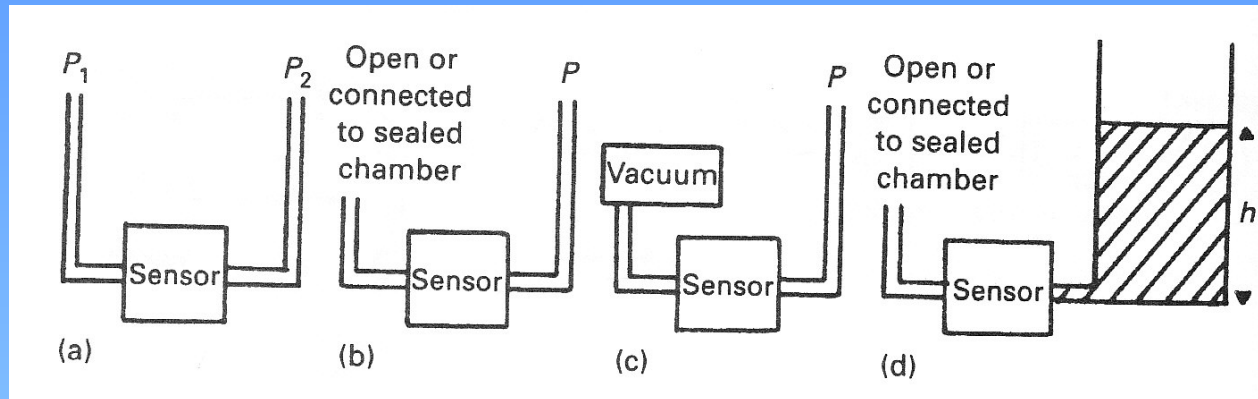


5. MJERENJE TLAKA

- Tlak se mjeri senzorima tlaka (tlak je definiran kao sila po površini)- manometrima
- Izmjereni tlaka fluida u mirovanju zove se **statički tlak** , a fluida u gibanju se zove **dinamički tlak** (ovisi o brzini protoka)
- Postoji nekoliko oblika izmjerenog tlaka:
 - **diferencijalni tlak**: razlika između dva tlaka kojima je izložen senzor (transmiteri ovakvog tipa zovu se i Delta P transmiteri)
 - **mjereni tlak**: u slučaju kada je jedna ulazna strana transmitera otvorena prema atmosferi i izložena je atmosferskom tlaku
 - **apsolutni tlak**: u slučaju kada je jedna ulazna strana transmitera spojena na vakuum
 - **glavni tlak**: u slučaju kada je jedna ulazna strana transmitera otvorena prema atmosferi i izložena atmosferskom tlaku, a druga izložena stupcu tekućine određene visine (visina izražena mjernom jedinicom npr. milimetri stupca vode, žive itd.)



Slika 51. Izmjereni tlak: a) diferencijalni, b) mjereni, c) apsolutni, d) glavni

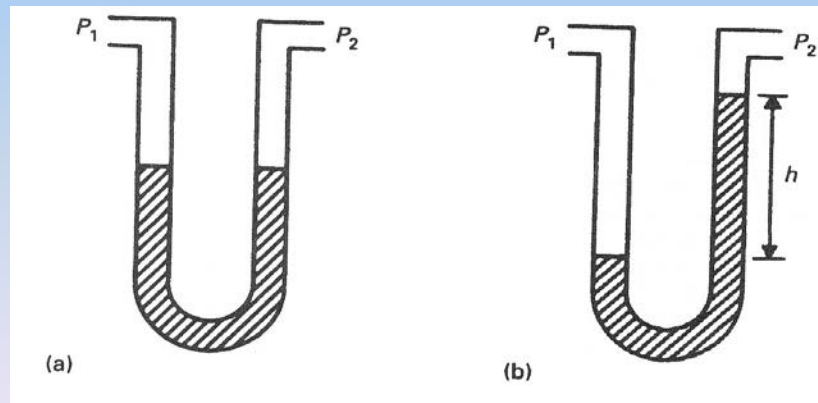
- Postoji niz mjernih jedinica za mjerenje tlaka koji su danas u upotrebi
- Prema SI sustavu u upotrebi je jedinica Newton po kvadratnom metru (Nm^{-2}) – Pascal (Pa)
- U Velikoj Britaniji u upotrebi je jedinica pound per square inch (p.s.i.) - funta po kvadratnom inchu
- U upotrebi su još i jedinice atmosfera (14,7 p.s.i.) i bar (100 kPa)
- Različite jedinice s načinima pretvorbe iz jedne u drugu date su na slici 52.

1 p.s.i (lbf/in ²)	= 6.895 kPa
	= 27.7 inches WG
1 lbf/ft ²	= 47.88 Pa
1 kgf/cm ²	= 98.07 kPa
1 inch WG	= 249.0 Pa
	= 5.2 lbf/ft ²
	= 0.036 p.s.i.
1 foot WG	= 2.989 kPa
	= 62.43 lbf/ft ²
	= 0.433 p.s.i.
1 torr (mmHg)	= 133.3 Pa
1 bar	= 100 kPa
	= 14.5 p.s.i.
	= 750 mmHg
	= 401.8 inches WG
	= 1.0197 kgf/cm ²
1 atmosphere	= 1.013 bar
	= 14.7 p.s.i.
1 kilopascal	= 0.145 p.s.i.
	= 20.89 lbf/ft ²
	= 1.0197×10^{-3} kgf/cm ²
	= 4.141 inches WG
	= 7.502 torr (mmHg)
	= 0.01 bar
	= 9.872×10^{-3} atm

Slika 52.: Pretvorbe mjernih jedinica za tlak

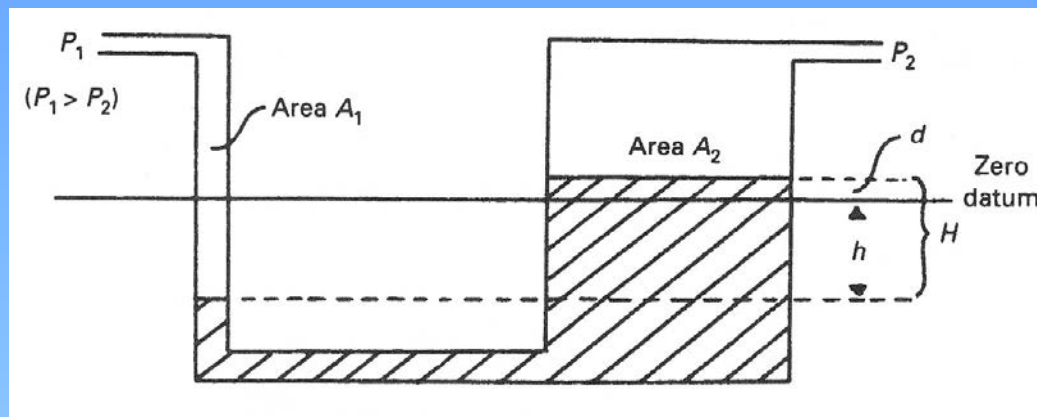
Manometri u obliku U – cijevi

- Danas nisu u prevelikoj upotrebi u industriji ali daju korisne informacije o temeljima mjerenja tlaka
- *U – manometar* je ispunjen nekom tekućinom (vodom, alkoholom, živom) i spojen je svojim krajevima na ulaze različitih tlakova p_1 i p_2
- Kada je $p_1 = p_2$ stupac tekućine u oba kraka *U – manometra* je u istoj razini
- Promjenom vrijednosti p_1 ili p_2 stupci tekućine zauzimaju nove vrijednosti visine
- Razlika u visinama stupaca h je proporcionalna diferencijalnom tlaku (odnosno razlici tlakova)



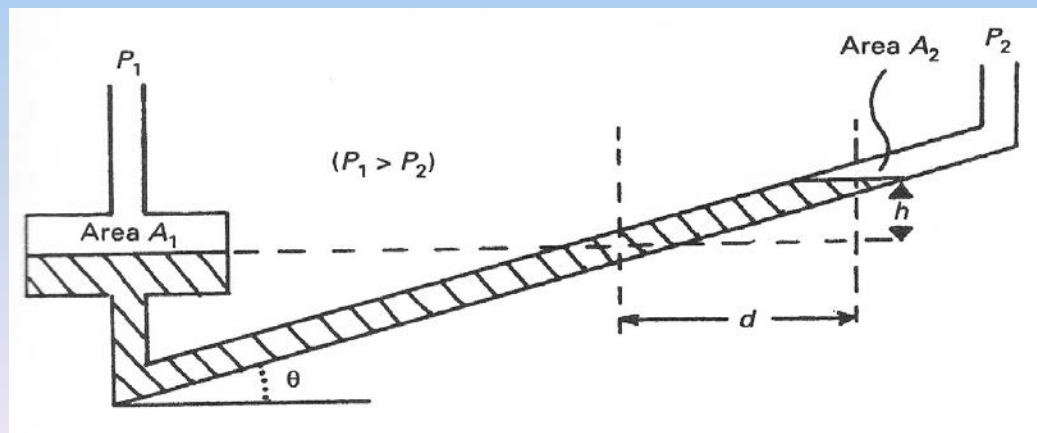
Slika 53.: U – manometar: a) $p_1 = p_2$, b) $p_1 > p_2$

- *Manometri nejednakih površina* su konstruirani s nejednakim površinama fluida u cijevima (visina **H** i ovdje je proporcionalna razlici tlakova)



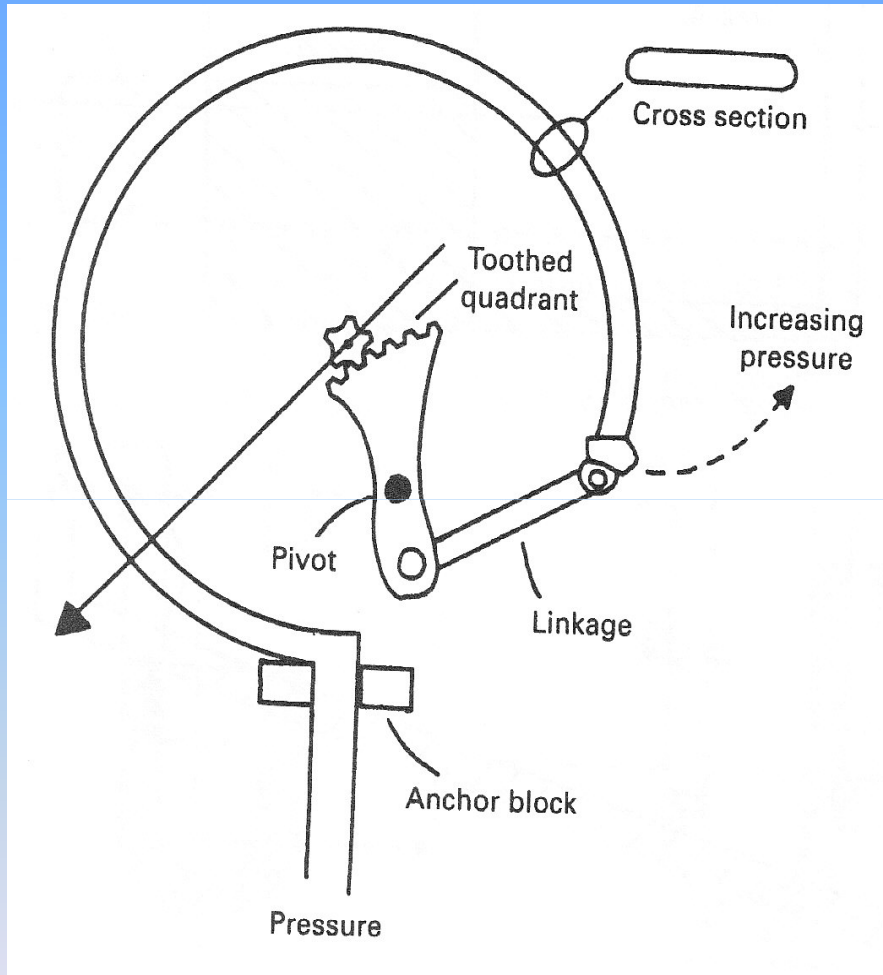
Slika 54.: Manometar nejednakih površina

- *Kosi manometar* je osjetljiviji pri mjerenju niskih tlakova, a vrijednost mjerenja očitava se s mjerne skale na duljini **d**



Slika 55.: Kosi manometar

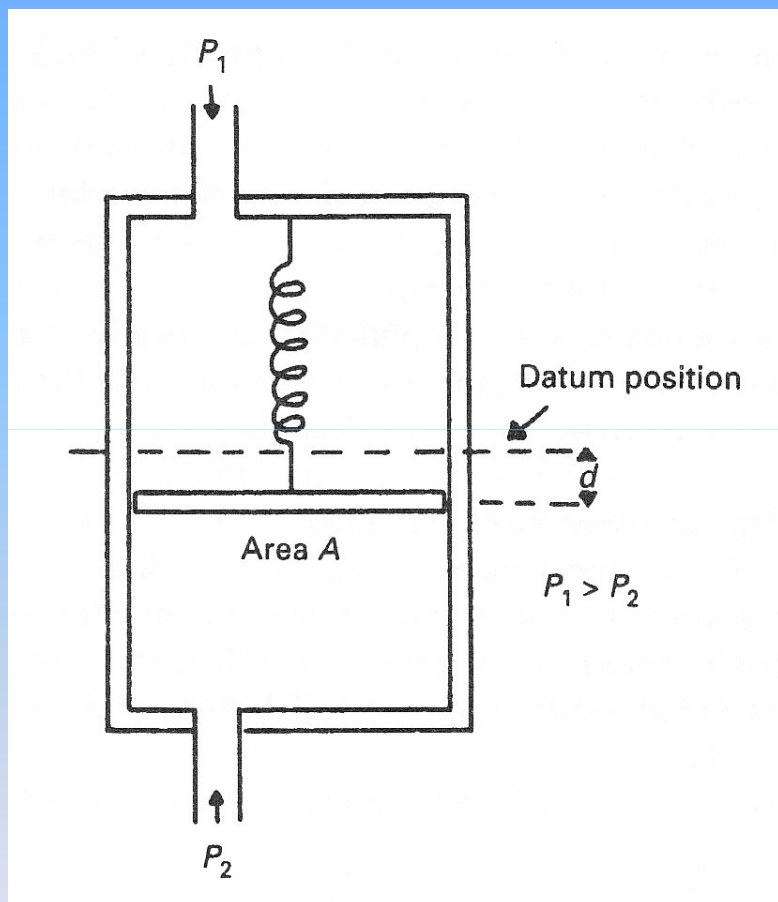
- Bourdonova cijev



Slika 56.: Bourdonova cijev

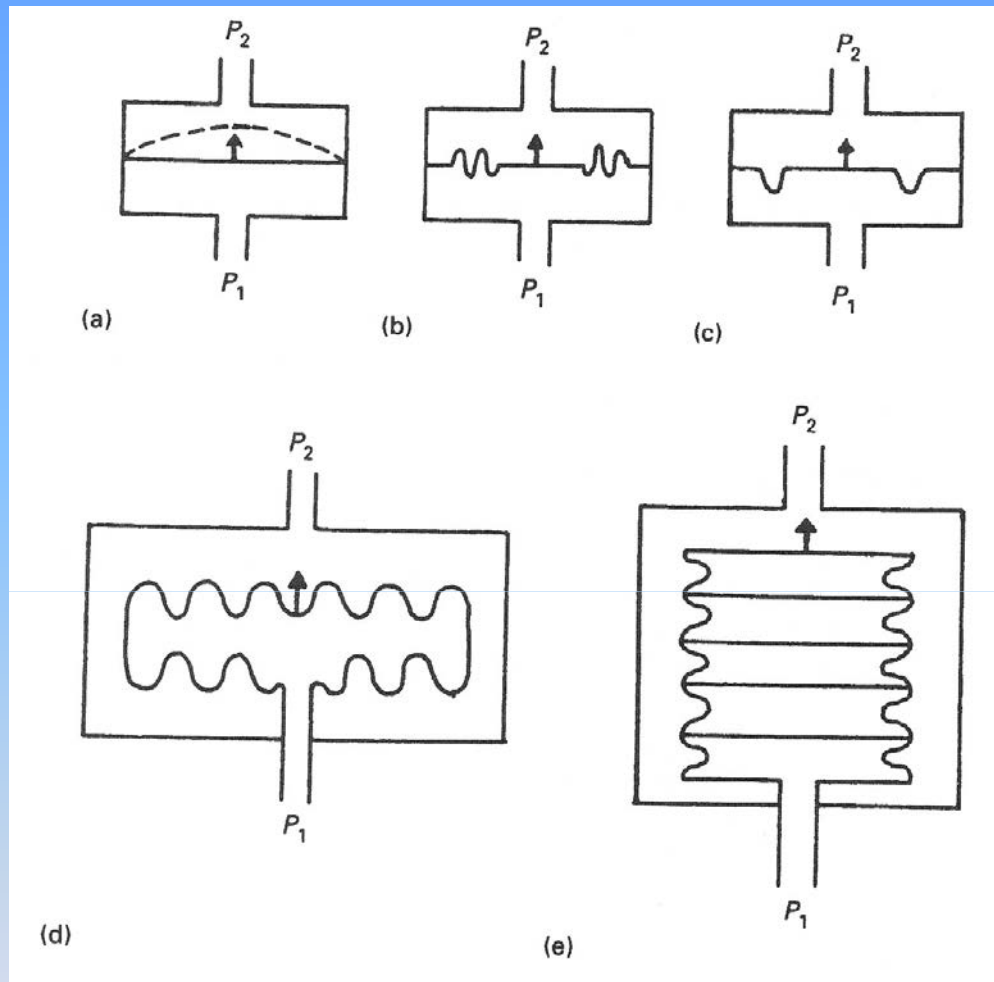
- Uređaj je dugo u upotrebi te je pogodan za mjerenje visokih i niskih tlakova
- Pomak cijevi uslijed tlaka fluida prenosi se pomoću spoja i nazubljenog dijela na zupčanik pokazivača tlaka
- Bourdonova cijev se može koristiti za mjerenje tlaka od 0 – 30 kPa pa do raspona od 0 – 50 MPa
- Bourdonova cijev može biti spojena na potencijometar te u tom slučaju daje izlazni signal u obliku električnog napona

- Elastični senzori mogu biti i drugačijih tipova od Bourdonove cijevi
- Jedan od primjera elastičnog senzora dat je na slici 57.



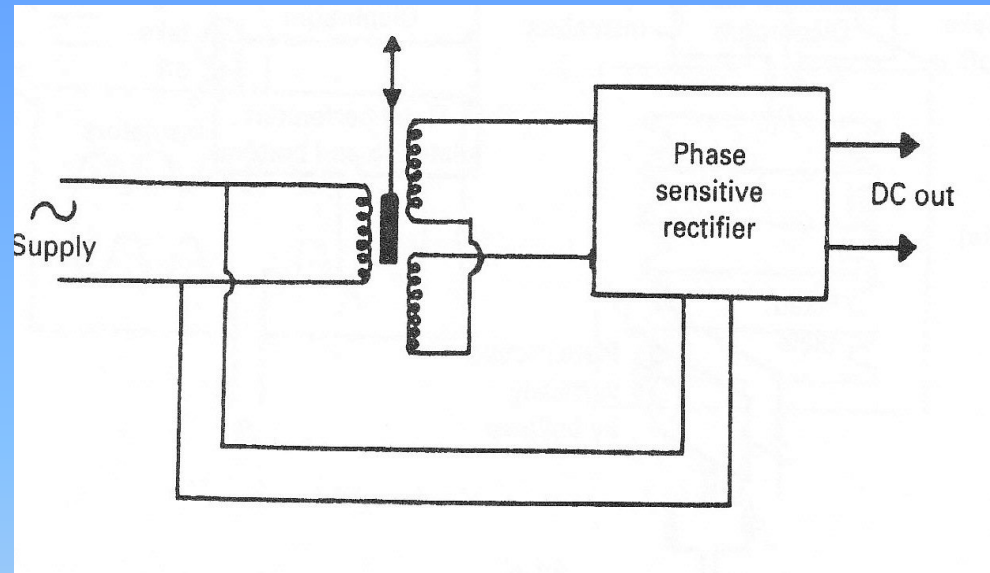
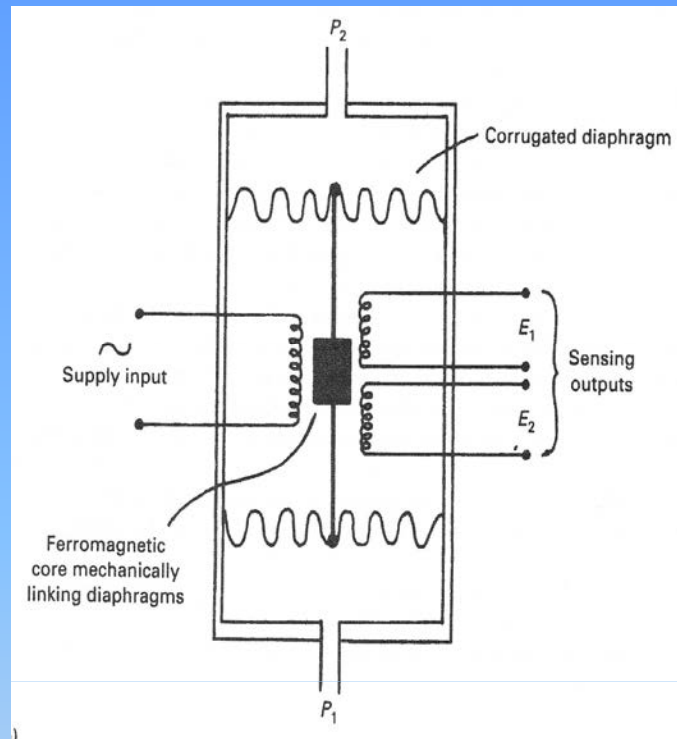
- Razlika tlaka p_1 i p_2 uzrokuje pomak ploče presjeka **A**
- Ploču **A** drži opruga, a ploča se počinje pomicati kad sila razlike tlaka nadjača silu opruge
- Pomak d ploče **A** proporcionalan je razlici tlakova p_1 i p_2

Slika 57.: Senzor diferencijalnog tlaka

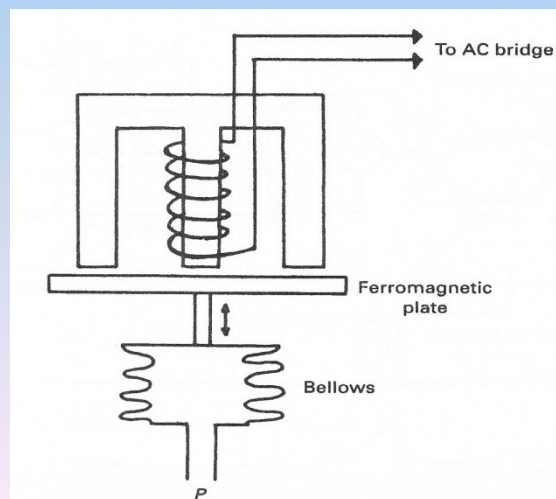


- Različite vrijednosti tlakova p_1 i p_2 uzrokuju pomak dijafragmi (pregrada) na slici 58. a),b) i c)
- Na slici 58. d) i e) razlike tlaka izazivaju pomak mjeha i elastične kapsule
- Vrlo je bitno mehanički pomak dijafragmi, kapsula, mjehova koji je relativno malen i uzrokovan razlikama tlakova pretvoriti u električni signal
- Postoji nekoliko izvedbi pretvornika koji uspješno pretvaraju ulazni signal razlike tlaka u proporcionalni električni napon

Slika 58.: Elastični senzori tlaka: a),b),c) dijafragme
d) elastična kapsula, e) mijeh



Slika 59. LVDT pretvornik tlaka: a) senzor tlaka, b) električni krug



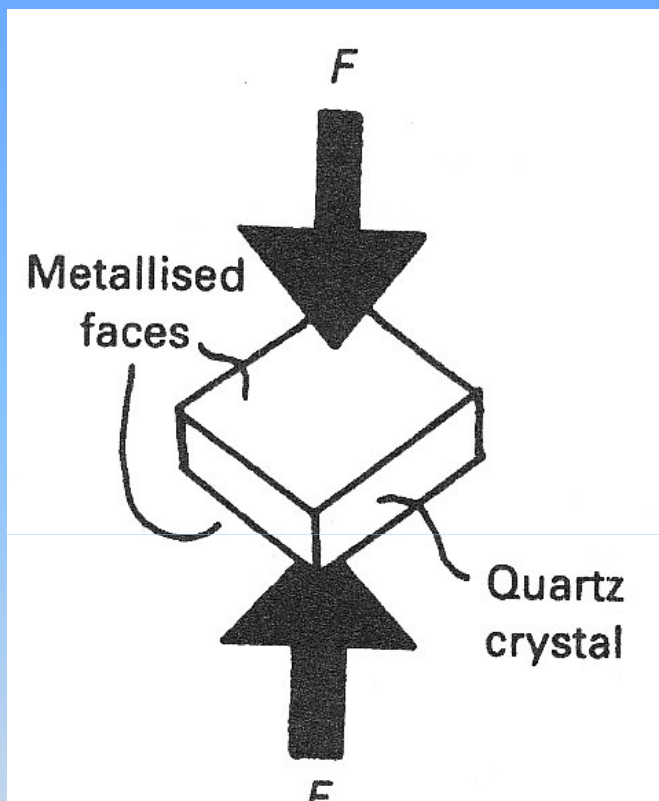
Slika 60. Pretvornik tlaka varijabilne indukcije

- **Linearni varijabilni diferencijalni pretvornik**

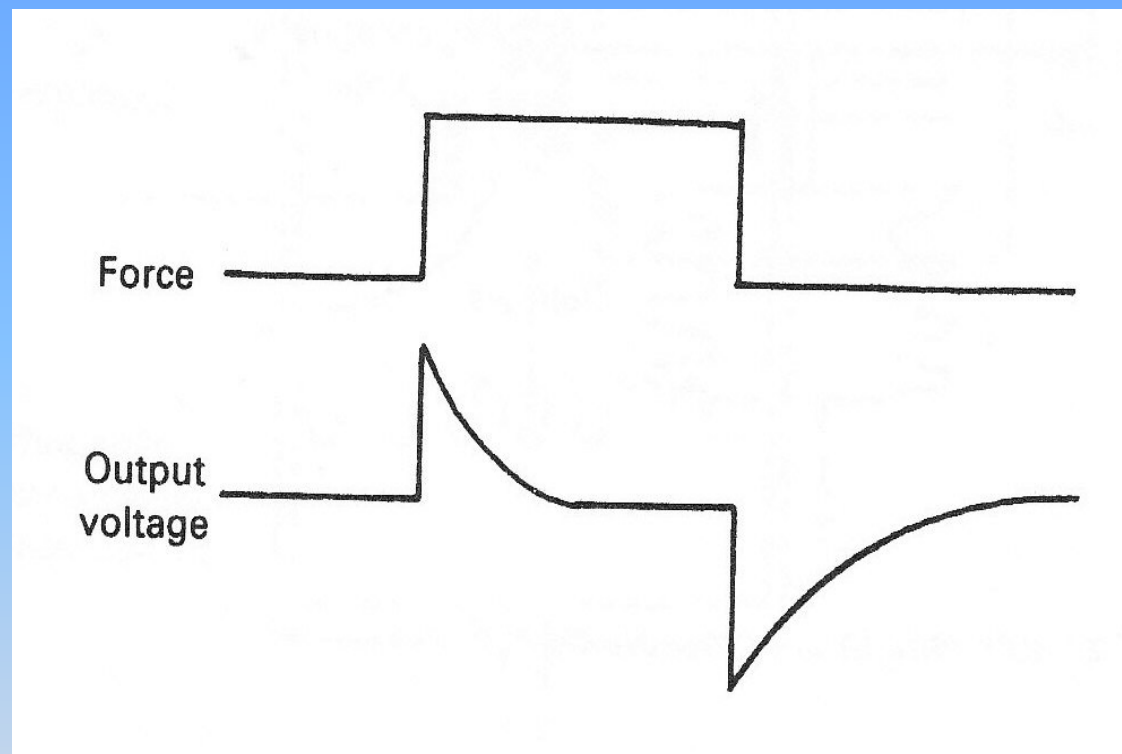
- LVDT (*linear variable differential transformer*), linearni varijabilni diferencijalni pretvornik koristi pomak elastičnog senzora tlaka za pomicanje feromagnetične jezgre u diferencijalnom pretvorniku (slika 59.)
- Pomicanje feromagnetične jezgre uzrokuje promjene napona između primarne i dvije sekundarne zavojnice (naponi E_1 i E_2 postaju različiti)
- Veličina izlaznog napona ($E_1 - E_2$) je ovisna o pomaku feromagnetične jezgre
- Ispravljač daje istosmjerni električni signal proporcionalan pomaku jezgre
- Na slici 60. promjena tlaka u mjehu pomiče i feromagnetičnu ploču ispred zavojnice
- Pomicanje ploče uzrokuje i promjenu indukcije u zavojnici koja se može izmjeriti na mjernom uređaju izmjenične struje
- Navedeni primjeri su često u upotrebi u industrijskim procesima i daju kvalitetnu pretvorbu ulaznih signala u obliku razlike tlaka u proporcionalni električni signal

- Piezo elementi

- Piezo-električni efekt zbiva se u kristalima kvarca
- Kada se na obrađeni kristal kvarca nanese sila, električni naboj suprotnog polariteta pojavljuje se na površinama kristala
- Za upotrebu u industrijskim procesima, električni naboj koji se pojavljuje na površinama kvarca mora se pretvoriti u upotrebljivi električni napon kao izlazni signal
- Piezo-električni pretvornici nisu pogodni za mjerenje promjena statičkog tlaka već su jako pogodni za mjerenje promjena dinamičkog tlaka jer imaju jako brzi odziv
- Piezo-električni pretvornik može vrlo lako pratiti varijacije mjerenog tlaka npr. kada je smješten u poklopcu cilindra motora s unutarnjim izgaranjem



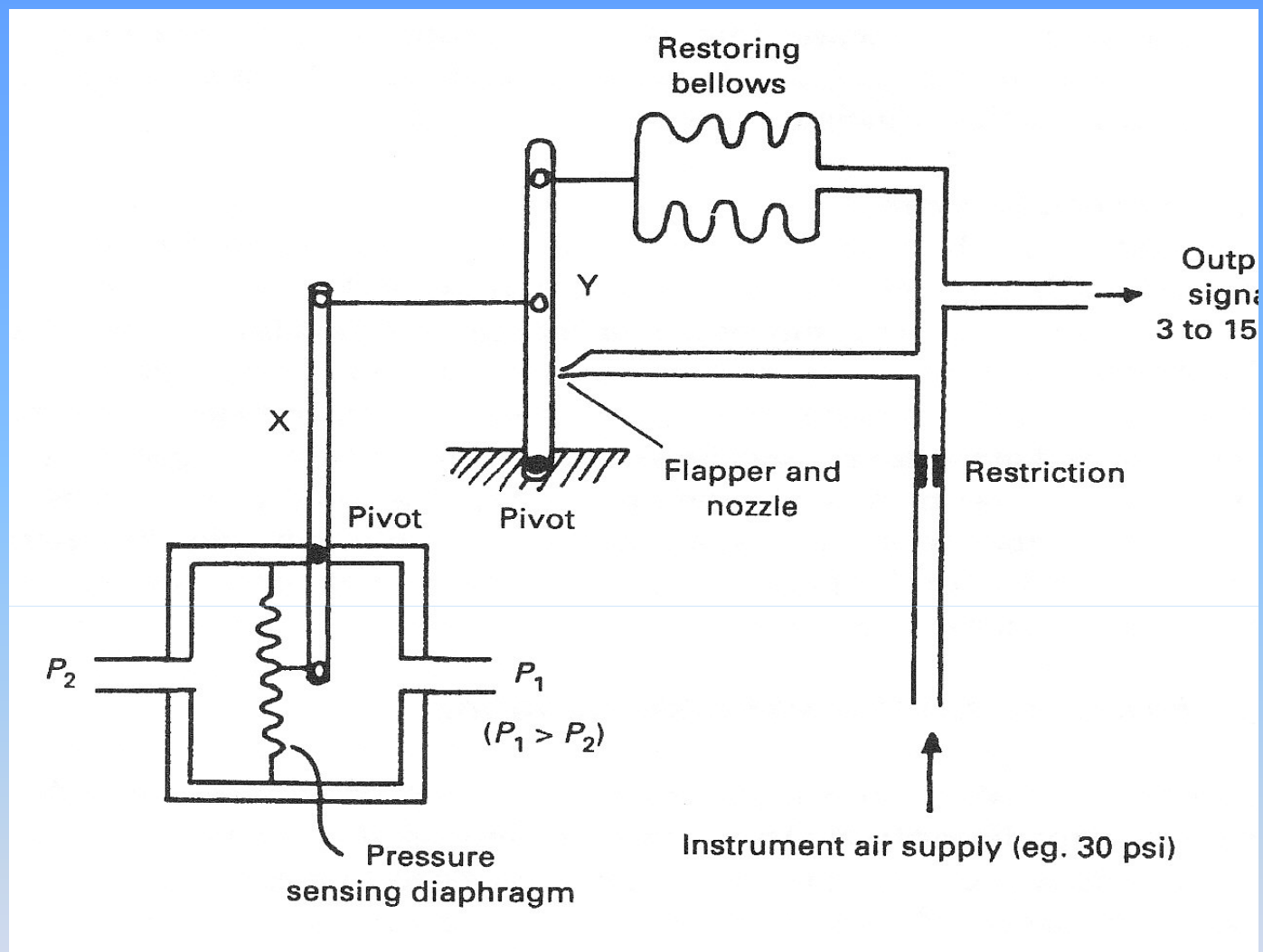
Slika 61. Piezo-električni efekt



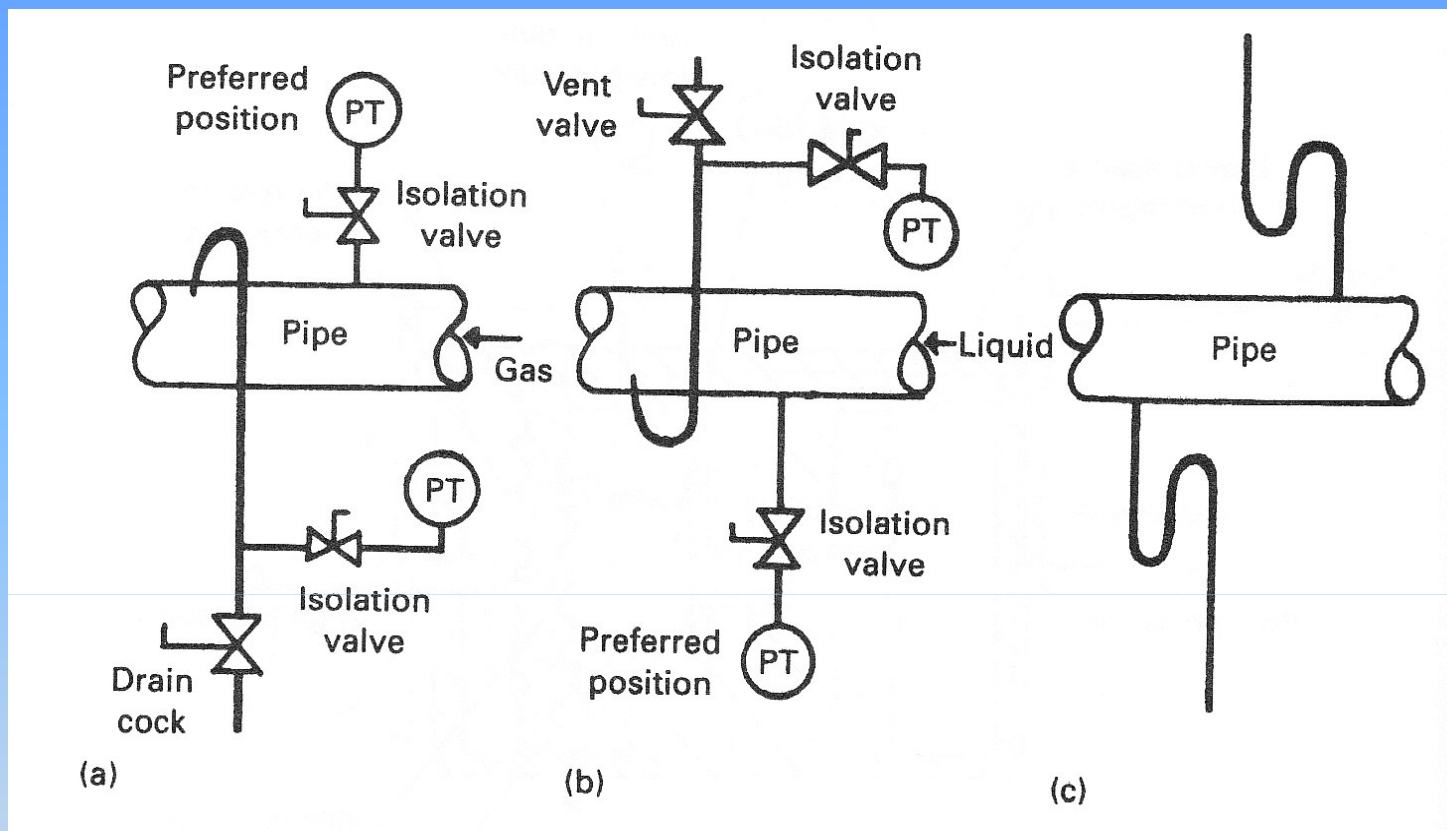
Slika 62. Ulazni i izlazni signal piezo-električnog pretvarača

- Sustav izjednačavanja sile

- Trenje i nelinearne konstantne vrijednosti opruga izazivaju pogreške u elastičnim senzorima tlaka
- Sustav izjednačavanja sile se koristi da vrati elastični senzor tlaka u početni položaj
- Na slici 63. prikazan je pneumatski sustav izjednačavanja sile
- U trenutku kada razlika tlaka pomakne dijafragmu, ona pomiče polugu X i onda polugu Y
- U slučaju pomicanja poluga X i Y prema sapnicama zraka (nozzle), zrak koji izlazi na sapnici se manjuje što dalje uzrokuje povećanje tlaka zraka u pomičnom mjehu i povećanje tlaka izlaznog signala
- Povećani tlak u mjehu uzrokuje pomicanje poluga X i Y, te i dijafragme u početni položaj
- Signal izlaznog tlaka je stoga proporcionalan razlikama tlaka na dijafragmi, te ne ovisi o elastičnoj konstanti same dijafragme



Slika 63. Pneumatski sustav izjednačavanja sile



*Slika 64. Instalacija transmitera tlaka: a) mjerenje tlaka plina, b) mjerenje tlaka tekućine
c) cijev bez transmitera tlaka*

MJERENJE POMAKA

- Mjerenje pomaka je vrlo važno u raznim industrijskim procesima (obradi materijala npr. numerički upravljanim strojevima)
- Mjerna osjetila pomaka mogu mjeriti i pravocrtni i kutni pomak
- Mjerenje pomaka može biti **apsolutno** ili **inkrementalno**
- Kod apsolutnog mjerenja senzori pomaka mjere pomak u bilo kojem trenutku s obzirom na početno stanje
- Senzori inkrementalnog pomaka mjere samo pređeni put pomaka i ne daju točan položaj mjerenog objekta poslije pomaka
- Inkrementalno mjerenje je vrlo jefino i jednostavno ali zahtjeva dodatno određivanje početnog stanja mjerenog objekta poslije svakog njegovog pomaka
- Ulazni signal mjerenog pomaka se u pretvornicima pretvara u električni signal

- Potenciometri

- Najjednostavniji transponder pomaka je potenciometar
- Kontaktna ručica (*klizač*) potenciometra je mehanički povezana s mjerenim objektom, a napon izlaznog električnog signala s potenciometra je proporcionalna pomaku klizača potenciometra
- Električni krug jednostavnog potenciometra prikazan je na slici 65.
- Potenciometar je povezan s stabilnim izvorom napona V_i , L je maksimalni raspon pomaka potenciometra a d je pomak klizača potenciometra
- Izlazni napon s potenciometar biti će:

$$V_o = \frac{d}{L} V_i$$

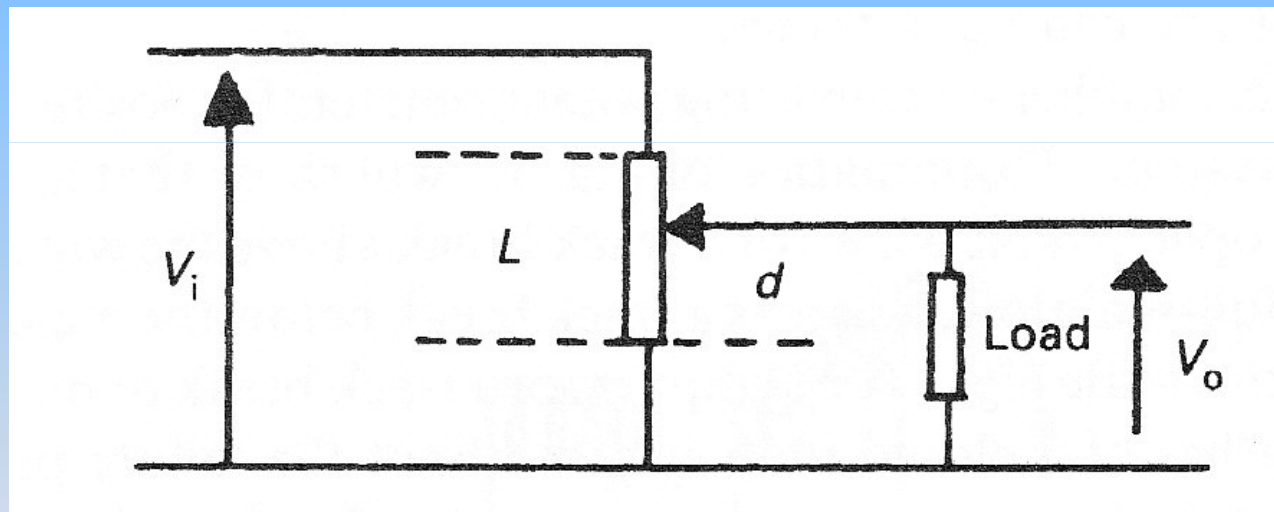
- Uobičajeno je da se djelomični pomak x označava izrazom:

$$x = \frac{d}{L}$$

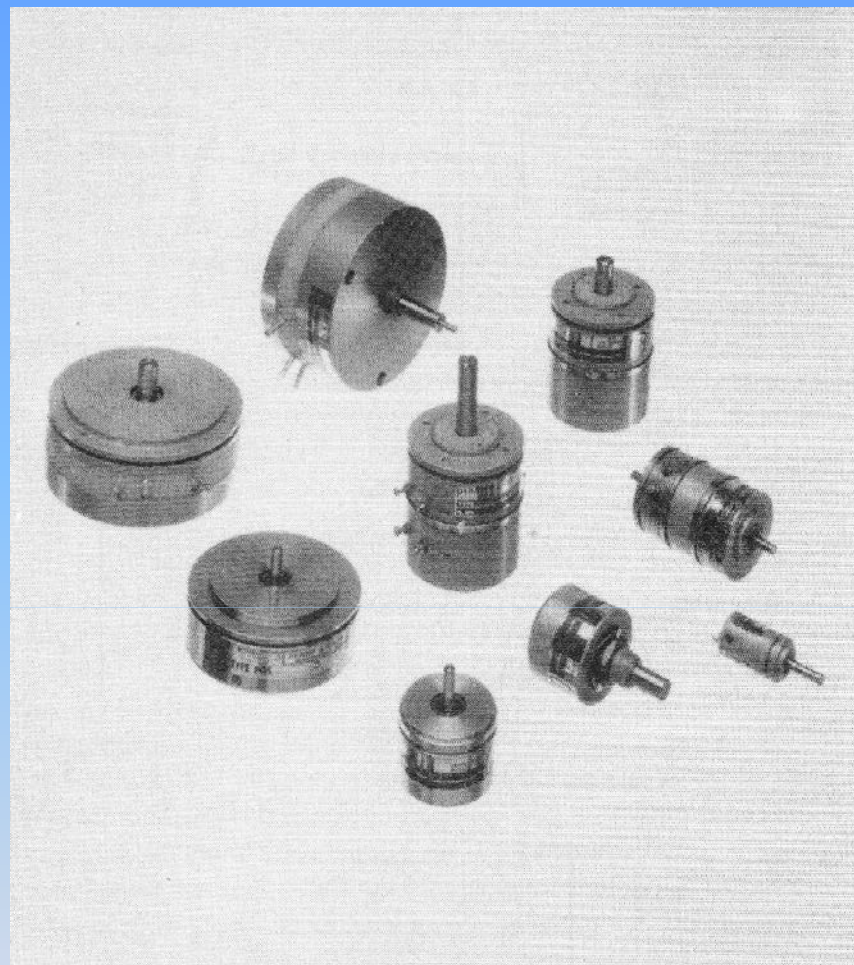
- Vrijednost x je: $0 < x < 1$, pa se jednačba može napisati:

$$V_o = xV_i$$

- Pogreška pretvorbe signala potencijometra se kreće oko 1,5% FSD
- Najčešća vrijednost snage izvora struje za potencijometar je 1W



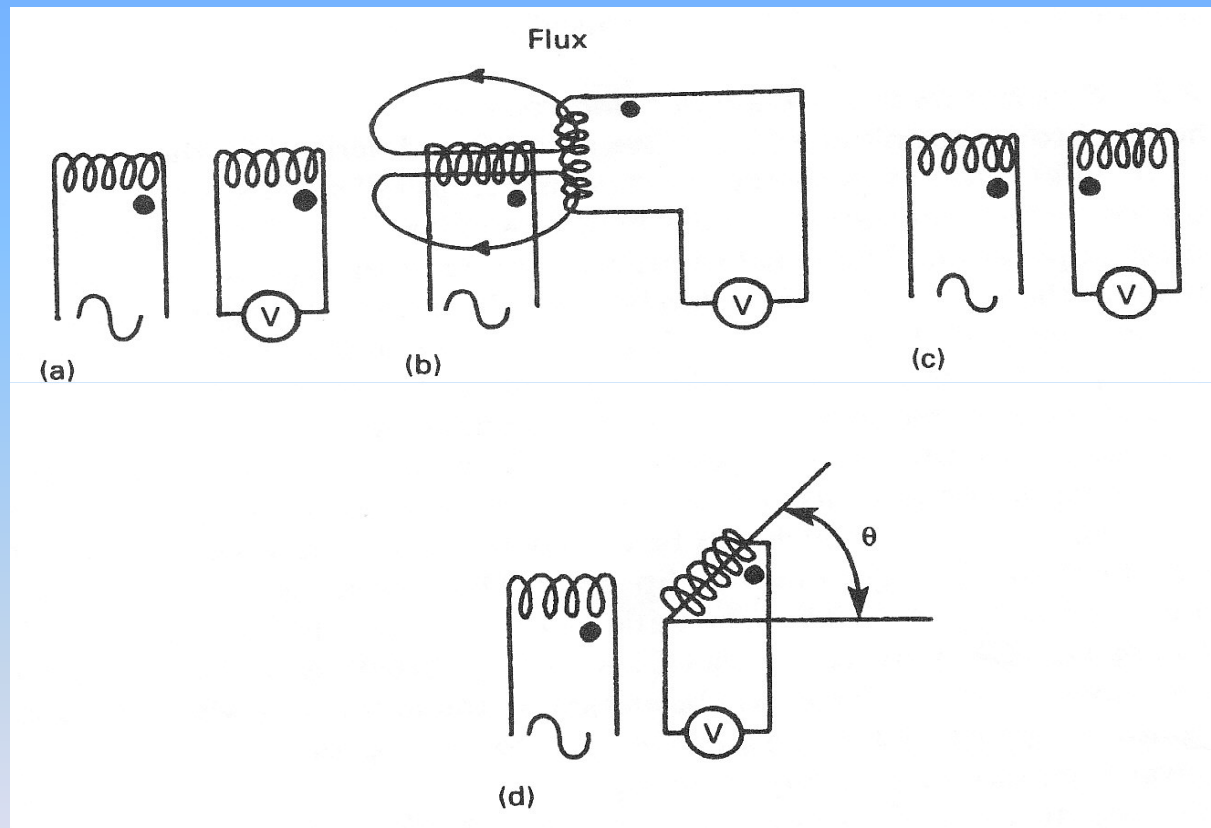
Slika 65. Električni krug jednostavnog potencijometra



Slika 66. Pravocrtni i kutni potenciometri

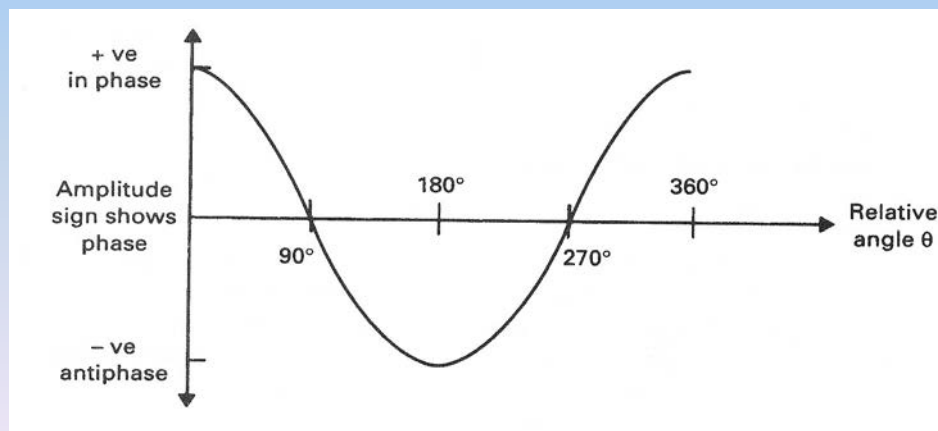
- Sinkro uređaji i rezolveri

- Sinkro uređaji i rezolveri djeluju kao jednostavni transformatori, te je osnova njihova rada data na slici 67.:

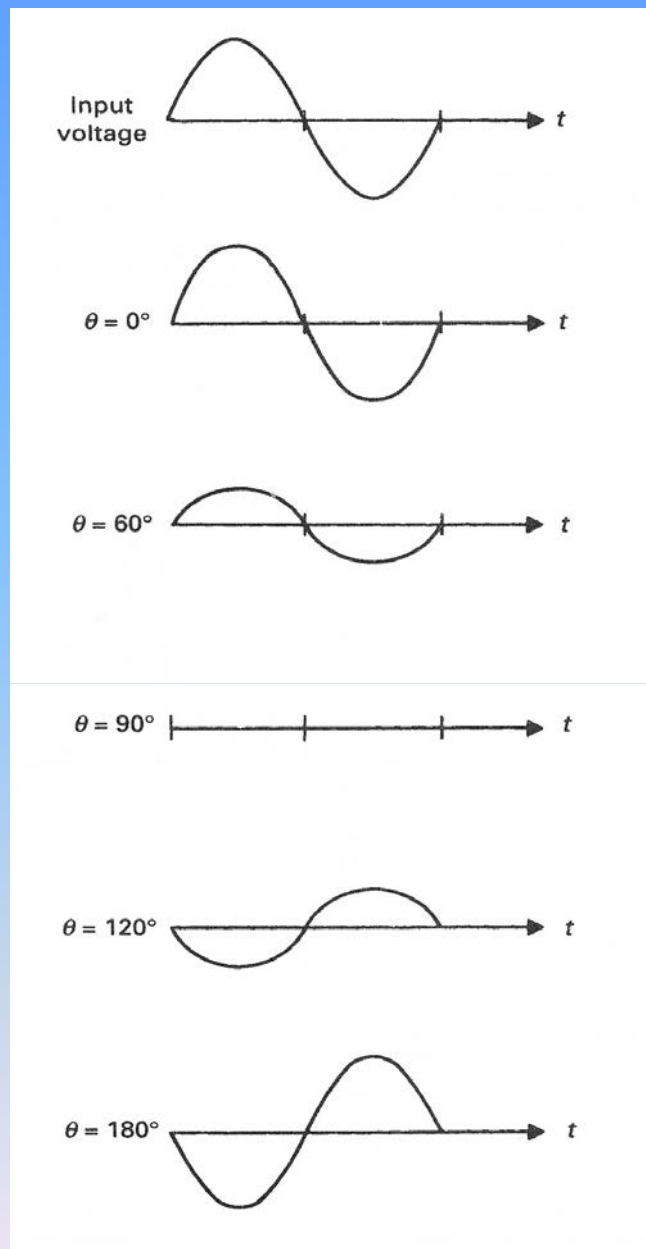


Slika 67. Osnove rada sinkro uređaja i rezolvera: a) zavojnice pod istim kutom, b) zavojnice pod kutom od 90° , c) zavojnice pod kutom od 180° , d) zavojnice pod kutom ϑ

- Na slici 67.a) je prikazan je sinkro uređaj gdje su dvije zavojnice pod jednakim kutovima
- Ulazni izmjenični napon je V_i a izlazni napon V_o je : $V_o = KV_i$, gdje je K konstanta koja ovisi o omjeru induciranih napona u zavojnicama i gubicima u transformatoru
- U slučaju 67.b) druga zavojnica je zarotirana za 90° , pa električni tok iz prve zavojnice inducira ekvivalentni napon ali suprotnog predznaka u drugoj zavojnici, dajući neto izlazni napon iz druge zavojnice nula
- U slučaju 67.c) druga zavojnica je zarotirana za 180° od početnog položaja, te je izlazni napon *antifaza* ulaznog napona, tj. $V_o = -KV_i$
- Na slici 67.d) je slučaj kada je druga zavojnica zarotirana za neki kut θ , te je u tom slučaju izlazni napon jednak: $V_o = KV_i \cos \theta$



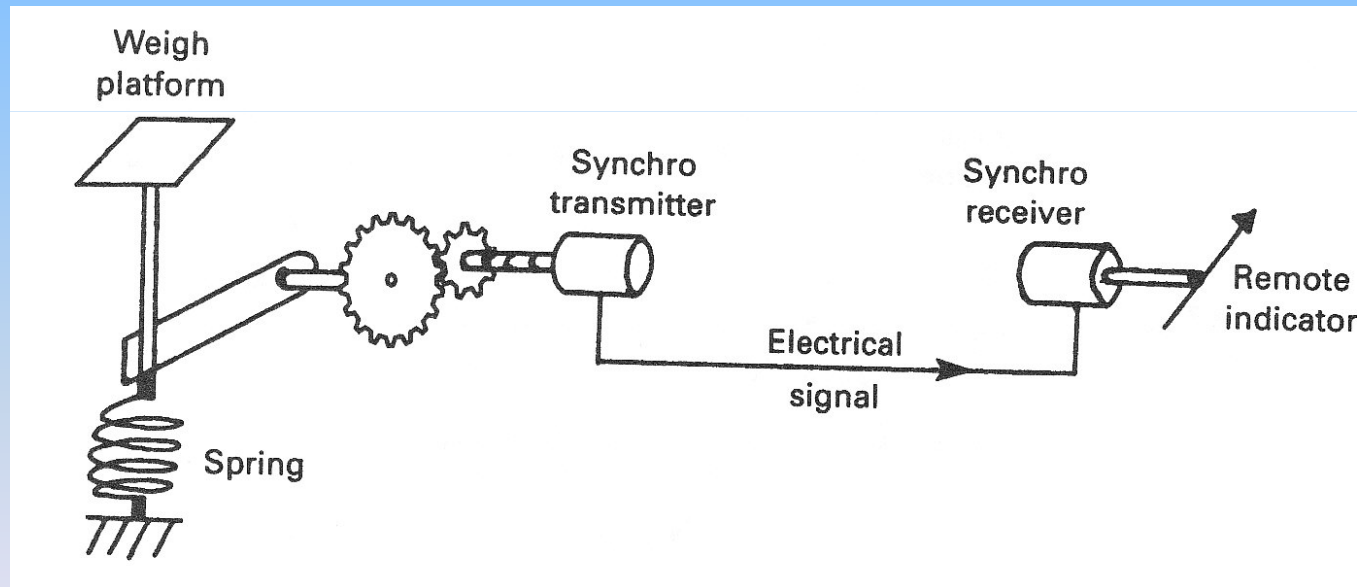
Slika 68. Veza kuta zavojnica i izlaznog napona, amplitude i faze



- Izlazni napon može biti u fazi s ulaznim naponom ($\cos \theta$ pozitivan; $\theta > 270^\circ$, ili $\theta < 90^\circ$) ili u antifazi s ulaznim naponom ($\cos \theta$ negativan; $90^\circ < \theta < 270^\circ$)
- Za kutove $\theta = 90^\circ$ i $\theta = 270^\circ$, izlazni napon je teoretski nula (iako se javlja jako malen napon zbog tzv. curenja električnog toka s prve zavojnice)
- Objašnjenja sa slike 67. su osnove rada sinkro uredaja i rezolvera koji se najčešće koriste kao uređaji za kutna mjerenja i signalizaciju

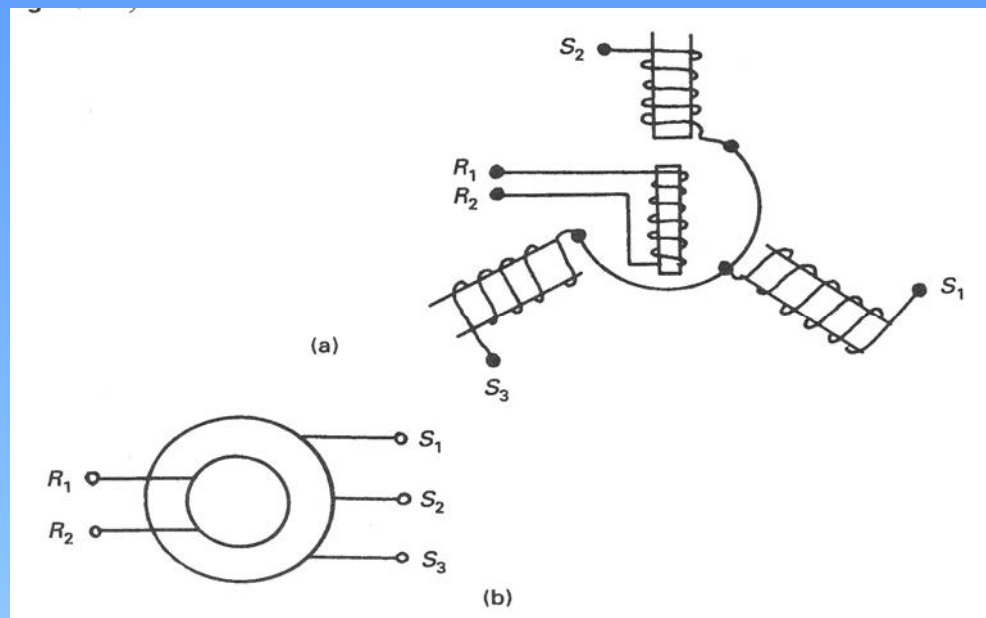
Slika 69. Veza izlaznog napona i kuta

- Sinkro uređaj koji ima namjenu daljinske signalizacije i očitavanja sastoji se od transmitera i primatelja signala (receiver), ovakav uređaj često se naziva trgovačkim nazovom *Selsyn*
- Kod ovakvog uređaja (slika 70.) nema mehaničke veze između transmitera i primatelja signala, već su povezani pomoću električnog signala
- I transponder i primatelj signala su torzijske jedinice jer se signal zakreta osovine prenosi s transpondera na primatelja signala i dalje na izlaznu osovinu

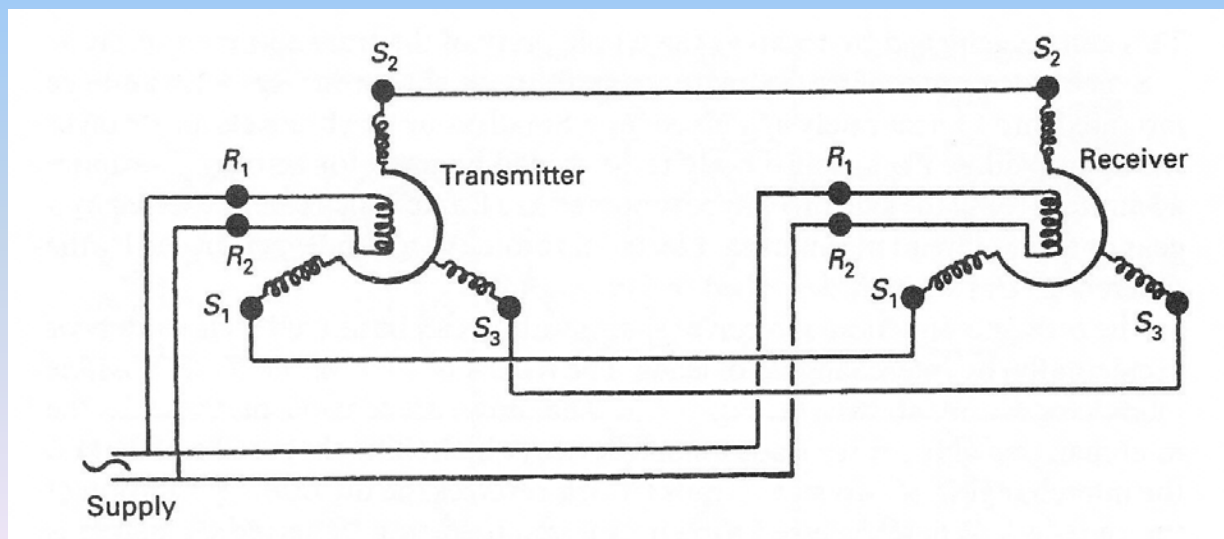


Slika 70. Sinkro transponder/primatelj signala

- Torzijski transmitter djeluje kao mali elektromotor koji se sastoji od statora s tri zavojnice (razmaknutih 120°) i rotora
- Izmjenični napon (obično 400 Hz ili 50 Hz , 110 V) spojen je na zavojnicu rotora R_1 i R_2
- Faza napona induciranog u statorskim zavojnicama ovisi jedino o kutu rotora
- Signal se s transmitera na primatelj signala prenosi električnom vezom, a primatelj signala konstruiran je na jednak način kao transmitter (ima ležajeve malog trenja)
- Izmjenični napon induciran u statorskim zavojnicama transmitera putuje do statorskih zavojnica primatelja signala
- Ovaj napon u statorskim zavojnicama proizvodi magnetsko polje koje je zakrenuto za isti kut kao i rotor transmitera
- Izmjenični napon doveden također na rotor primatelja signala proizvodi magnetsko polje, i ako se kut zakreta ta dva polja (mag. polja s rotora i statora primatelja) ne podudara , rotor primatelja će se zakretati dok se kut zakreta magnetskih polja ne izjednači, odnosno dok kut zakreta rotora primatelja signala nebude jednak kutu zakreta rotora transmitera



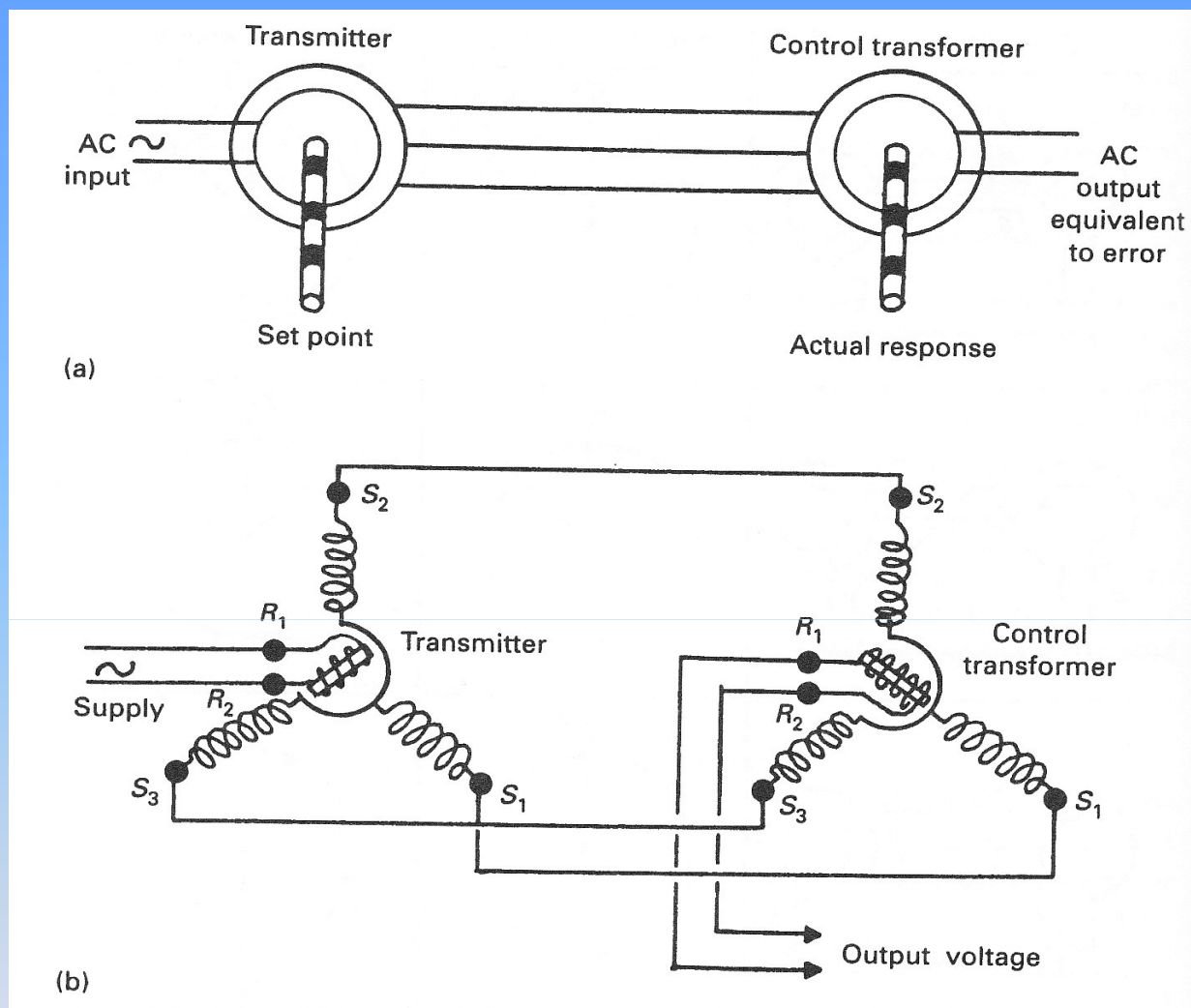
Slika 71. Sinkro torzijski transponder: a) konstrukcija, b) shematski prikaz



Slika 72. Veza transpondera i primatelja signala

- **Regulacijski sinkro uređaji s povratnom vezom**

- Torzijski primatelji signala daju malen zakret te mogu zakretati samo indikatore ili uputne ventile
- Za zakretanje znatno većih tereta potreban je sustav s povratnom vezom s uređajem za mjerenje sinkro-pogreške, tj. pogreške između zadanog kuta zakreta i realno ostvarenog
- Regulacijski sinkro uređaj ostvaruje takvu povratnu vezu kao na slici 73.
- Kod regulacijskog sinkro uređaja primatelj signala se zove regulacijski transformator
- Izlazni signal greške je izmjenični napon s rotora regulacijskog transformatora koji ima istu frekvenciju kao ulazni izmjenični napon na rotoru transmitera, ali se razlikuje u magnitudi koja indicira veličinu pogreške te u fazi (ili antifazi) koja indicira smjer pogreške



Slika 73. Regulacijski sinkro uređaj: a) rad regulacijskog sinkro uređaja, b) izvedba regulacijskog sinkro uređaja

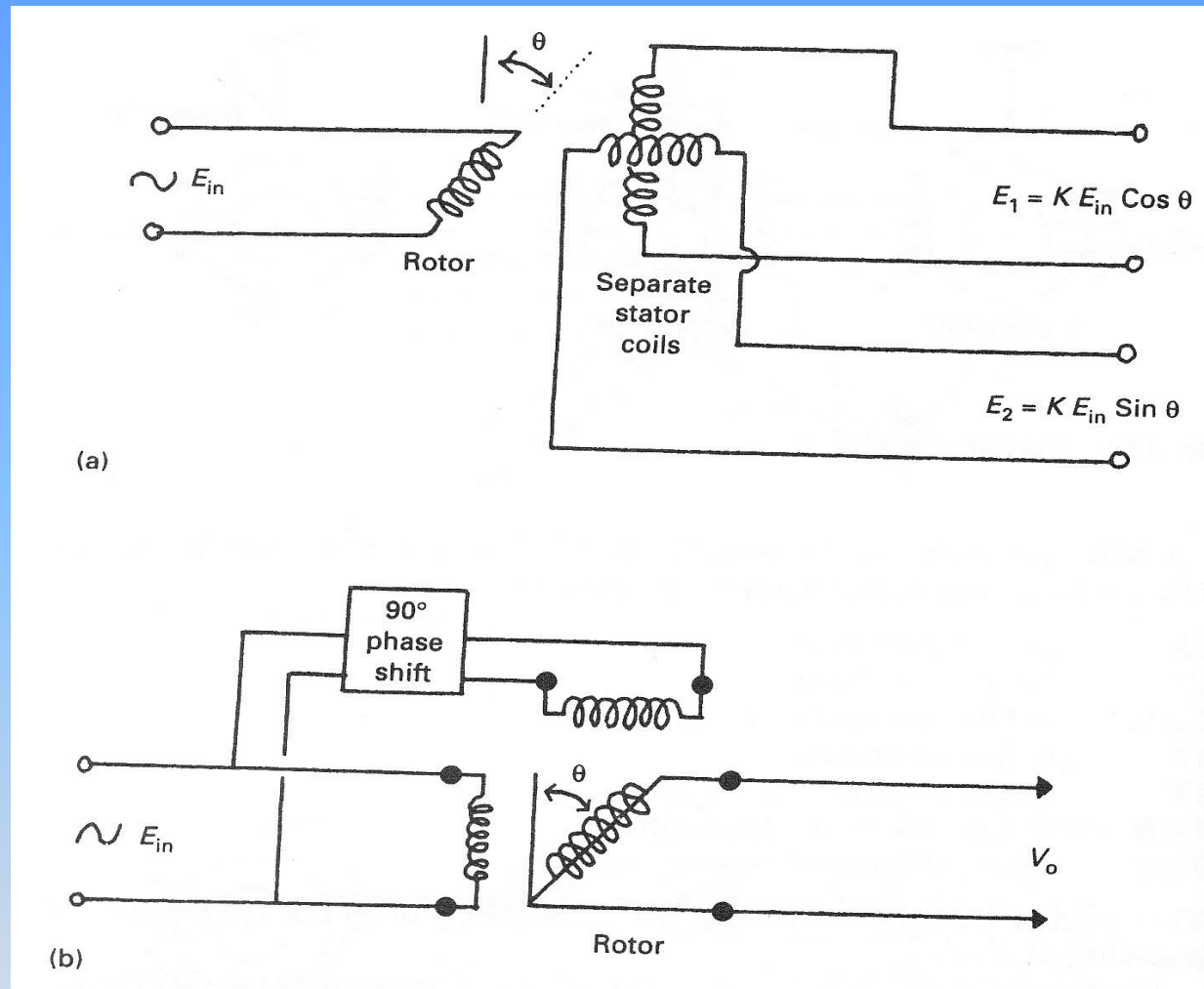
- Rezolveri

- Rezolveri imaju dvije statorske ovojnice postavljene pod pravim kutom i rotorsku ovojnicu
- Na slici 74. dat je shematski prikaz rezolvera
- Napon induciran u dvjema statorskim zavojnicama je:

$$E_1 = KE_{in} \cos\theta,$$

$$E_2 = KE_{in} \cos\theta$$

- Rezolveri se koriste za koordinatnu pretvorbu i za pretvorbu pravokutnih u polarne koordinate



Slika 74. Rezolver: a) ulazni signal doveden na rotor, položaj očitao s statora
b) ulazni signal doveden na stator, položaj očitao s rotora