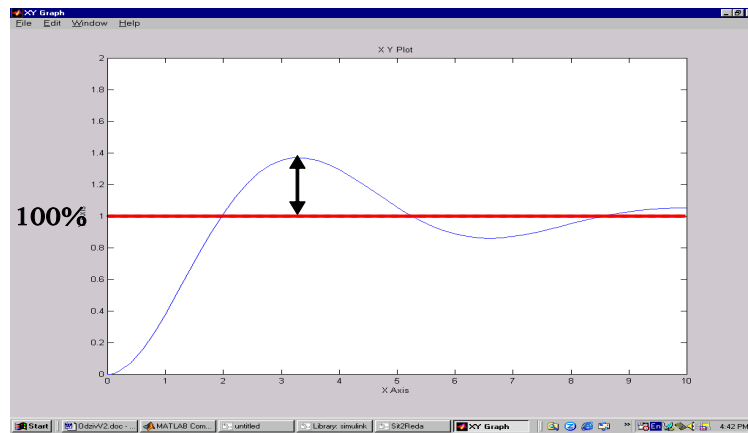
$Y(s)$  – Laplasova transformacija izlaza senzora

Dinamička greška svakog elementa zavisi od načina promjene njegovog ulaza. Iz tog razloga se ona najčešće pregledno ilustruje kroz njegov odskočni odziv. Odskočni odziv se odnosi na reakciju elementa kada se njegov ulaz sa jedne fiksne vrijednosti skokovito (teoretski trenutno) promijeni na novu fiksnu vrijednost. Parametri koji karakterišu takav odskočni odziv su: koeficijent prenosa, dominantna vremenska konstanta, kašnjenje i preskok. Koeficijent prenosa odgovara statičkom ponašanju elementa a ostali parametri karakterišu njegovu dinamiku. Podrazumijevajući da nije potrebno objašnjavati šta znači kašnjenje signala, na Sl. 3.8a je ilustrovan efekat usporenja (karakterisan vremenskom konstantom T), a na Sl. 3.8b je naznačeno postojanje preskoka. Oblik odskočnog odziva predstavljen na Sl.3.8a odgovara takozvanom aperiodskom ponašanju, a na Sl. 3.8b odgovara oscilatornom ponašanju.





Sl. 3.8a. Aperiodičan odskočni odziv senzora



Sl. 3.8a. Oscilatoran odskočni odziv senzora

Ako senzor ima aperiodski odziv njegova dinamika se može predstaviti funkcijom prenosa:

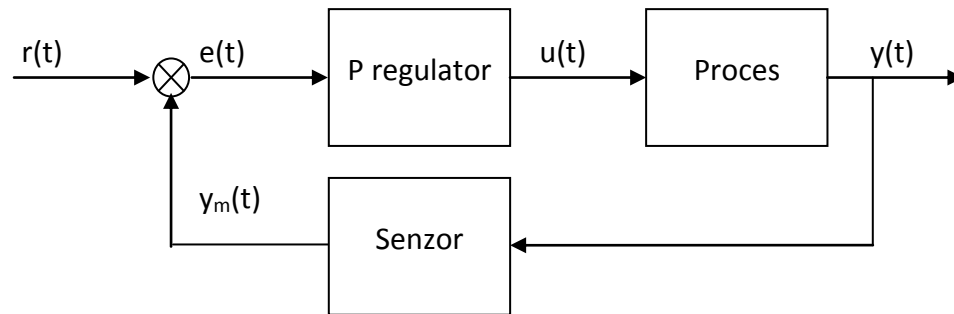
$$G(s) = \frac{1}{Ts + 1}.$$

Nepogodna dinamika mjernog elementa može vrlo negativno da utiče na performanse kompletnog sistema. Ovaj problem je ilustriran jednim jednostavnim simulacionim primjerom.

### Primjer

Sistem sa P regulatorom (strukture kao na Sl. 3.9.) simuliran je u *MATLAB*-u. Funkcija prenosa objekta je:

$$G_o(s) = \frac{1}{10s+1}.$$



Sl.3.9

Ilustrovana su dva slučaja.

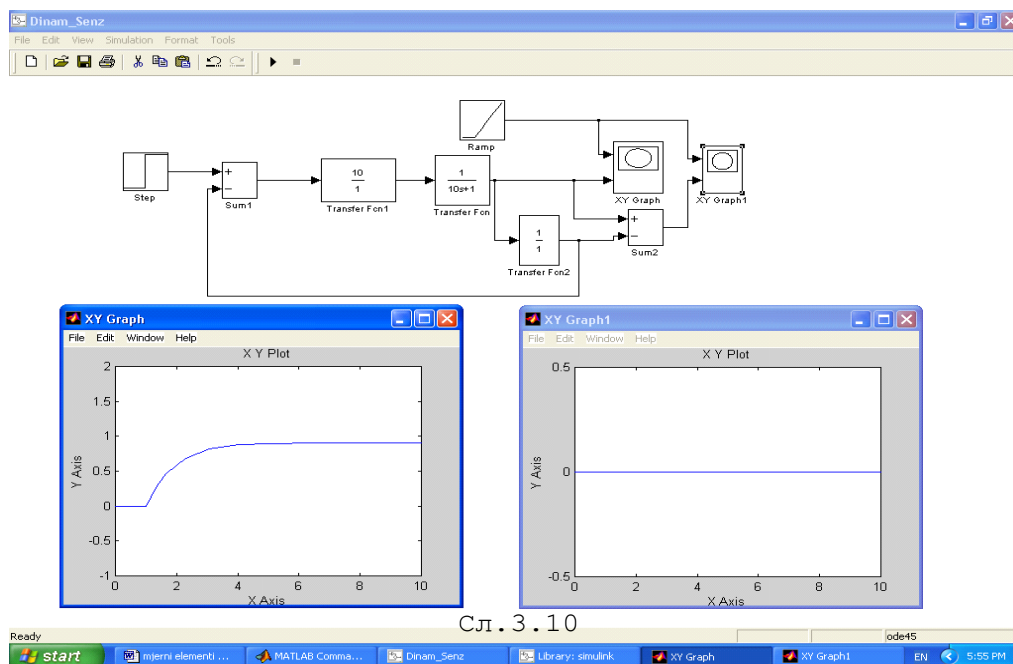
- a) P regulator je sa koeficijentom prenosa  $K=10$ . Sl.3.10 ilustruje ponašanje sistema za bezinercioni mjerni elemenat. Na Sl.3.11 i Sl.3.12 je ilustrovano ponašanje ako je dinamika mjernog elementa sa funkcijom prenosa:

$$G = \frac{1}{0.5s+1},$$

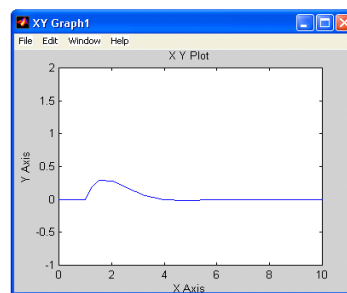
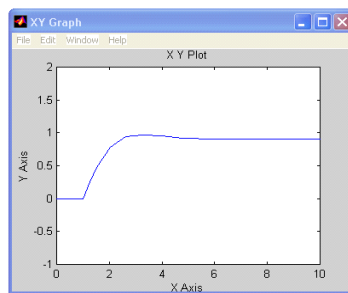
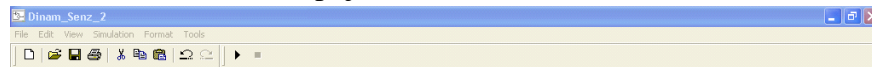
a zatim:

$$G = \frac{1}{s+1},$$

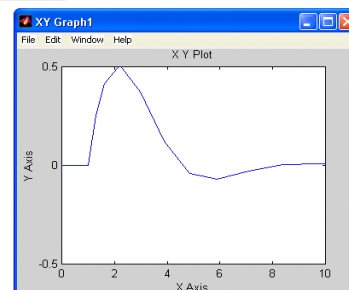
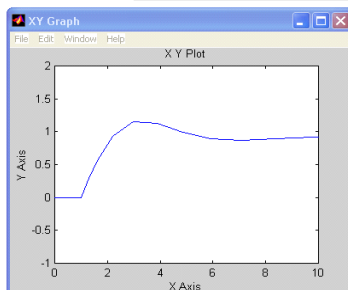
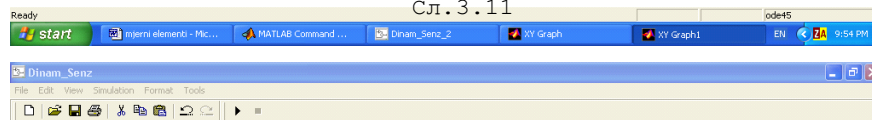
*XY Graph* ilustruje odskočni odziv sistema, a *XY Graph1* ilustruje apsolutnu dinamičku grešku mjernog elementa. Mjerni elemenat je sa aperiodskim odzivom i vremenskom konstantom dvadeset a zatim deset puta manjom od vremenske konstante objekta. Poređenjem ilustracija *XY Graph* na Sl.3.11 i Sl.3.12 u odnosu na prethodnu, očigledno je kvarenje performansi sistema zbog dinamičke greške mjernog elementa.



## 3. Osnovni pojmovi i karakteristike senzora



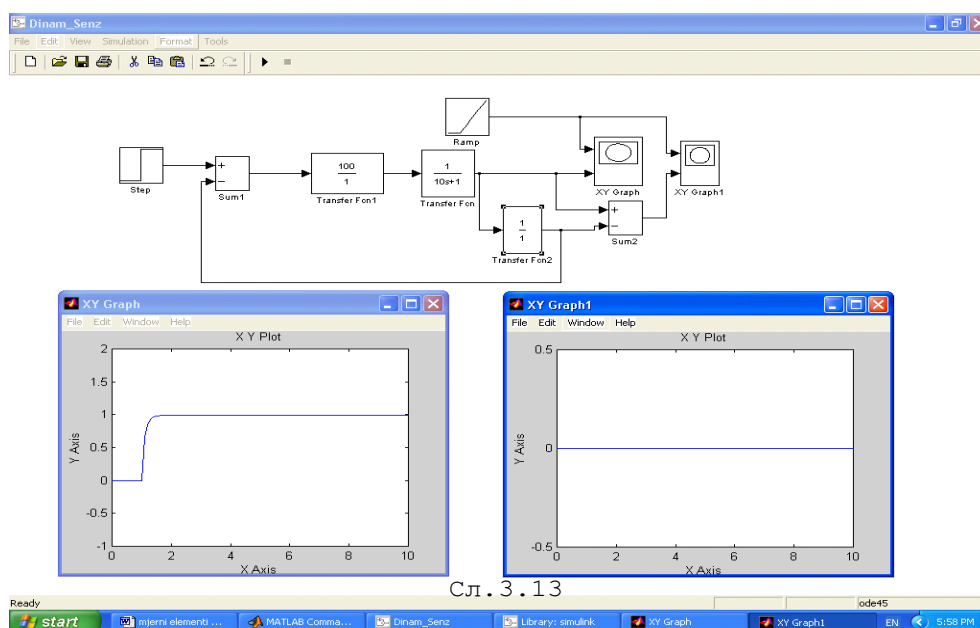
Сл. 3.11

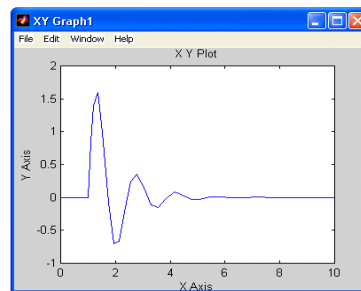
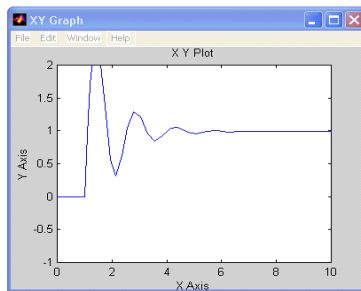
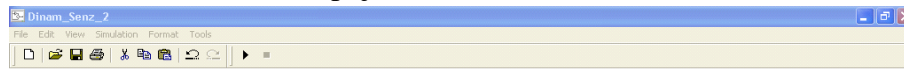


Сл. 3.12

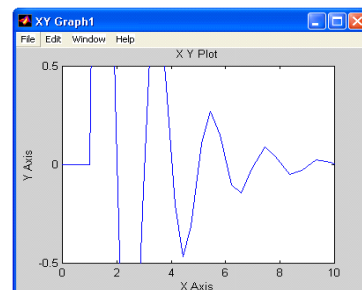
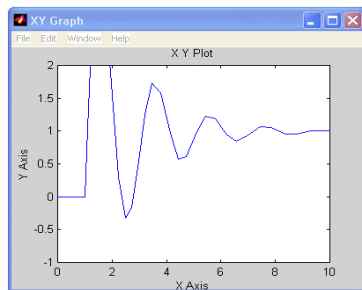
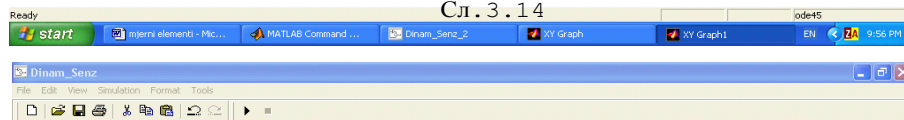


- b) P regulator je sa koeficijentom prenosa  $K=100$ . Ostali elementi odgovaraju slučaju *a*. U ovom slučaju je još drastičnije naglašen negativni uticaj loše dinamike mjernog elementa. Naime, zbog povećanja pojačanja regulatora performanse idealizovanog sistema (bez inercionosti mjernog elementa) su očigledno poboljšane (Sl.3.13). Suprotno tome inercionost mjernog elementa potpuno mijenja dinamiku sistema i daje praktično neupotrebljiv system (Sl.3.14, Sl.3.15).





Сл. 3.14



Сл. 3.15



Za sveobuhvatniju dinamičku analizu mjernih elemenata je pored njegove inercionosti potrebno u obzir uzeti uticaje drugih veličina (osim mjerene) na njegov izlaz.

Izlaz elementa u prisustvu smetnji je dat sa

$$Y(s)=G(s)X(s)+G_I(s)\eta(s)$$

gdje su  $G(s)$  i  $G_I(s)$  funkcije prenosa u odnosu na ulaznu veličinu  $x(t)$  i smetnju  $\eta(t)$ , respektivno. U tom smislu razlikujemo sopstvenu i prinudnu dinamiku elementa.

Sopstvena dinamika se pojavljuje zato što su elementi sa inercijom i ne mogu trenutno reagovati na brze promjene mjerenih veličina. Za određivanje sopstvene dinamičke greške realni elemenat se upoređuje sa idealnim. Pod idealnim se podrazumjeva takav elemenat koji ne unosi izobličenje pri transformaciji ulaza  $x(t)$ , i ne reaguje na smetnje.

Funkcija prenosa idealnog elementa je

$$G(s)=A=const.$$

Prinudnu dinamiku elementa opisuje njegovo dinamičko ponašanje u funkciji smetnji (drugih veličina koje mjerni elemenat ne mjeri ali mogu da utiču na njegov izlaz). Pošto idealni elemenat ne reaguje na smetnje to je za njega

$$G_I(s)=0$$

Za utvrđivanje dinamičke greške prema ulaznoj veličini mjerodavna je funkcija

$$\Delta G(s)=G(0)-G(s)$$

a za smetnju  $\eta(t)$  :

$$\Delta G_I(s)=-G_I(s)$$

Za smanjivanje dinamičke greške primjenjuju se različiti metodi. Najrasprostranjenije metode su: **promjena parametara**, **diferenciranje** i **korištenje povratne sprege**.

Metod promjene parametara se može ilustrovati na primjeru oscilatornog dinamičkog elementa sa funkcijom prenosa

$$G(s) = \frac{1}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2}$$

Ako se poveća  $\omega_0^2$  u poređenju sa  $2\zeta\omega_0 s$  i  $s^2$  to je  $G(s) = \frac{1}{\omega^2}$ , to jest za smanjenje dinamičke greške treba povećati  $\omega_0$  frekvenciju sopstvenih oscilacija u poređenju sa frekvencijom  $\omega$  mjerene veličine. Praktično se uzima  $\omega_0 \geq (8 \div 10)\omega$ , pošto osjetljivost  $S$  mnogo zavisi od  $\omega_0$ , to jest  $S = \frac{1}{\omega_0^2}$

Osim toga za smanjenje dinamičke greške u oscilatornom elementu primjenjuju se prigušivači, pri čemu se podešava koeficijent relativnog prigušenja u granicama  $0.7 \div 0.8$ .

Kada se koristi metoda diferenciranja, u kaskodi sa elementom funkcije prenosa  $G(s)$  veže se diferencijalni elemenat funkcije prenosa  $K(s) = \frac{C}{G(s)}$ .

Na izlazu se dobija

$$Y(s) = K(s)G(s)X(s) = CX(s),$$

to jest dinamička greška je kompenzirana. Ovo se može koristiti samo kada je vrlo malo prisustvo šuma u mjernom signalu.

Poznato je da se uvođenjem jedinične povratne sprege smanjuju varijacije izlaza sistema kada se mjenjaju njegovi dinamički parametri pa se obuhvatanjem mjernog elementa takvom vezom može smanjiti greška. Takođe se uvođenjem povratne veze može povećati brzina odziva mjernog elementa.

Za smanjivanje uticaja smetnji na mjerenje koriste se različiti filtri (ili amortizeri).