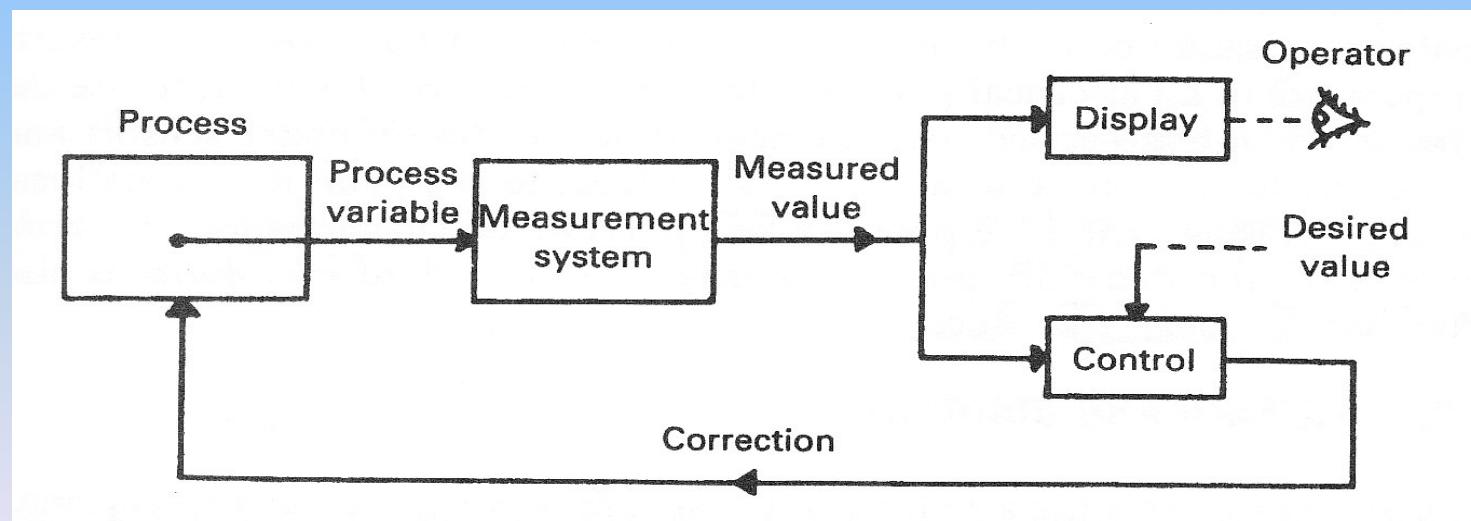


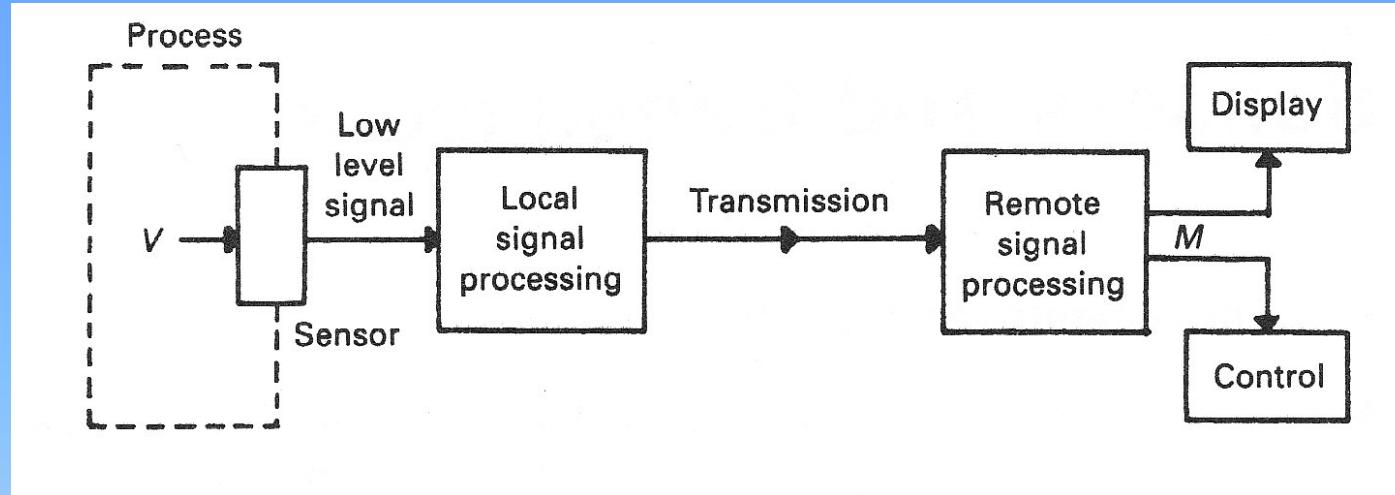
3. SENZORI I PRETVORNICI

- Precizno mjerjenje fizikalnih veličina kao što je protok, tlak, temperatura je vrlo bitan dio procesa regulacije ili sustava signalizacije i monitoringa
- Fizikalne veličine koje se mijere zovu se još i **procesne varijable (ulazni signali)**
- Procesne varijable (*ulazni signali*) pretvaraju se pomoću senzora u **izmjerene veličine** koje se dalje mogu koristiti za davanje informacija operatoru (*čovjeku*) i kao ulazne veličine za uređaje automatske regulacije



Slika 15. : Sustav signalizacije i regulacije

- Detaljniji prikaz elemenata sustava regulacije i signalizacije prikazana je na slici 16.:



Slika 16.: Elementi sustava regulacije i signalizacije

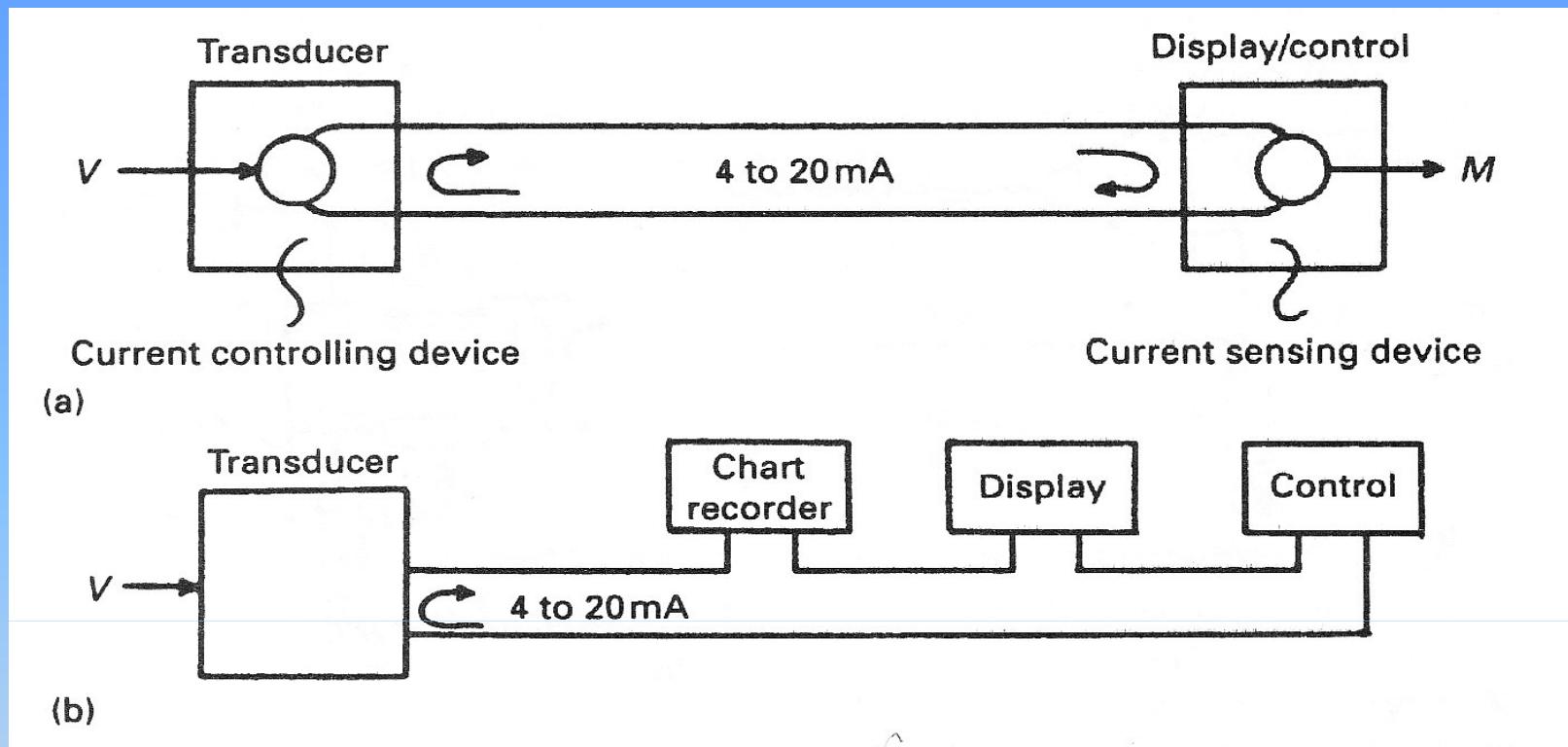
- Osjetni ili mjerni element (*senzor*) priključen je na proces i prima informacije o promjenama u procesu
- Te promjene u procesu su već navedene izmjerene fizikalne veličine koje smo nazvali procesne varijable (*odnosno ulazni signali*)

- Osjetni element se dijeli na primarni senzor i na pretvornik signala (*transducer*)
- Signal s primarnog senzora je često niskog inteziteta pa postoji lokalna obrada signala (*local signal processing*)
- Lokalnu obradu signala izvodi pretvornik (*transducer*) koji pretvara jedan oblik fizikalne veličine u drugi oblik (ovaj drugi oblik je analogni prikaz mjerene fizikalne veličine)
- U jednostavne lokalne obrade signala spada i filtriranje signala
- Primjer takvih pretvaranja je npr. pretvaranje impulsa s turbinskog mjerača protoka u ekvivalentni električni napon

- Riječ *pretvornik (transducer)* označava dio mjernog uređaja odnosno osjetnog elementa koji je namjenjen obradi signala
- Riječ *transmiter (transmitter)* često označava kompletan mjerni uređaj tj. osjetni element (senzor + transducer)
- Pretvornik uz to i pojačava signal na njegovom putu prema uređajima za regulaciju i signalizaciju
- Analogni signal se dalje prenosi do uređaja daljinske obrade signala (remote signal processing) gdje se obavlja znatno složenija obrada i procesiranje signala
- U složenije obrade spada pretvorba signala iz analognog oblika u digitalni

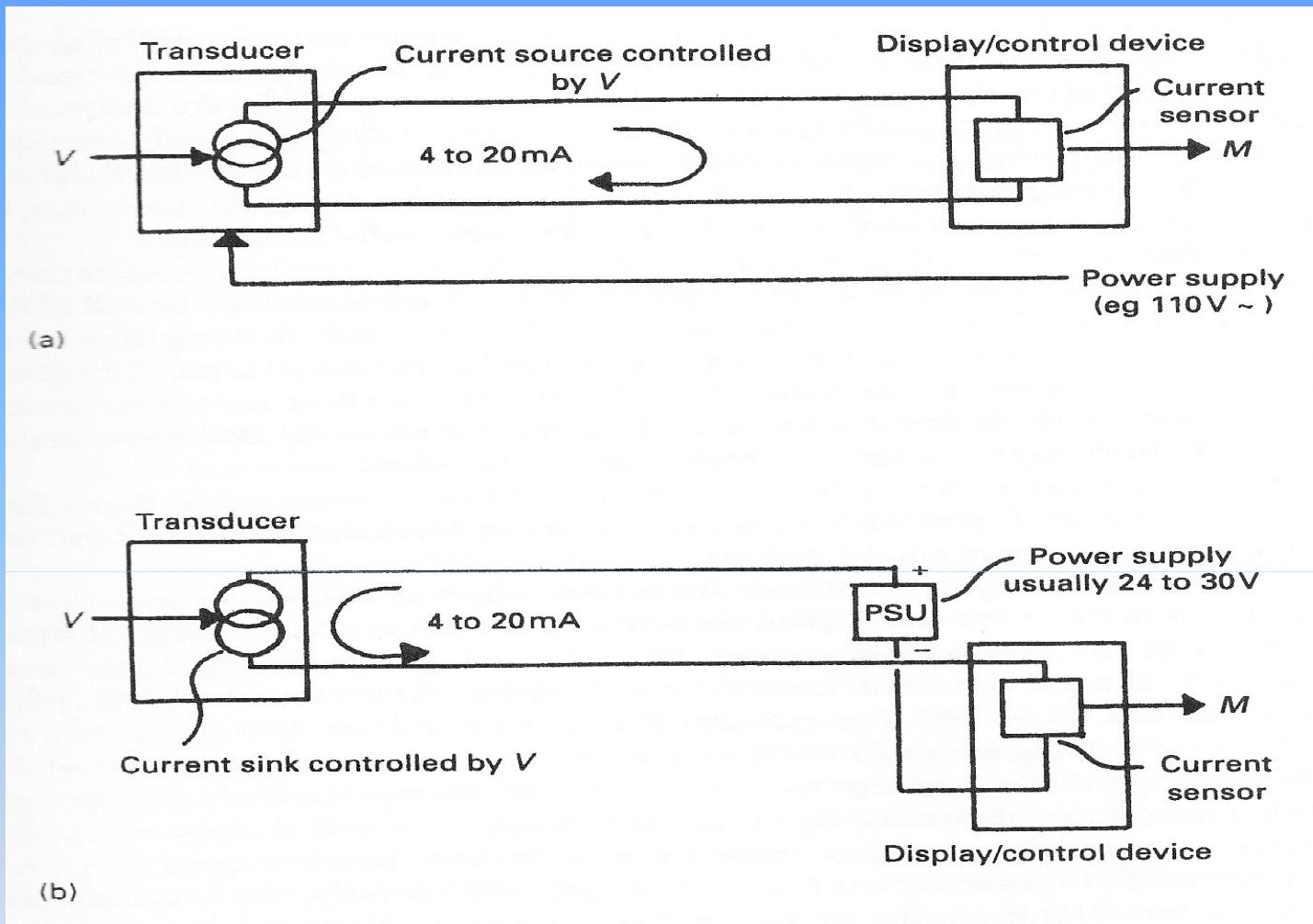
- U većini sustava uređaj za daljinsku obradu signala smješten je zajedno s uređajem za regulaciju i prikaz signala (display and control device)
- U uređaju za daljinsku obradu signala prisutan je još i proces linearizacije signala i računalne korekcije
- Prijenos signala iz transmitera do daljinske obrade signala je vrlo važan i nažalost neizbjježno generira pogreške u sustavu mjerena
- Kao prijenosnici signala obično se koriste električni kabeli (za napon i jakost), pneumatske cijevi (sustav pneumatike), fibrooptički kabeli ili radio veza
- Pogreške se javljaju uslijed šuma i impedancije kabela kod električnih sustava ili uslijed neizbjježnog propuštanja kod pneumatskih sustava

- Svi načini prijenosa signala od transmitera do daljinske obrade signala neizbjježno izazivaju zaostajanje signala u sustavu (produžuje se vrijeme reakcije uređaja regulacije na mjereni signal)
- Energija upotrijebljena u sustavima prijenosa signala najčešće slijedi elektronički standard koji je od 4 mA do 20 mA u strujnoj petlji
- To znači da signal može imati raspon jakosti od 4 do 20 mA (miliampera)
- Prijenosna signalna strujna petlja najčešće nije uzemljena što omogućuje izvrsnu otpornost na šumove, te se izbjegavaju greške prouzročene različitim zemljinim potencijalima na različitim mjestima na planetu
- Nekoliko uređaja sustava regulacije može biti spojeno u seriju s sustavom prijenosa signala, s tim da ukupni otpor svih tih uređaja ne prelazi ukupni otpor pretvornika (uobičajeno oko $1\text{ k}\Omega$)



Slika 17.: Sustav prijenosa s jakosti 4 do 20 mA strujne petlje

- Prevornici mogu imati poseban izvor energije ili biti projektirani s dvonamjenskim kabelima prijenosa signala (kabeli služe i kao prijenosnici signala i kao prijenosnici energije)



Slika 18.: Strujne petlje:
 a) prijenosnici s posebnim izvorom energije
 b) prijenosnici s dvonamjenskim kabelima

- Na slici 18 a) prikazan je pretvornik s posebnim izvorom energije koja najčešće iznosi 110 V , te se od te energije u pretvorniku generira struja jakosti od 4 do 20mA ovisno o mjerrenom signalu
- U ovom slučaju kabeli sustava prijenosa signala služe samo za prijenos signala od pretvornika do display/control uređaja
- U slučaju 18 b) koji je prvenstveno jeftiniji za instalaciju, u sustavu prijenosa signala, lokalno se nalazi jedinica izvora energije koja daje struju napona između 24 i 30 V istosmjernog napona (DC – direct current)
- Pretvornik registrira napon i dio napona pridružuje u ispravnoj vrijednosti procesnoj varijabli (signalu) dok drugi dio napona koristi za napajanje vlastite elektronike

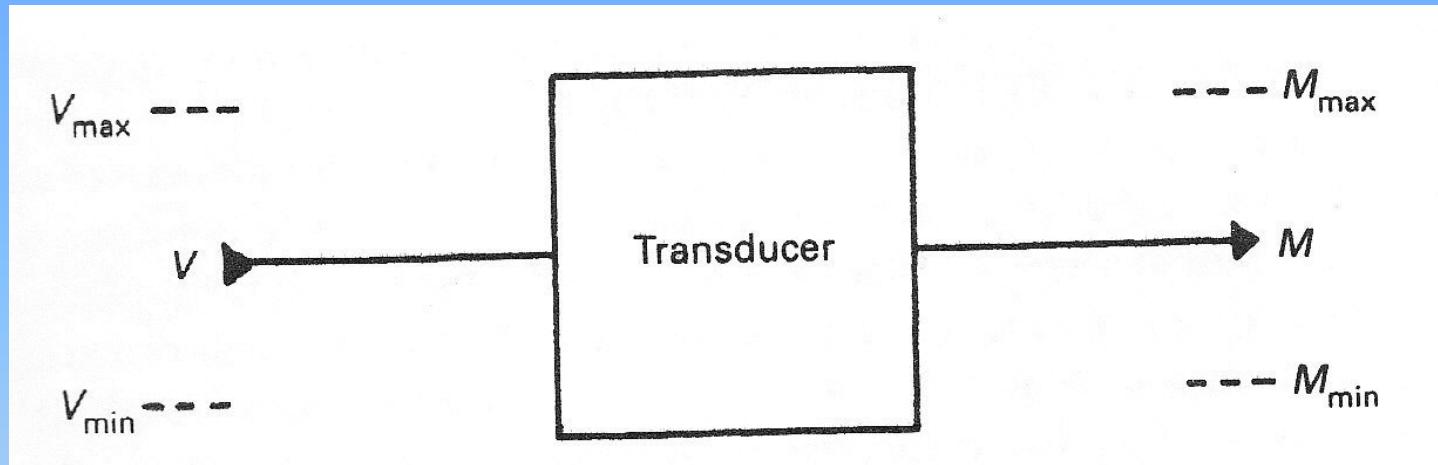
- U ovom slučaju isti strujni kabeli se koriste za prijenos signala od pretvornika do display/control uređaja i za opskrbu energijom pretvornika
- Većina komercijalnih reguzacijskih uređaja ima izvor energije pogodan i za pretvornike s posebnim izvorom energije i za one s dvonamjenskim kabelima
- Postoje također izvedbe gdje jedan izvor energije može opskrbljivati nekoliko pretvornika, ali s određenim gubitkom kroz izolaciju kabela
- Kao nulta vrijednost signala uzima se vrijednost od 4 mA, a ne 0 mA, te takav pristup ima nekoliko prednosti:
 - *kod dvonamjenskih kabela pretvornik ima sigurno napajanje i kad je vrijednost signala "nula"*
 - *kod kratkog spoja strujnog sustava vrlo je lako detektirati nastali kratki spoj*
 - *bilo kakva pogreška na strujnom krugu od 4-20 mA izaziva "negativni" signal na displeju koji je također lako uočiti*

- Iako je sustav s 4-20 mA najčešći električni standard i drugi se nalaze u upotrebi
- Među ostalima koristi se sustav s 10-50 mA, također s nultom vrijednošću od 10 mA
- Kod pneumatskih sustava koriste se vrijednosti prijenosa signala od 20-100kPa (0,2-1,0 bar), gdje se također uzima da je nulta vrijednost 20 kPa
- Ulazni signal, odnosno procesna varijabla X_u , u nastavku će se označavati kao V
- Analogna vrijednost procesne varijable V zove se izmjerena vrijednost M
- Postoji uvijek problem kod pretvorbe fizikalne veličine procesne varijable V u izmjerenu vrijednost (*izmjereni signal*) M jer se pri pretvorbi neizbjegno javljaju pogreške

- Savršena pretvorba fizikalnih veličina u analogne je nemoguća te stoga postoji kod svakog sustava dopuštena vrijednost pogreške pretvorbe
- Kod temperaturnih mjerena vrijednost takvih pogrešaka dopuštaju se u vrijednostima koje iznose $\pm 2^\circ\text{C}$
- Kod mjerena razina neke tekućine tolerantne vrijednosti kreću se $\pm 10 \text{ mm}$
- Procesni inženjer mora biti u stanju predvidjeti takve pogreške u sustavu mjerena da bi se osigurala veća točnost uređaja regulacije, ali ne inzistira se na velikoj točnosti tamo gdje to nije absolutno nužno

DOMET I RASPON PRETVORNIKA

- Domet je vrijednost definirana sa svojom maksimalnom i minimalnom vrijednošću



Slika 19.: Domet i raspon pretvornika

- Na slici 19. vidi se da je ulazni domet od V_{\min} pa do V_{\max} , a da je izlazni domet od M_{\min} pa do M_{\max}
- Tako npr. pretvornik tlaka ima ulazni domet od 0-100 kPa a izlazni domet od 4-20 mA

- I jednostavni senzor također se opisuje s dometom (npr. termopar ima ulazni domet od 200-500°C a izlazni domet od 8-20mV)
- Raspon je razlika između maksimalne i minimalne vrijednosti
- Ulagni raspon je razlika : $V_{\max} - V_{\min}$
- Izlazni raspon je razlika : $M_{\max} - M_{\min}$
- Npr. prethodno spomenuti termopar ima ulazni raspon od 300°C a izlazni raspon od 12 mV

LINEARNI I NELINEARNI UREĐAJI

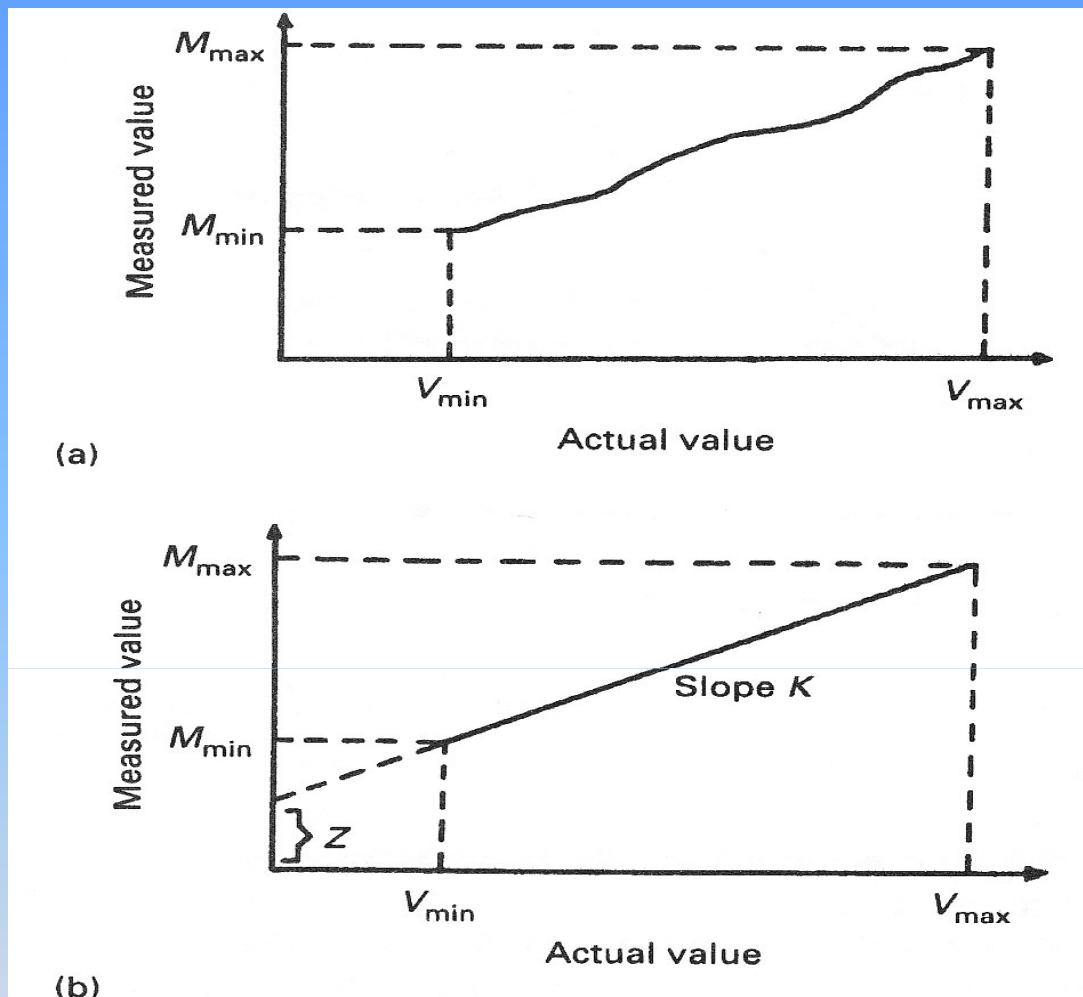
- Ako se veza između ulaznog signala **V** i izmjerene veličine **M** želi prikazati grafički tj. želi se nacrtati na grafu, dobit će se rezultat kao na slici 20.a)
- Idealna veza između tih dviju vrijednosti bila bi kao na slici 20.b) i imala bi matematički oblik:

$$M = KV + Z \quad (1)$$

- Gdje je **K** faktor osjetljivosti i dat je izrazom:

$$K = M_{\max} - M_{\min} / V_{\max} - V_{\min} \quad (2)$$

- Jedinica od **K** će biti jednaka **M/V** odnosno npr. **mA/kPa** za pretvornik tlaka u električni napon



Slika 20. Veza između vrijednosti V i M : a) stvarna veza, b) idealizirana veza

- Z je "nulta" vrijednost pretvornika i data je jednadžbom:

$$Z = M_{\min} - K * V_{\min} \quad (3)$$

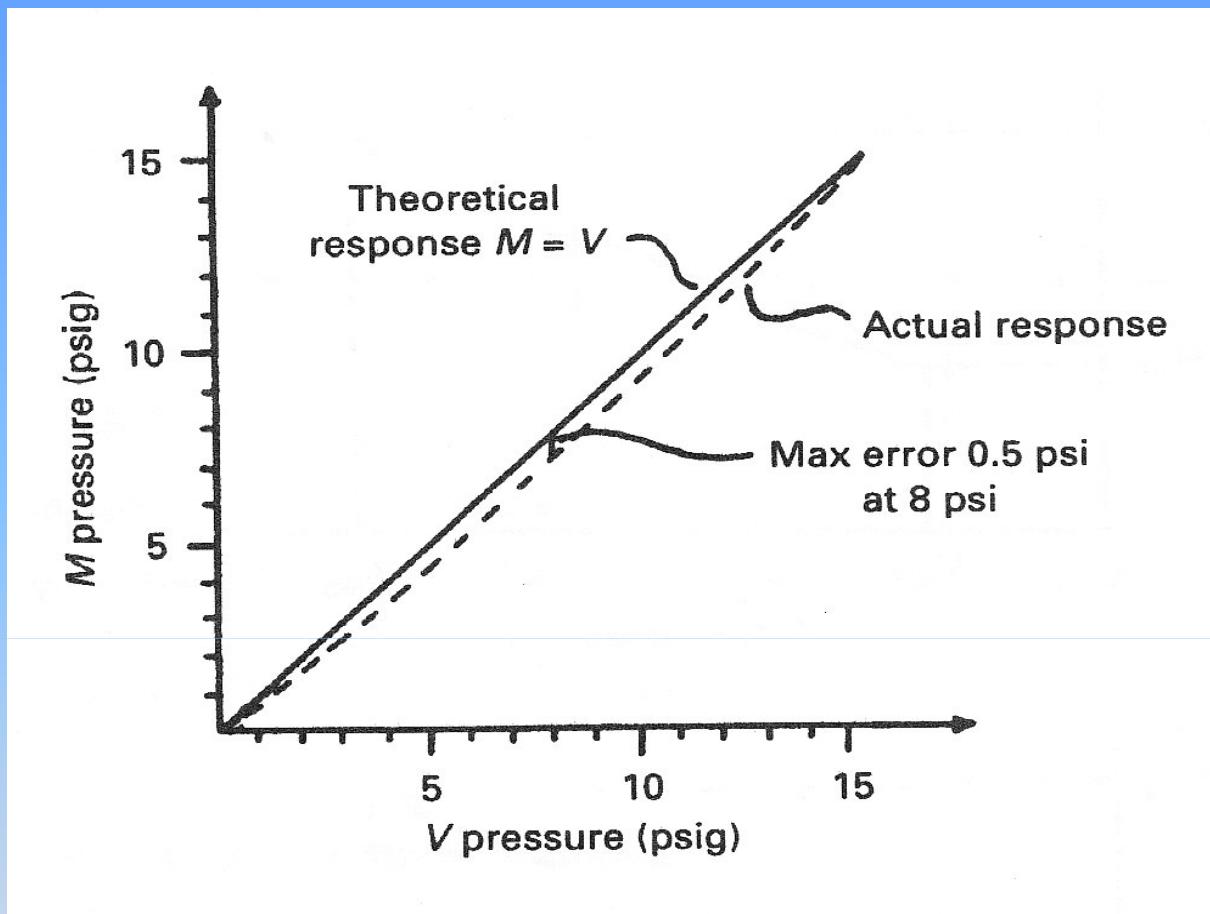
- Za uređaj koji se može predstaviti jednadžbom (1) i s tolerantnom greškom kaže se da je linearni uređaj
- Ako se veza između varijabli **V** i **M** ne može predstaviti jednadžbom (1), kaže se da je to nelinearni uređaj
- Uređaji s poznatim nelinearnostima mogu se učiniti linearnima pomoću prikladnih obrada signala
- Npr. izmjerena vrijednost kod prigušnice je kvadratna potencija između varijabli **V** i **M**:

$$\mathbf{M} = \mathbf{A} * \mathbf{V}^2 \quad (4)$$

- U jednadžbi (4) **A** je konstanta i označava površinu protoka
- Signal s prigušnice prolazi kroz matematički proces vađenja drugog korjena , te se tako postiže proces linearizacije
- Mnogi uređaji mogu se linearizirati na sličan način

PRECIZNOST I POGREŠKA

- Preciznost je izraz koji nam govori koliko je blizu izmjerena vrijednost prema procesnom varijabli (ulaznom signalu)
- Češći izraz u automatizaciji od preciznosti je izraz pogreška
- Pogreška je definirana kao maksimalna razlika koja se može zbiti između procesne varijable i izmjerene vrijednosti
- Pogreška se može manifestirati na mnogo načina
- Najčešći načini su da se absolutna vrijednost maksimalne pogreške može definirati kao:
 - *npr. odstupanje od $\pm 2^{\circ}\text{C}$ neovisno od ukupne vrijednosti*
 - *kao postotak stvarne vrijednosti procesne varijable*
 - *kao postotak vrijednosti mjerne skale mjernog uređaja
(ovo se uobičajeno zove FSD – full scale deflection)*

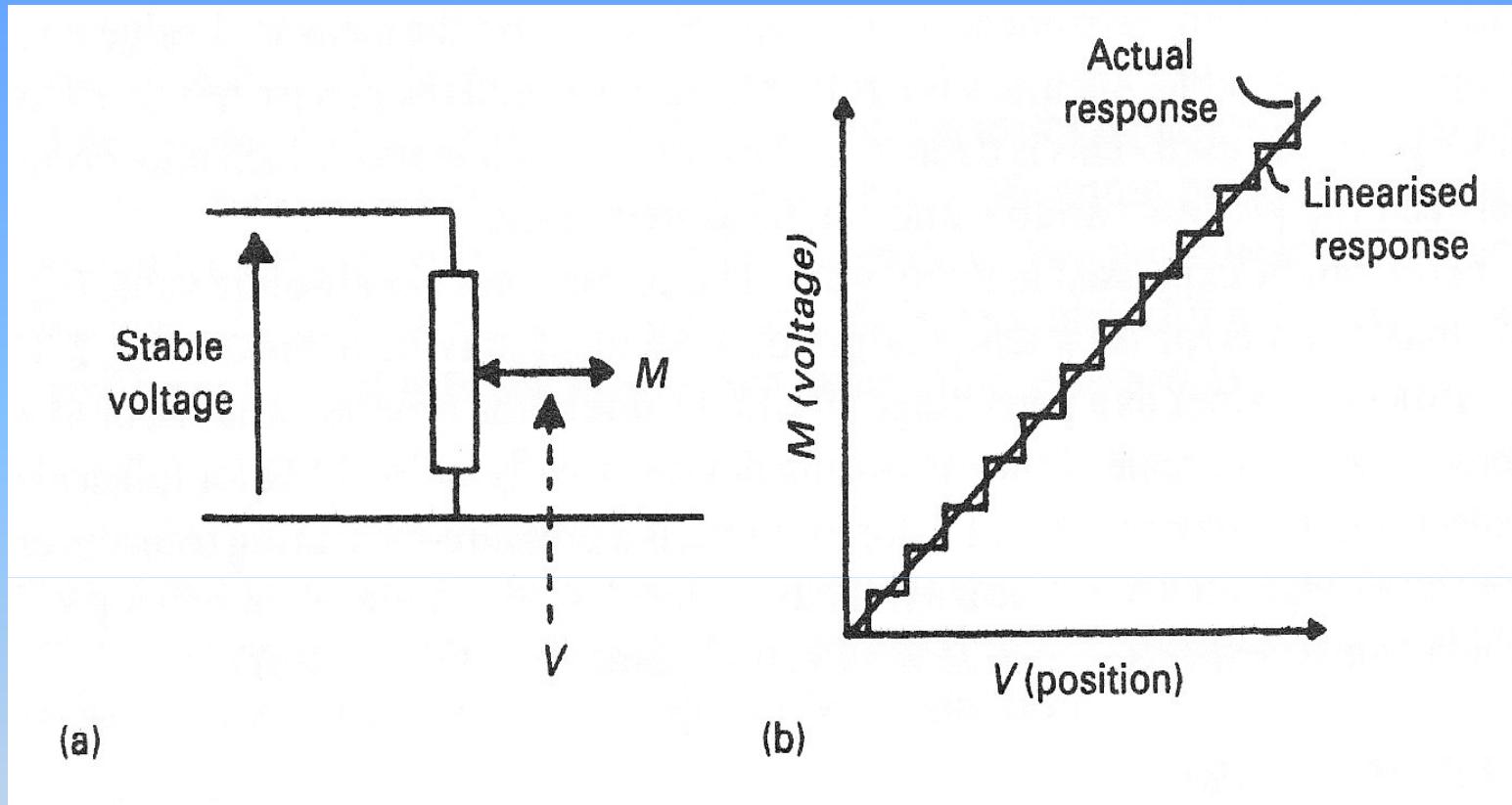


Slika 21. : Pogreška pretvornika kao razlika između stvarne i idealne veze između parametara V i M

- Na slici 21. i vrijednost izmjerene veličine **M** je izražena u tlaku iako je u stvarnosti ta vrijednost pretvorena u električni signal u pretvorniku

REZOLUCIJA

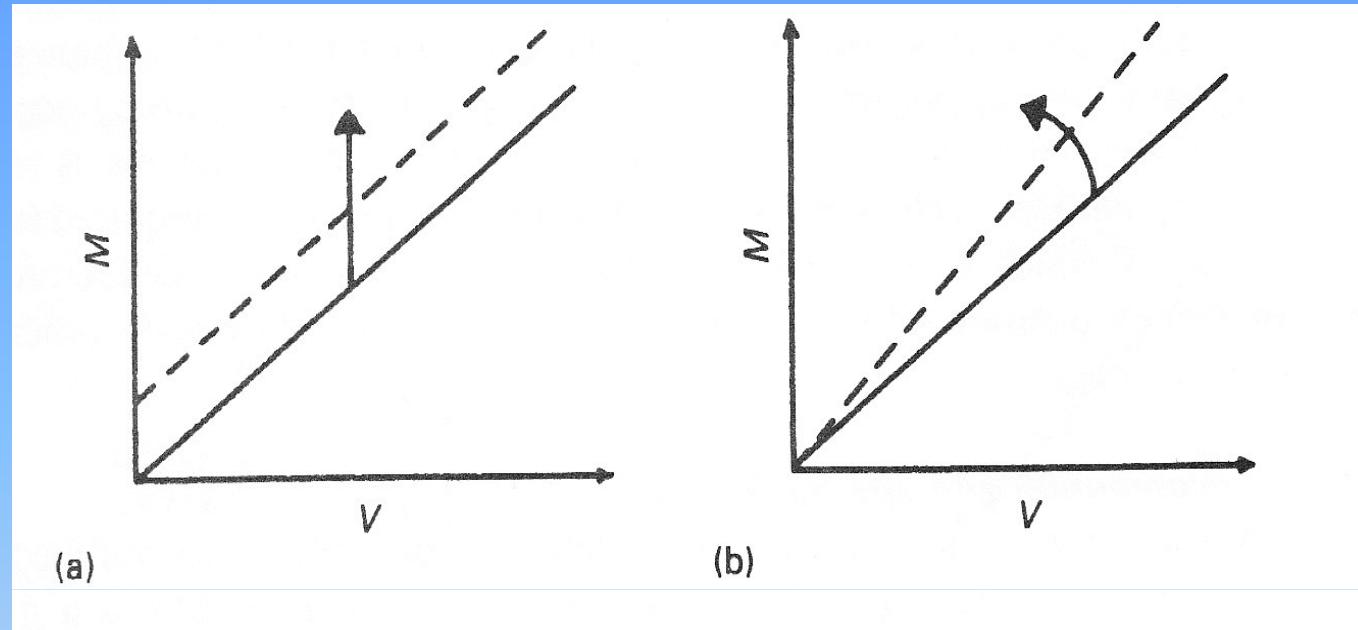
- Mnogi uređaji imaju konstrukcijsku odnosno prirodnu krutost u sposobnostima mjerena
- Na slici 22. prikazane su veze između procesne varijable **V** i izmjerene varijable **M** mjerene potenciometrom kao senzorom
- Potenciometar daje konstrukcijski uvjetovane skokovite vrijednosti kao na slici 22.b) koje se procesom linearizacije mogu linearizirati
- I potpuno digitalni sustavi imaju skokovite izlazne signale
- Pojam rezolucija definira te "skokove" za koje se može obaviti očitanje vrijednosti
- Rezolucija može biti manje ili veća od konstrukcijske pogreške
- Veličina rezolucije postaje važna kada se moraju obaviti usporedbe rezultata
- I slabije precizni uređaj s dobrom rezolucijom može se koristiti za usporedbu dviju vrijednosti da bi se ustvrdilo da li vrijednosti opadaju ili rastu



Slika 22.: Pretvornik s visokom rezolucijom

- U mnogim primjenama, točnost mjerenja signala je manje važna od dosljednosti mjerenja
- Npr. proces treba održavati na određenoj temperaturi, te je bitnije održavati proces na **istoj** temperaturi određeni period nego poznavati podatak o veličini temperature s jako visokom preciznošću
- Dosljednost mjerenja je definirana izrazom **repeatability (svojstvo ponavljanja)**
- Repeatability (*svojstvo ponavljanja*) je definirano kao razlika u očitanjima koja se pojavljuje kada se do iste točke mjerenja dolazi nekoliko puta ali iz različitih smjerova
- Što je razlika u očitanjima manja, svojstvo ponavljanja je bolje te je i sama dosljednost senzorskog dijela uređaja automatske regulacije viša

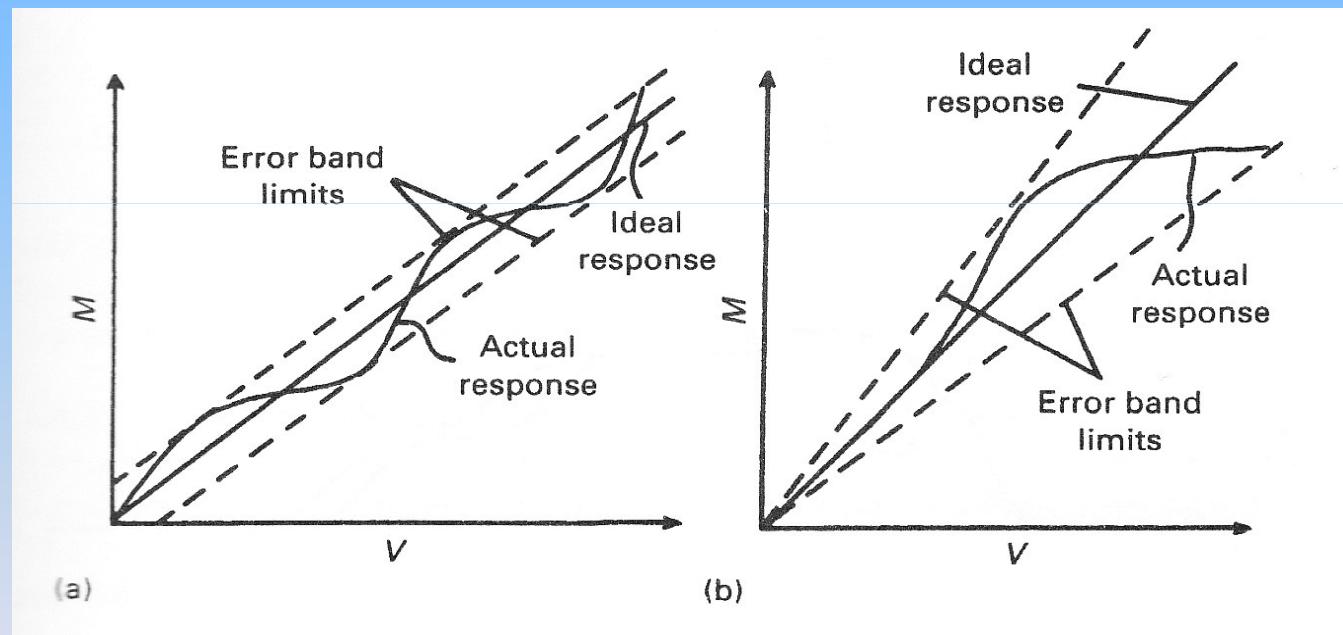
- Svaki pretvornik (*transducer*) sadrži specifikacije o mogućim pogreškama koje se mogu pojaviti kod svježe kalibriranog instrumenta pri nepromjenljivim radnim uvjetima (kao što su: konstantna okolišna temperatura, konstantan električni napon ili konstantan tlak upravljačkog zraka)
- Preciznost pretvornika će biti narušena s promjenama okolišnih uvjeta (degradacija preciznosti)
- Pogreška uslijed okolišnih uvjeta zove se **nulta pogreška (zero error)** ili **pogreška raspona (span error)**
- Osim utjecaja okoliša na izazivanje ovih pogrešaka, i starost uređaja utječe na njih
- Okolišne pogreške definirane su kao postotne pogreške za određenu promjenu okolišnih varijabli (okolišnih fizikalnih veličina)



*Slika 23.: Utjecaji okolišnih promjena i starenja uređaja:
a) nulta pogreška, b) pogreška raspona*

- Kod većine uređaja svi utjecaji navedeni do sada (slučajevi linearnosti i nelinearnosti, pogreške, rezolucija, svojstvo ponavljanja, okolišne pogreške) su maleni i pojedinačno teško mjerljivi

- Proizvođači zato daju specifikacije po uređaju za **ukupnu pogrešku** (*total error, error band*), vrijednost koja uključuje sve navedene pogreške
- Vrijednost ove pogreške izražava se kao postotak mjerene vrijednosti ili kao postotak FSD (*full scale deflection*)



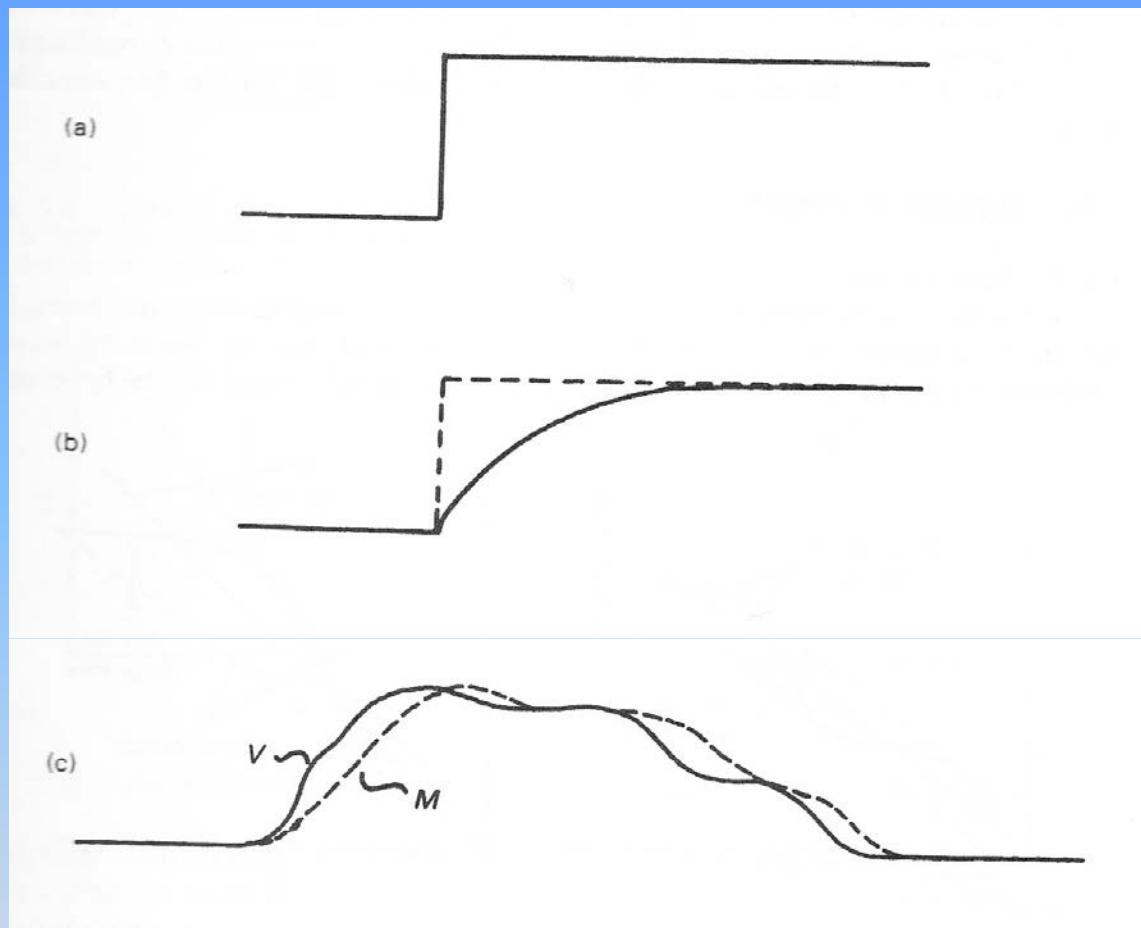
Slika 24.: Definicije ukupne pogreške: a) postotak vrijednosti FSD
b) postotak vrijednosti mjerene varijable

DINAMIČKI UTJECAJI

- U prethodnom dijelu razmatrane su statičke karakteristike pretvornika, tj. mjerjenje signala koji se ne menjaju s funkcijom vremena
- U mnogim procesima procesna varijabla se brzo mijenja i pretvornici moraju brzo slijediti ovakve promjene procesnih varijabli (ulaznih signala)

SUSTAVI PRVOG REDA

- Kada se temperaturni senzor s okolišne temperature od 20°C odjednom uroni u vodu temperature 80°C , osjetit će skokovitu promjenu procesne varijable kao što je prikazano na slici 25 a).
- Indicirana temperatura (ako zanemarimo pogreške) slijediti će krivulju kao na slici 25 b.), s kašnjenjem uzrokovanim vremenom potrebnim da se sam senzor zagrije na novu temperaturu (na temperaturu vode od 80°C u koju je naglo uronjen)
- Rast krivulje na slici 25 b). proporcionalan je razlici između trenutne vrijednosti procesne varijable V i konačne vrijednosti V_f



Slika 25.: Djelovanje sustava prvog reda:
a) skokovita promjena procesne varijable V
b) izmjerena promjena M
c) reakcija na sporu promjeni procesne varijable V

- Može se napisati:

$$dV/dt = K(V_f - V) \quad (5)$$

- Gdje je **K** konstanta

- Rješavanje jednadžbe (5) daje:

$$V = V_f - (V_f - V) \exp(-Kt) \quad (6)$$

- Jednadžba (6) se može praktičnije napisati zamjenjujući konstantu **K** s izrazom **1/T** i gdje se **T** zove vremenska konstanta:

$$V = V_f - (V_f - V) \exp(-t/T) \quad (7)$$

- Vrijednost **exp(-t/T)** približava se nuli kako **t** postaje veći, pa se vrijednost **V** približava **V_f** kao što je prikazano na slici 25 b).

- Jednadžba (7) je odgovor **linearnog sustava prvog reda**

- Vremenska konstanta **T** određuje kašnjenje (npr. procesna varijabla **V** dostiže 63% vrijednosti **V_f** u vremenu **T**)

<i>Time</i>	<i>Percentage difference reduced</i>
T	63
$2T$	86
$3T$	95
$4T$	98
$5T$	99

Slika 26.: Izjednačavanje varijabli V i V_f za vremensku konstantu T

<i>Time(s)</i>	<i>Reading (°C)</i>
4	57.8
8	71.6
12	77.0
16	78.8
20	79.4

Slika 27.: Izjednačavanje mjerene temperature sa stvarnom u funkciji vremena

SUSTAVI DRUGOG REDA

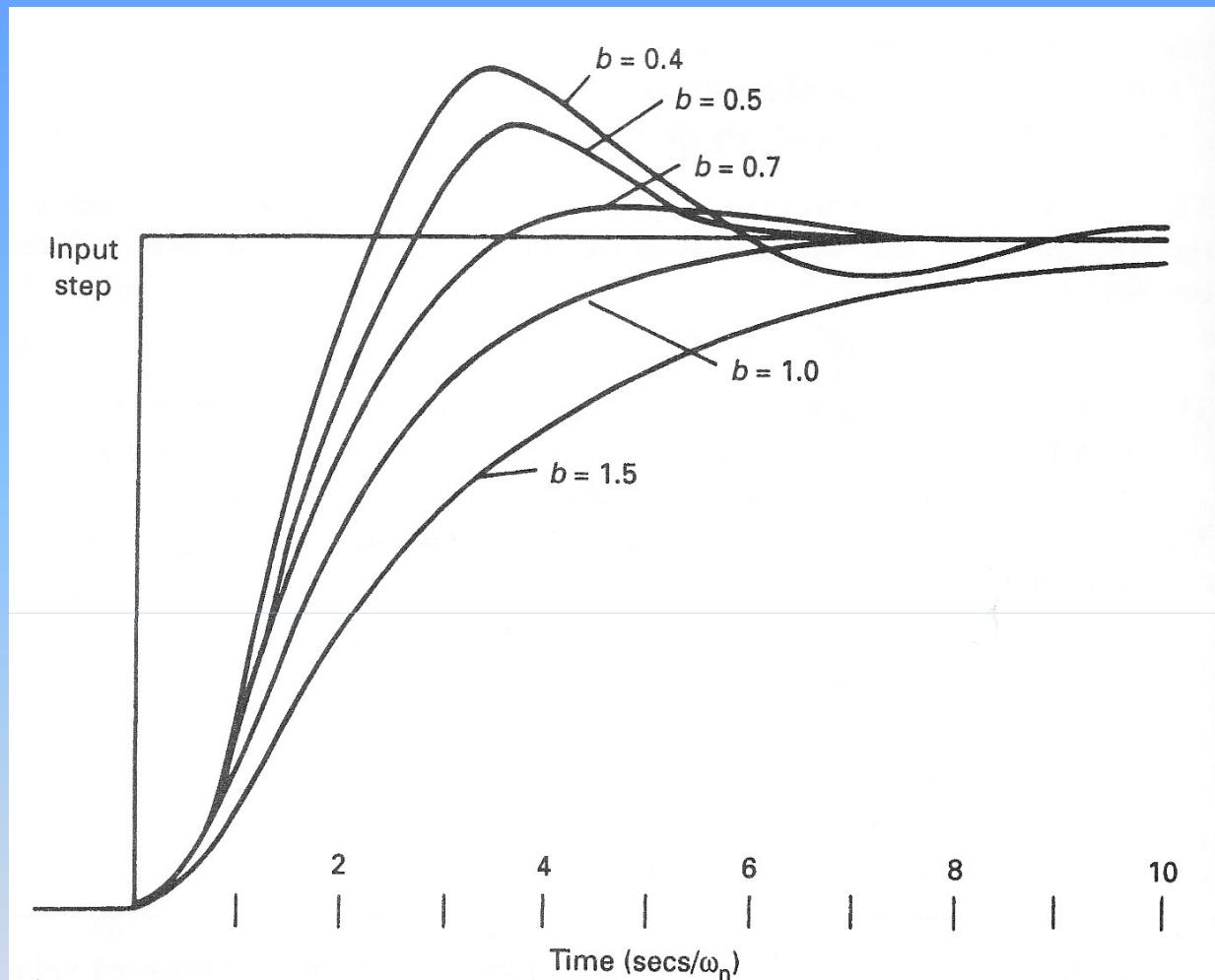
- Reakcija sustava drugog reda zbiva se kada je pretvornik analogno povezan s senzorom koji mjeri fizikalnu veličinu (s mehaničkom oprugom ili s električnim krugom)
- Reakcija sustava drugog reda na skokovitu promjenu a procesne varijable data je jednadžbom drugog reda:

$$d^2x/dt^2 + 2b\omega_n dx/dt + \omega_n^2 x = a \quad (8)$$

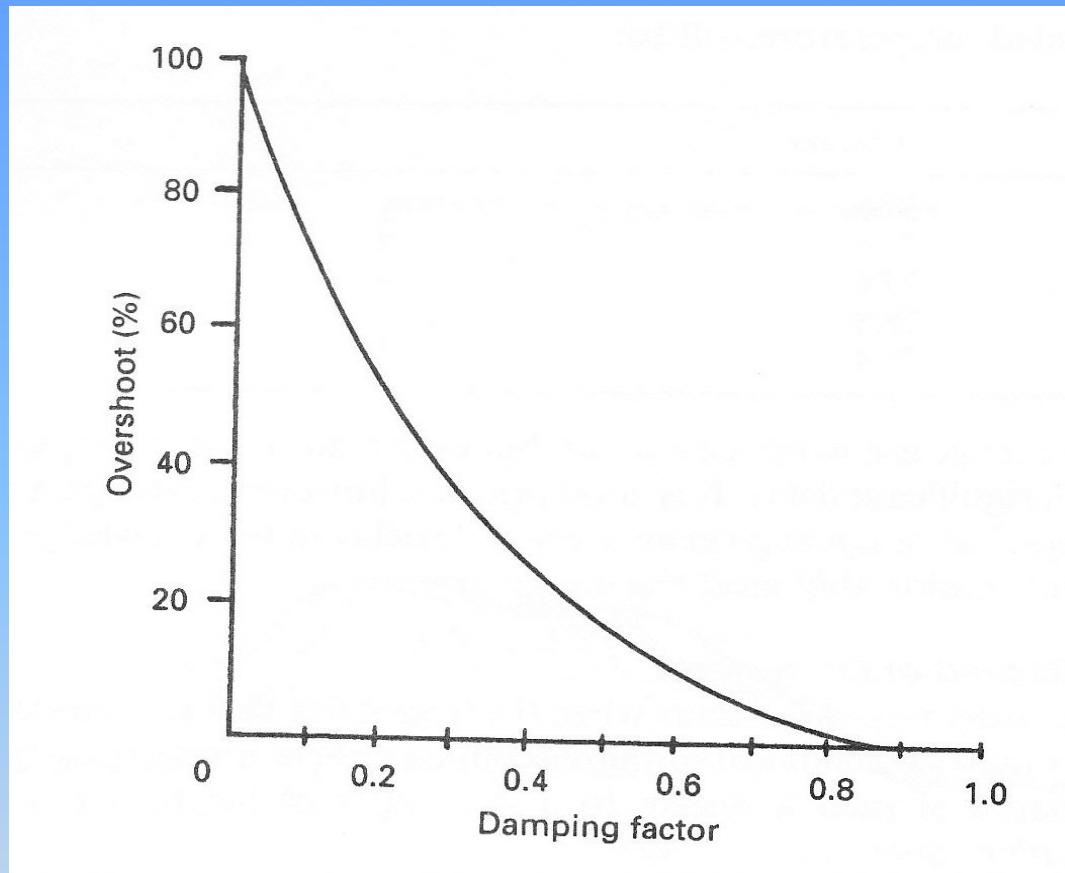
- b se naziva faktor prigušenja (damping factor), a ω_n se zove prirodna frekvencija
- Odgovor na skokovitu procesnu varijablu ovisi i od b i od ω_n , gdje b određuje prekoračenje (overshoot) izmjerene varijable M u odnosu na procesnu varijablu V, a ω_n određuje brzinu odgovora, kako je prikazano na slici 28.
- Može se primjetiti da za vrijednosti $b < 1$ oscilacije prigušivanja izazivaju prekoračenje kao na slici 29.
- Vrijeme u kojem se zbiva prekoračenje dato je jednadžbom:

$$T = 1/2f_n [(1 - b^2)]^{0.5} \quad (9)$$

- gdje je: $f_n = \omega_n / 2\pi$



Slika 28.: Odgovor na skokovitu promjenu ulaznog signala za razlicite faktore prigušenja



Slika 29.: Prekoračenja u ovisnosti od faktora prigušivanja

- Kada je vrijednost $b > 1$ ne događaju se prekoračenja, a slučaj da je $b = 1$ naziva se **kritično prigušivanje** i predstavlja najbrži odgovor bez prekoračenja za datu prirodnu frekvenciju