

Merilni in izvršni sistemi

Procesna avtomatika

Uroš Lotrič, Nejc Ilc

Merilni sistemi

Osnovni element merilnega sistema je tipalo ali senzor

Primeri

- Položaj, hitrost, pospešek
- Sila, navor
- Tlak
- Temperatura
- Nivo
- Pretok
- Lastnosti snovi

Izvršni sistemi

Zgradba

- Aktuator
 - s pomočjo dodatne napajalne energije povzroči mehanski premik, odvisen od krmilnega signala
- Končni izvršni člen
 - Mehanski premik povzroči spremembo energijskega ali masnega pretoka v sistemu, ki ga opravi končni izvršni člen (ventil, loputa)
- Položajni dajalnik
 - Odziv na krmilni signal odvisen od trenutnega položaja aktuatorja

Primeri

- Ventil (pretok tekočine)
- Loputa (pretok materiala)
- Električni motor
- Elektro – hidravlični izvršni sistem
- Elektro – pnevmatski izvršni sistem

Industrijski pogoji

Enostavna montaža in zamenjava

Robustni priključki

Temperaturno območje

- Komercialno 0°C do $+70^{\circ}\text{C}$
- Industrijsko -40°C do $+85^{\circ}\text{C}$
- Zahtevnejše industrijsko -40°C do $+125^{\circ}\text{C}$

Mehanska odpornost na udarce in vibracije

Zaščita proti elektromagnetnimi motnjami

Zaščita pred vodo

Industrijski pogoji

Stopnje zaščite IP (Ingress Protection)

- Standard EN60529
- Dve številki
- Primer IP20, IP55, IP67

Stopnja	Zaščita pred dotikom s tujimi predmeti	Stopnja zaščite pred vodo
0	Brez zaščite	Brez zaščite
1	Vdor trdnih tujih teles, premer > 50 mm	Vertikalno padajočo vodo
2	Vdor tujih trdnih teles, premer >12,5 mm	Vertikalna padajoča voda (15° odklona)
3	Vdor tujih trdnih teles, premer >2,5 mm	Proti pršenju
4	Vdor trdnih tujih teles, premer > 1 mm	Proti brizgajoči vodi
5	Škodljivo zapraševanje notranjosti	Proti vodnemu curku
6	Vdor prahu, popolna zaščita pred dotikom	Proti močnemu vodnemu curku
7		Kratkotrajna potopitev
8		Dolgotrajna potopitev

Lastnosti tipal

Točnost

- Kako dobro se meritev ujema z dejansko vrednostjo količine

Natančnost

- Odstopanje meritve od srednje vrednosti
- Merilno področje inštrumenta čim bolj prilagojeno področju merjenih količin

Občutljivost

- Sprememba odčitka ob spremembi količine

Ločljivost

- Najmanjša sprememba vhodne količine, ki jo tipalo zazna

Hitrost odziva

Histereza

Konstantno odstopanje, lezenje

- Enako na celotnem merilnem področju, odpravimo ga s kalibracijo

Skala

- Zaželena je linearna odvisnost od merjene količine
- Lahko kvadratno, korensko, logaritemsko
- Nelinearnost: odstopanje od predpostavljene odvisnosti (v procentih skale)

Obdelava signala

Diskretna tipala

- Zajem podatkov
 - Nastavitev območja delovanja
 - Standardni nivoji
 - 24 V relejski kontakti
 - Izhod 0..24 V, 100 mA
- Obdelava
 - Filtriranje 0..8 ms filter
- Verodostojnost
 - Odstopanja so redka

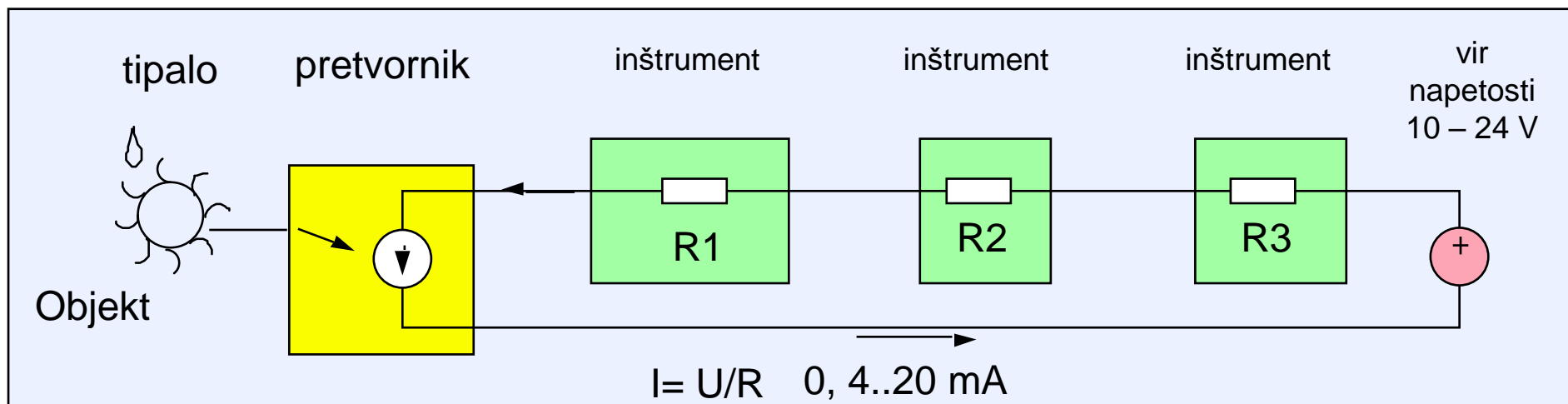
Analogna tipala

- Zajem podatkov
 - Standardizirani signali:
 - 0/2..10 V, 0/4..20 mA
 - Uporovni elementi
- Obdelava
 - Filtriranje proti 50-60 Hz motnjam in višjim harmonikom
 - Skaliranje, linearizacija, povprečenje
 - Analogno-digitalna pretvorba
- Verodostojnost
 - Interval, limite, integriteta
 - Sporočanje napak, diagnostika

Ožičenje

Zakaj meritve 4 do 20 mA?

- Pretvorniki delujejo kot tokovni viri, ki v merilni sistem pošiljajo tokove med 4 in 20 mA, proporcionalno merjeni količini
- Informacija se prenaša s tokom, zato padec napetosti na žicah ne povzroča napak
- Tok < 4 mA signalizira napako
- Število zaporednih bremen je omejeno z napajalno napetostjo
- Enostavne naprave so lahko napajane kar po signalnih žicah



Ožičenje

Izhod iz tipala:

- Normalno odprt kontakt (NO)
 - ko je tipalo aktivno, imamo na izhodu logično 1
- Normalno zaprt kontakt (NC)
 - na izhodu je ves čas logična 1, ko je tipalo aktivno se izgubi

Tip tipala

- Odvisen od uporabljenega tranzistorja: NPN ali PNP
- Tipalo mora biti kompatibilno z vhodno-izhodno kartico

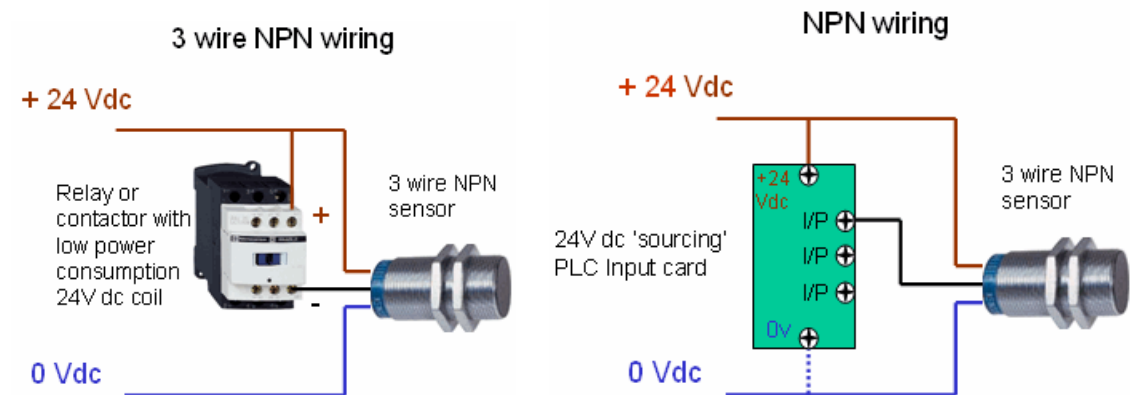
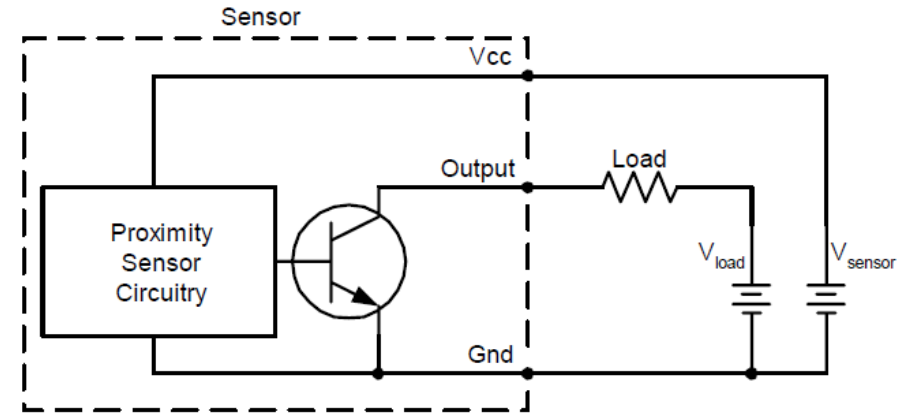
Ožičenje

Tip NPN

- Z napetostjo na bazi nadziramo tok iz kolektorja na emitor (narisan s puščico)
- Če je baza na višji napetosti kot emitor, tok teče iz kolektorja na emitor
- Malo toka teče tudi iz baze na emitor

- Prednost sistema: preklopni element lahko dela na višji napetosti kot senzor

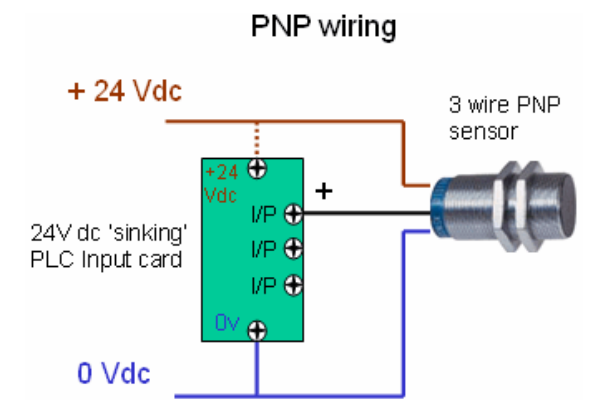
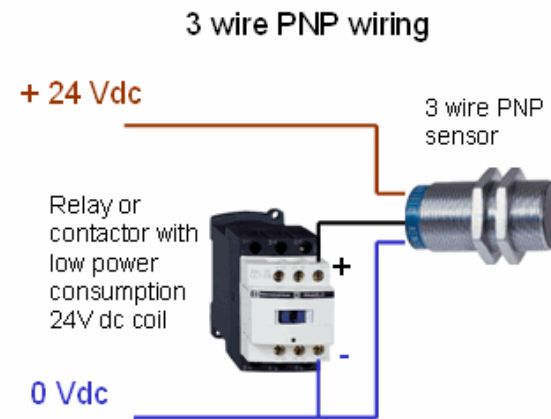
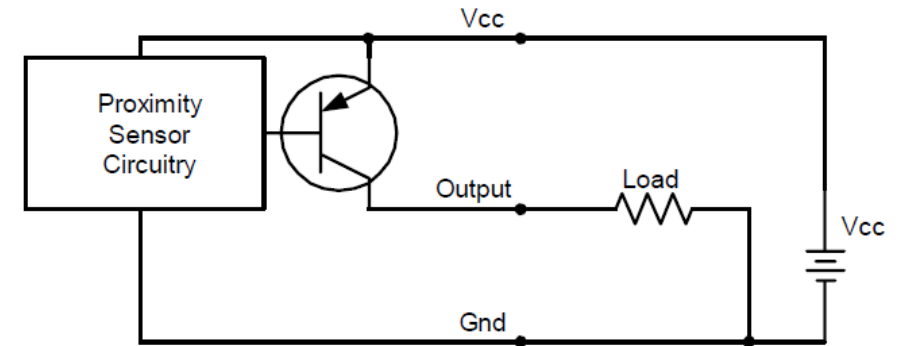
- Manj uporabljano



Ožičenje

Tip PNP

- Z napetostjo na bazi nadziramo tok iz emitorja (narisan z puščico) na kolektor
- Če je baza na nižji napetosti kot emitor, tok teče iz emitorja na kolektor
- Malo toka teče tudi iz emitorja na bazo
- Enostavnejša vezava
- Najbolj običajno



Položaj

Diskretna tipala

- Mehanska tipala (končna stikala)
- Optična tipala
- Magnetna
- Induktivna
- Kapacitivna
- Ultrazvočna



Analogna tipala

- Potenciometrijska
- Kapacitivna
- Ultrazvočna
- Transformatorsko merjenje
- Optični dajalnik
- Uporovni lističi
- Piezo-elektriki



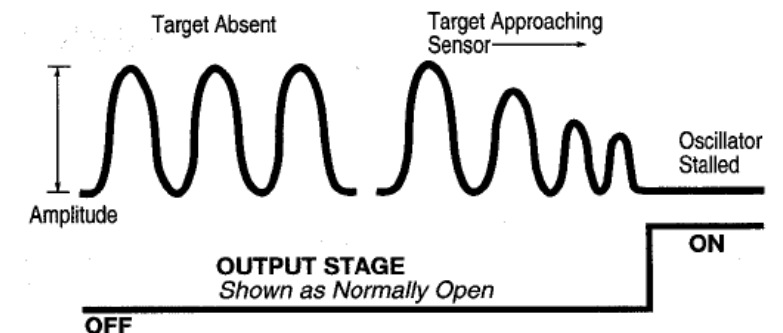
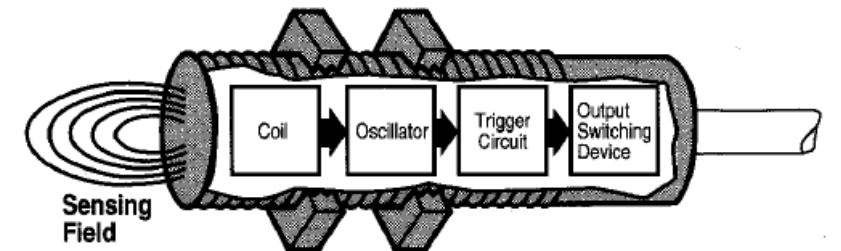
Induktivna tipala

Ideja:

- induktivnost tuljave in električne izgube se spremenijo, ko tipalu približamo kovino

Princip delovanja:

- Nihanje oscilatorja ustvari na tuljavi izmenično magnetno polje (sensing field)
- Magnetno polje izhaja iz plastičnega ohišja sensorja
- Ko se tipalu približa kovinski objekt, izmenično magnetno polje v kovini ustvari inducirane tokove, ki obremenijo oscilator in amplituda oscilatorja se zmanjša
- Ko amplituda pade pod določeno mejo, se izhod sensorja preklopi



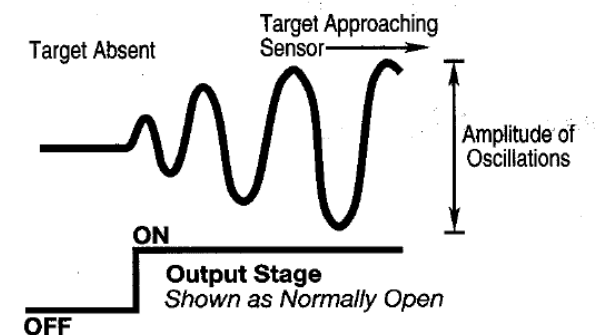
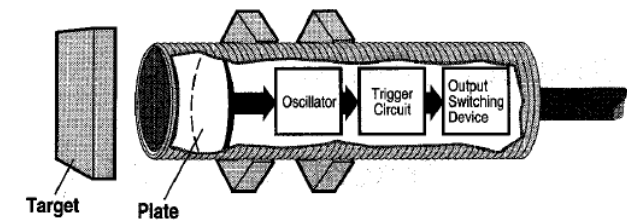
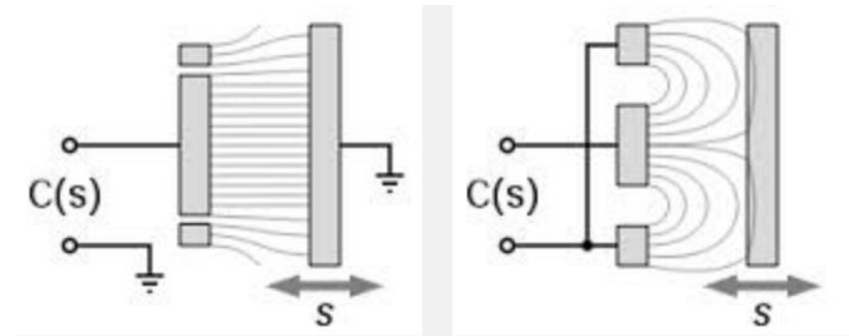
Kapacitivna tipala

Zaznavajo spremembo kapacitivnosti kondenzatorja v senzorju

- Dobra za materiale z veliko gostoto

Dva tipa kapacitivnih senzorjev

- Prevodni (zgoraj levo)
 - Ena sama plošča kondenzatorja v senzorju, drugo predstavlja objekt
 - Objekt mora biti električno prevoden material
- Dielektrični (zgoraj desno)
 - Dve plošči kondenzatorja nameščeni ena ob drugi (odprti kondenzator),
 - Ko se objekt približa kondenzatorju, sprememba dielektričnosti poveča kapacitivnost kondenzatorja in s tem poveča amplitudo oscilatorja



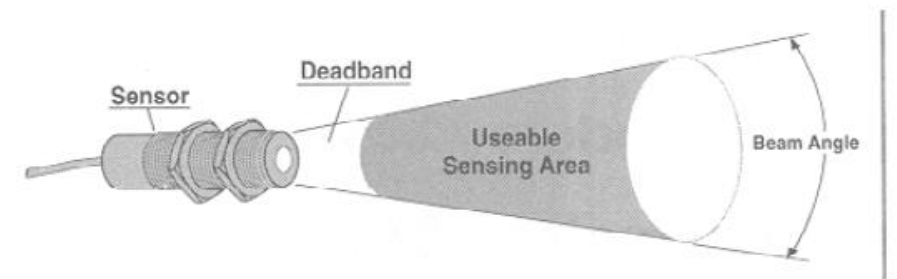
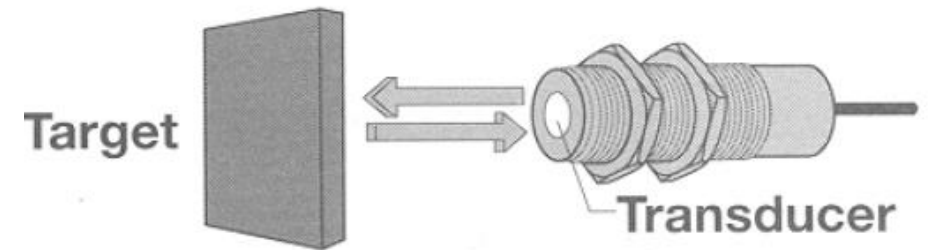
Ultrazvočna tipala

Delovanje:

- Senzor odda ultrazvočni signal.
- Če je objekt pred senzorjem in v njegovem dosegu, se bo signal odbil nazaj proti senzorju
- Ko senzor zazna odmev, lahko iz časa od oddaje do prejetja signala izmeri razdaljo do objekta

Omejitve

- Mrtvo območje na začetku: dokler signal ni oddan, sprejemnik ne more začeti zaznavati
- Širok kot: z oddaljevanjem objekta od signala se tudi energija v odmevu zmanjšuje, zato ima senzor omejen največji domet



Optična tipala

Zelo popularna

Zaznavajo svetlobo, zato lahko tipajo zelo različne objekte, razen prosojnih

Za razliko od ultrazvočnih, delajo v vakuumu in imajo mnogo ožji snop žarkov

Različne valovne dolžine svetlobe

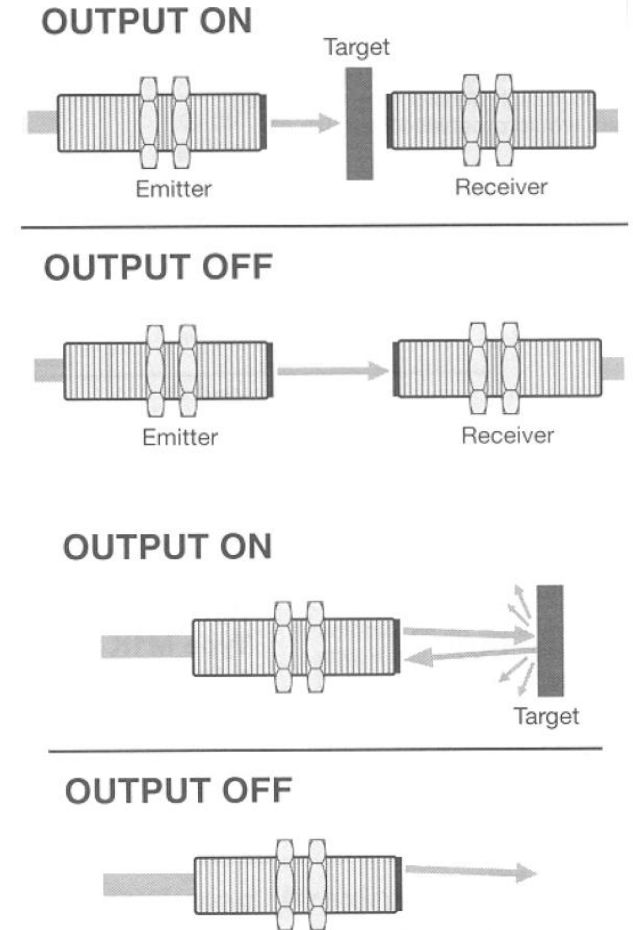
- žarnica z rdečimi filtri, rdeča LED, IR LED, laserska

Oddajanje pulzno, z visoko frekvenco, sprejemnik je naravnan na to frekvenco – s tem odpravljen morebiten vpliv sončne svetlobe na delovanje sensorja

Optična tipala

Trije tipi:

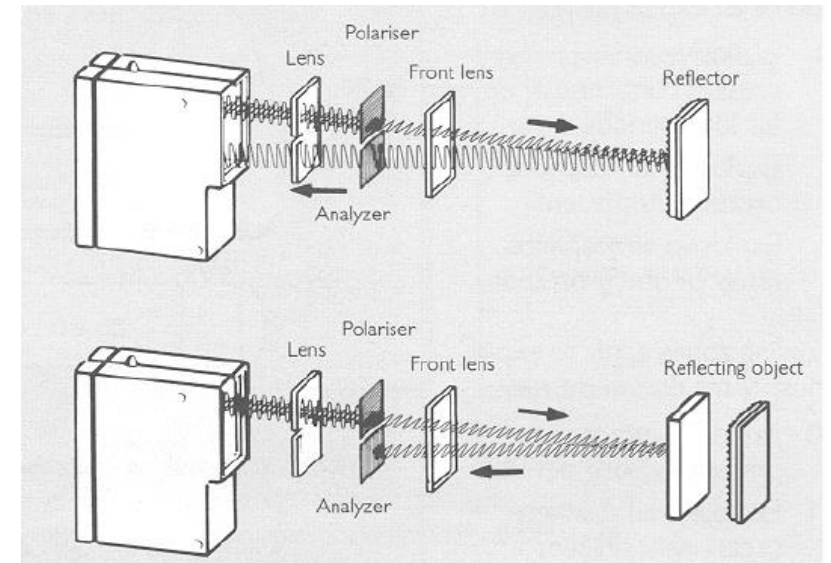
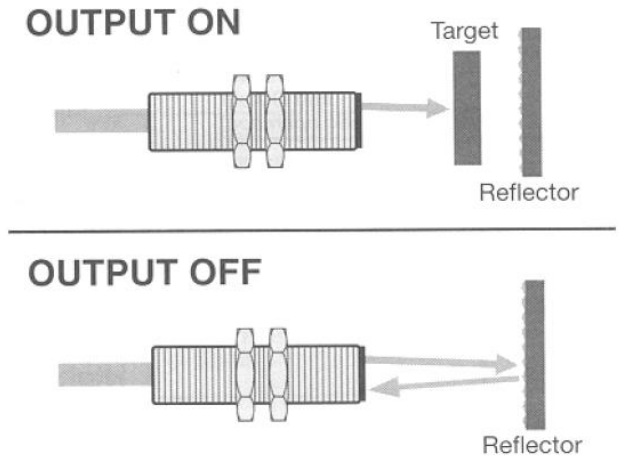
- Ločena oddajnik in sprejemnik
 - Široko območje delovanja
 - sprejemnik in oddajnik sta ožičena ločeno
- Oddajnik in sprejemnik v istem ohišju (diffuse-reflective)
 - Odziva se na svetlobo, odbito od objekta
 - Slabo dela na prosojnih objektih ali na objektih, na katerih se svetloba slabo odbija (črna barva)
 - Objekti ne smejo imeti lukenj, površina naj bi bila čim bolj ravna
 - Dušenje ozadja: spremenimo položaj leče, da omejimo domet



Optična tipala

Trije tipi:

- Oddajnik in sprejemnik v istem ohišju, na drugi strani odbojnik (retro-reflective)
 - Na drugi strani je samo odbojnik
 - Najbolj kompleksni – da ni težav z visoko odbojnimi objekti je svetloba polarizirana
 - Sprejemnik in oddajnik uporabljata polarizacijske filtre, obrnjene za 90 stopinj. Odbojnik je oblikovan tako, da smer polarizacije svetlobe obrne za 90 stopinj.
 - Če se svetloba odbije od objekta, ta polarizacije ne obrne in pravilno polarizirana svetloba ne pride do sprejemnika.

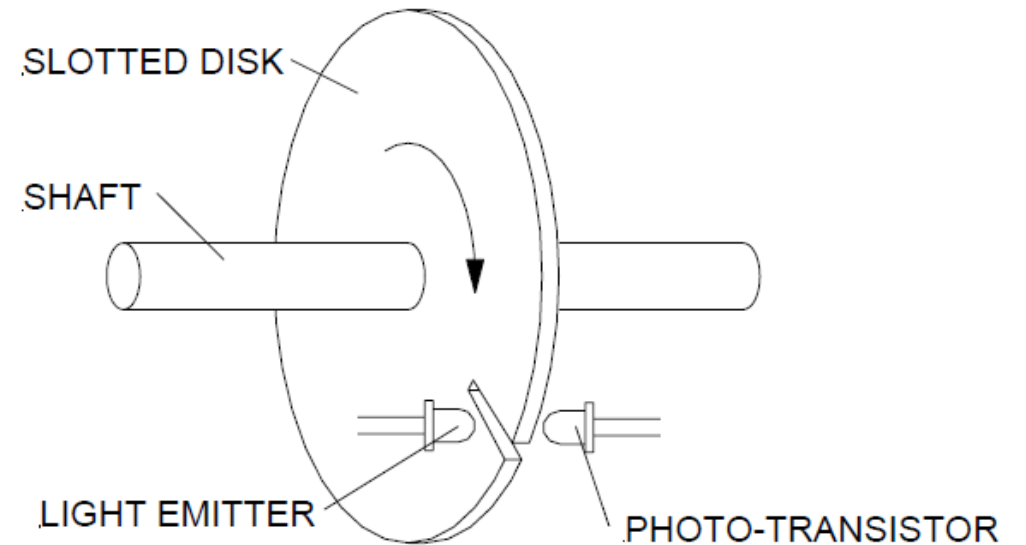


Položaj: optični dajalnik

Optični dajalnik impulzov ali enkoder

Osnovna ideja: disk z zarezo

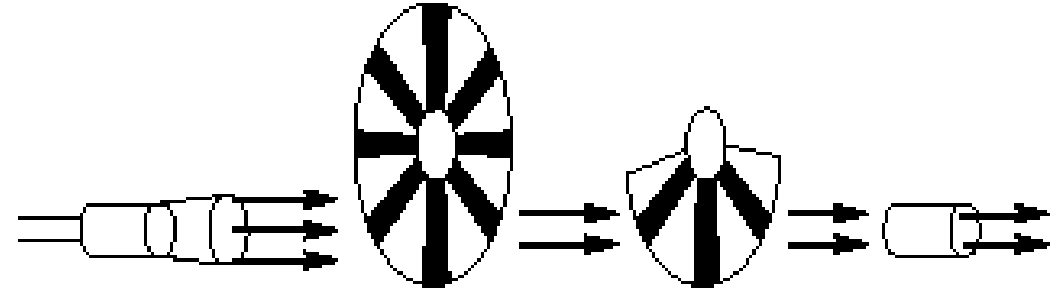
- Lahko se ga uporablja za nastavitev osnovnega položaja stroja (ang. homing)
- Samo ena meritev na obrat



Položaj: optični dajalnik

Princip

- Sestavni deli:
 - usmerjen vir svetlobe,
 - režast disk (prosojen | neprosojen),
 - maska z inverznim vzorcem,
 - Detektor
- Disk se vrti in prekinja žarek
- Usmerjen vir svetlobe in maska sta namenjena natančnejšemu odčitavanju
 - Samo ko sta prosojni področji diska in maske naravnana pride žarek do detektorja



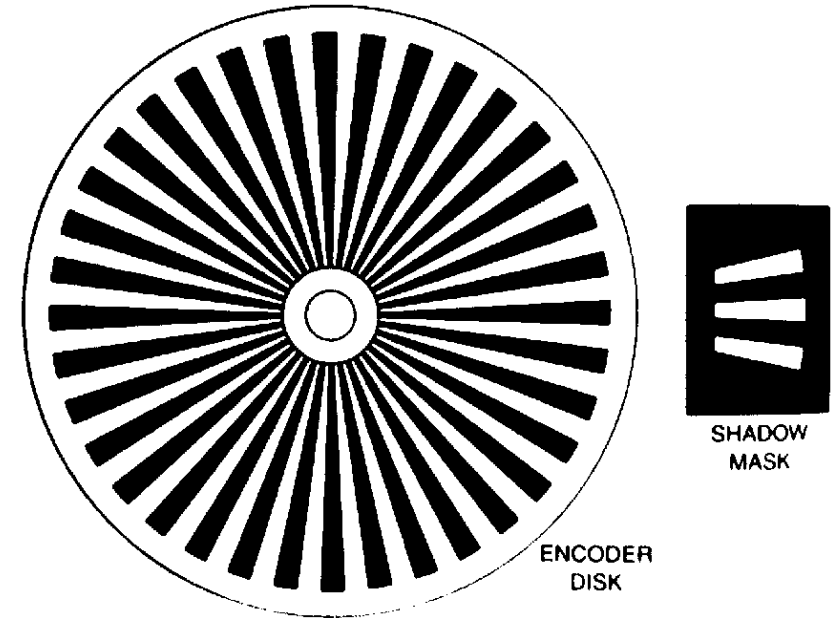
Tipa:

- Inkrementalni dajalnik
 - Impulz za določen premik, skupen premik je določen s seštevanjem
 - Ob vklopu sistema je nujno referenciranje
- Absolutni dajalnik
 - Dajalnik si ob izklopu zapomni položaj

Položaj: optični dajalnik

Inkrementalni optični dajalnik

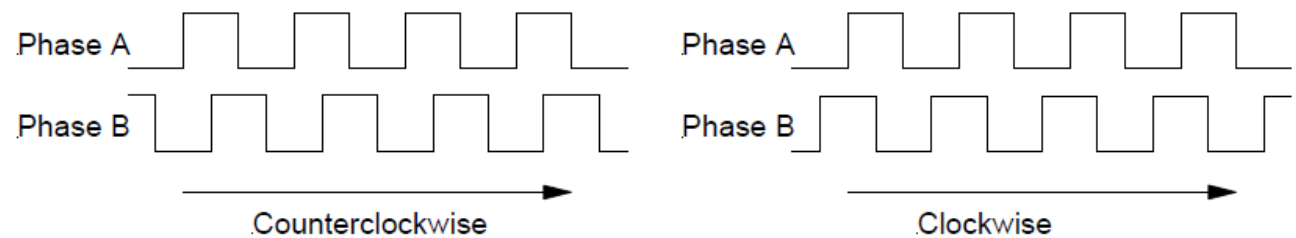
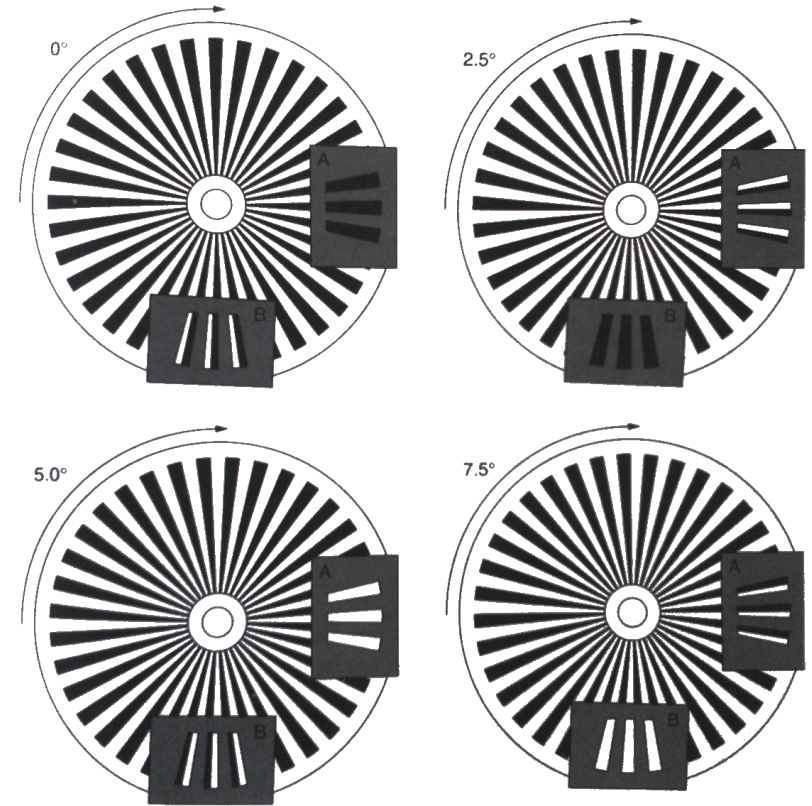
- Disk, na katerem se zelo pogosto izmenjujejo temna in prosojna območja
- Ker so območja zelo blizu skupaj, je težko natančno nastaviti optični sprejemnik in oddajnik, zato se uporablja maska
- Od 1024 do nekaj 10.000 pulzov na obrat
- Zazna samo relativno spremembo, ne pa tudi absolutnega položaja
- Zna določiti smer vrtenja (naslednja stran)



Položaj: optični dajalnik

Inkrementalni optični dajalnik

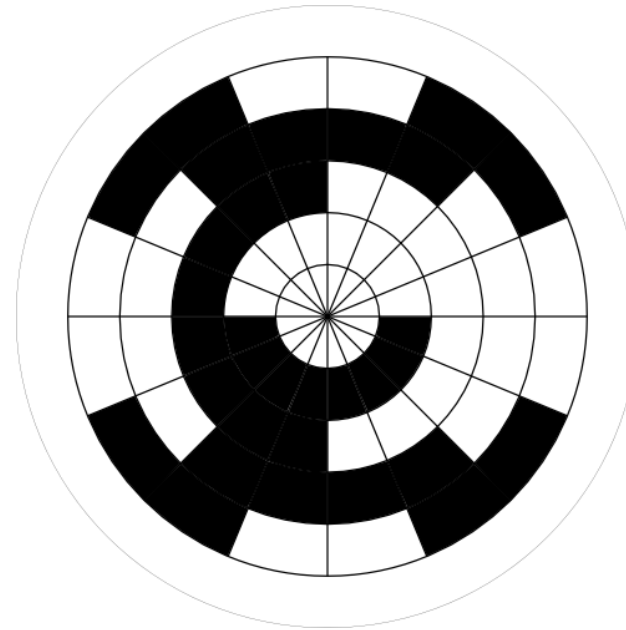
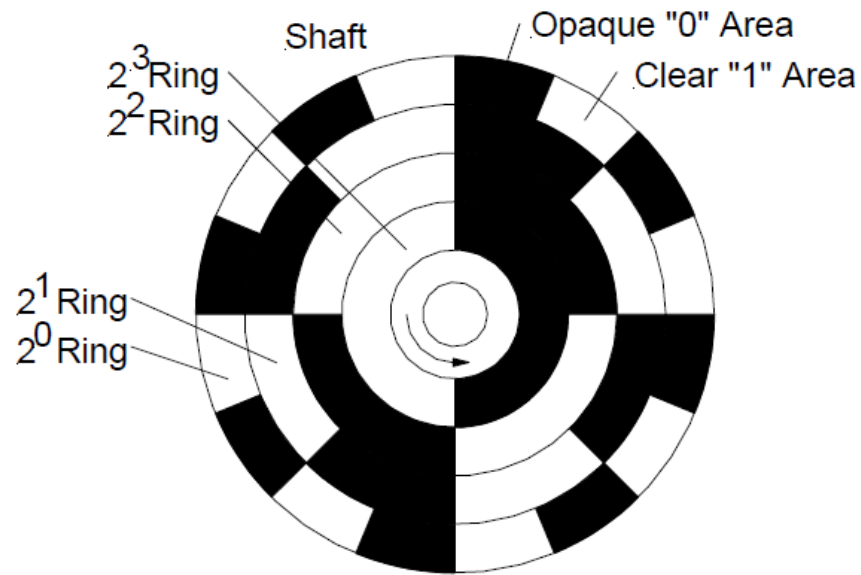
- Običajno dve maski, zamaknjeni za $\frac{1}{4}$ periode – ko je maska A popolnoma pokrita, je maska B pokrita polovično.
- Smer vrtenja:
 - A prehiteva B (vrtenje nasproti urinega kazalca)
 - B prehiteva A (vrtenje v smeri urinega kazalca)



Položaj: optični dajalnik

Absolutni dajalnik

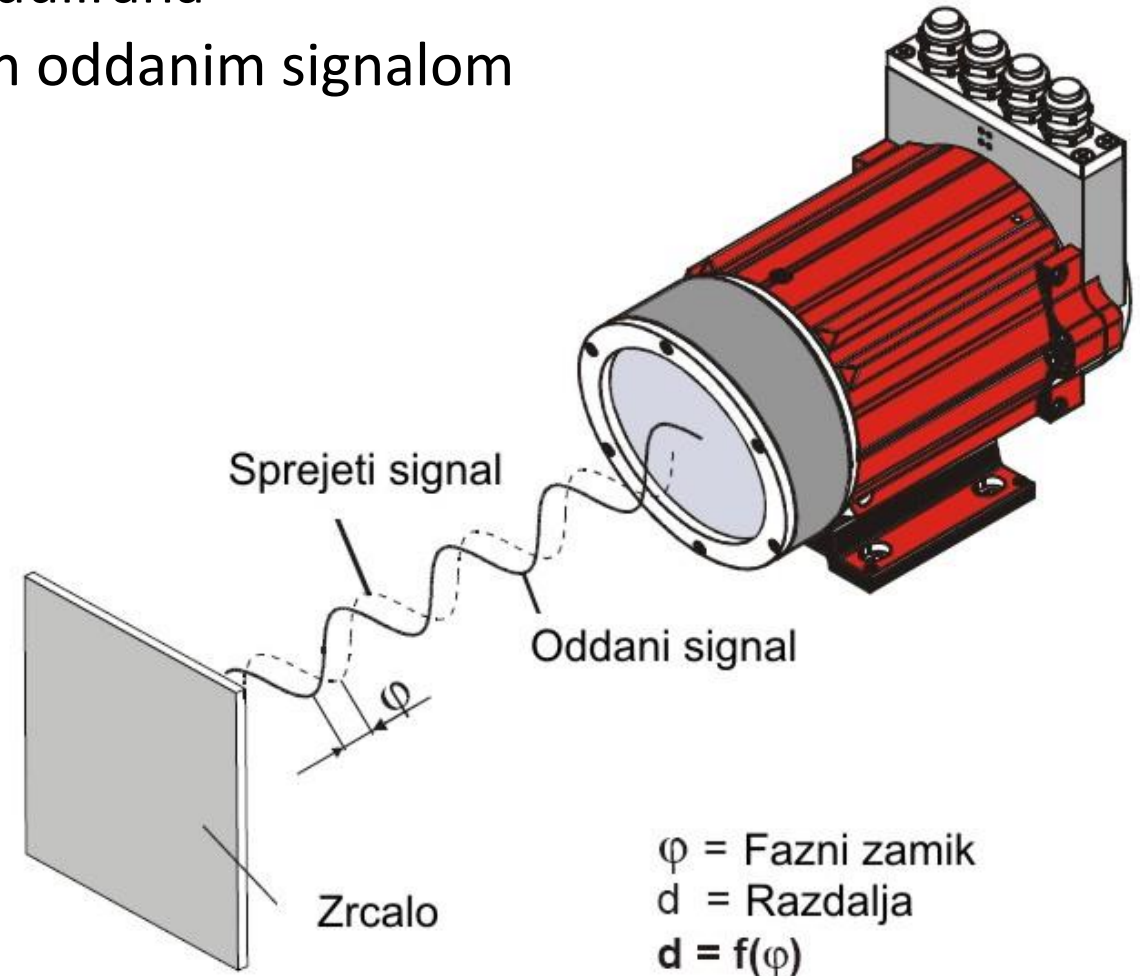
- Ob izklopu si zapomni položaj
- Kodiranje vzorca na disku: binarna ali Grayeva koda



Položaj: laser

Princip faznega zamika

- Jakost oddanega signala je sinusno modulirana
- Merjenje fazne razlike med sprejetim in oddanim signalom
- Fazni zamik: $\varphi \propto d \cdot f_{\text{Modulacije}}$
 - Višja frekvenca, večja ločljivost
 - Periodično spreminjanje faznega zamika
 - Perioda faznega zamika je velika
 - povečanje območja z dvema merjenjema pri različnih $f_{\text{Modulacije}}$



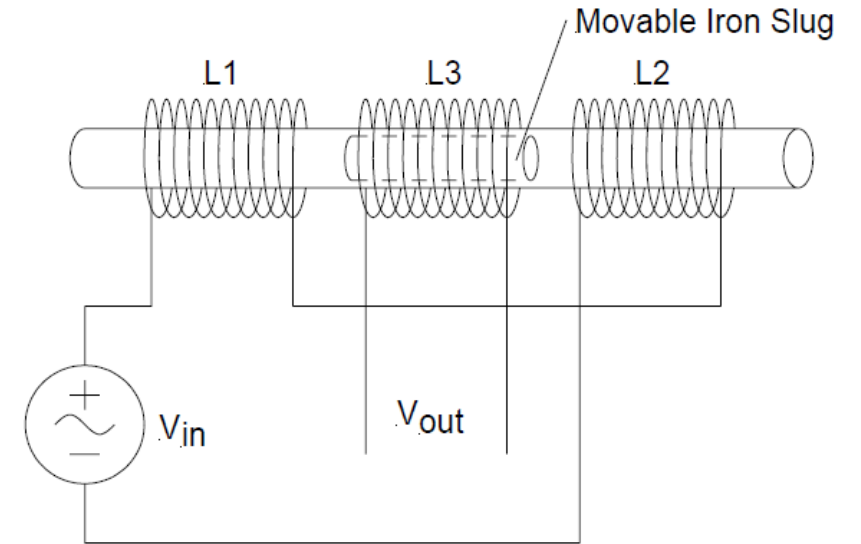
Položaj: transformatorsko merjenje

Tri tuljave

- Primarni (L1, L2) sta fiksni, skozi njiju teče izmenični tok v nasprotnih smereh
- Sekundarna (L3) se premika

Ideja

- L1 in L2 ustvarjata enako močno magnetno polje, ki je obrnjeno v nasprotni smeri. Magnetno polje se na sredi zato izniči, na L3 zato ni napetosti
- Če L3 rahlo premaknemo proti L2 se zaradi spremembe magnetnega polja na L3 inducira napetost, ki je v fazi z napetostjo na L2
- Vsako nadaljnje premikanje proti L2 linearno poveča napetost na L3



Sila

Sila, navor, teža, tlak

- Meritve majhnih premikov, $F = k x$
- Merilni lističi
- Piezo-električni pretvorniki

Pospeški

- Tako kot pri sili, meritve majhnih premikov mase, $F = m a$

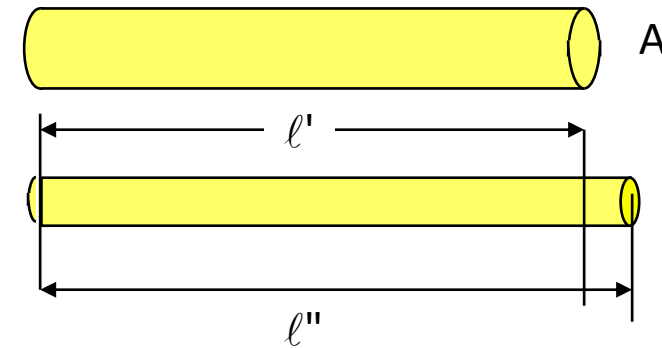
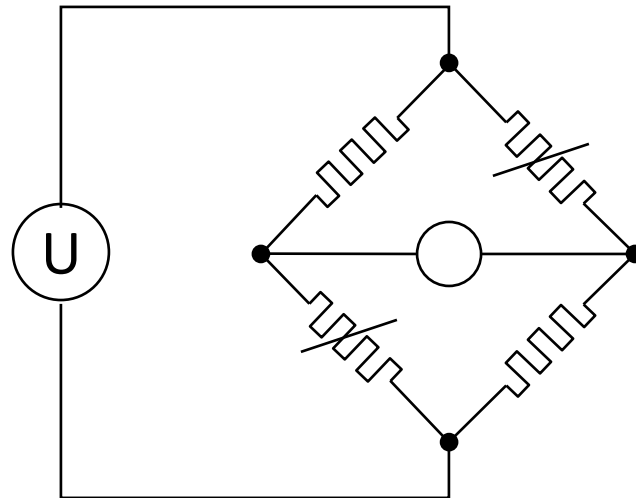
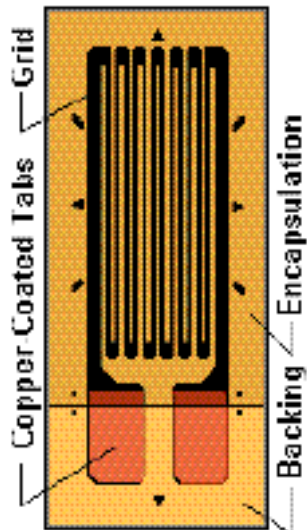
Sila: merilni lističi

Upornost žice z raztezanjem narašča

Temperaturna kompenzacija

- Wheatstonov mostiček

Pogosta uporaba: stavbe, mostovi, jezovi



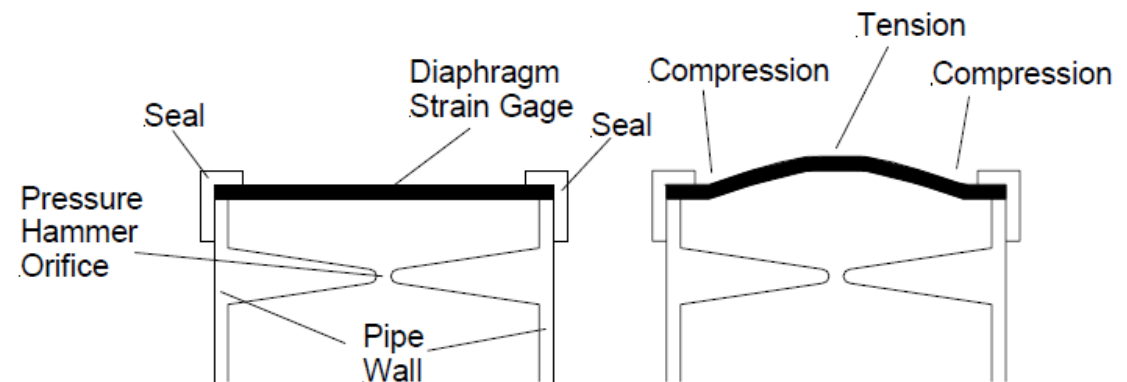
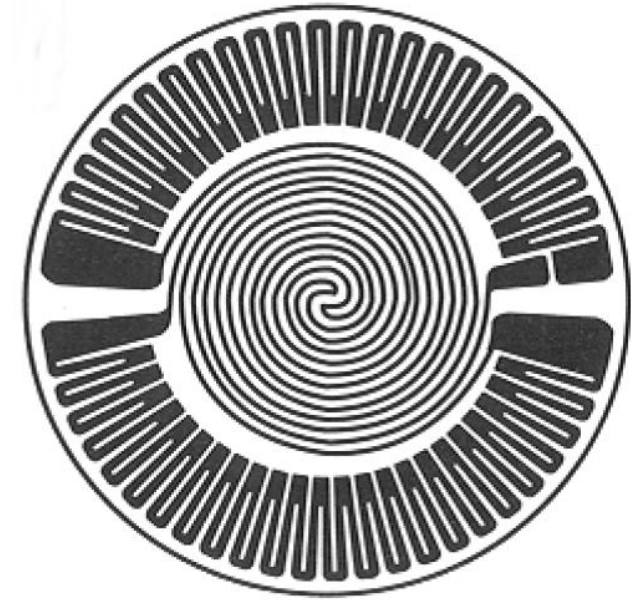
$$R = \rho \frac{l}{A} = \rho \frac{l^2}{V}$$

V - prostornina, ρ - konstanta

Sila: merilni lističi

Merilna diafragma

- Ciklično oblikovani merilni lističi
- Ob delovanju sile (pritiska) na diafragma, se le-ta v središču raztegne, ob robovih pa skrči
- Vezava robnega dela in centralnega dela na različna mesta v Wheatstonovem mostičku, signal ustrezno ojača in izboljša meritve



Sila: piezo-električni pretvorniki

Piezoelektrični kristali ob deformaciji ustvarijo električno polje ob

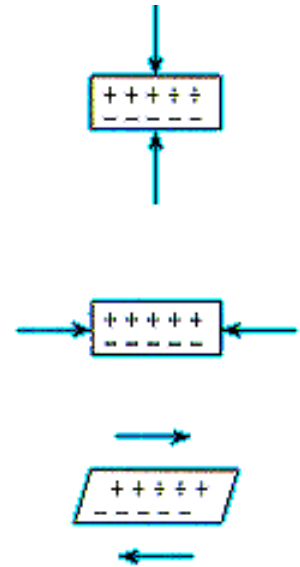
- Longitudinalna, transverzalna, strižna

Statične meritve

- Izgube naboja → padanje napetosti

Odlične lastnosti

- Visoki pritiski, do 100 MPa
- Temperaturna odpornost 500 °C
- Skoraj konstantna skala na velikem temperaturnem območju



Temperatura

Najpogosteje merjena količina v industriji

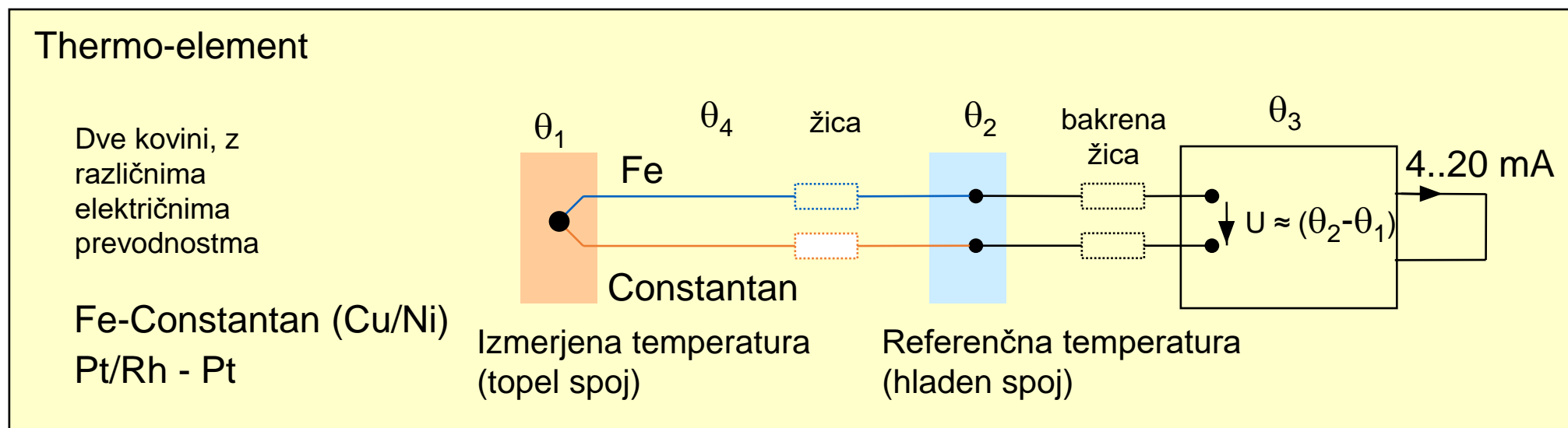
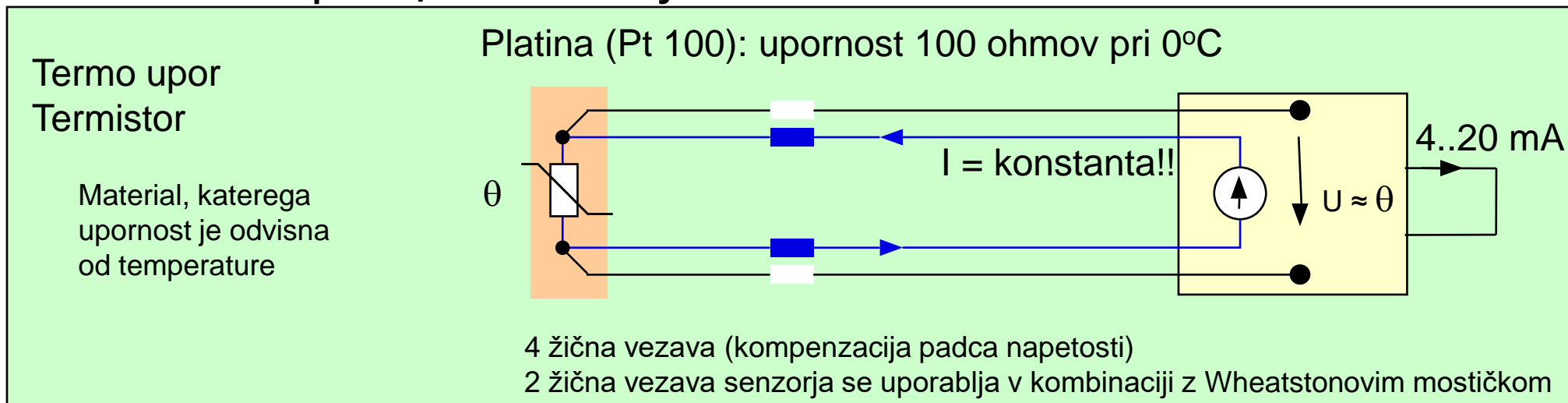
Načini meritev

- Bimetal
 - Mehanski, diskretni, izkorišča različno temperaturno razteznost dveh kovin
 - + zelo poceni, močno uporabljan
- Termo upor
 - Upornost kovine narašča s temperaturo
 - + cena, robustnost, veliko temperaturno območje, - tokovni vir, linearizacija
- Termistor
 - Upornost polprevodnika je odvisna od temperature
 - + cena, občutljivost, - območje, tokovni vir, nelinearnost
- Termočlen
 - Različni kovini, napetost je sorazmerna temperaturni razliki med toplim in mrzlim spojem
 - +natančnost, visoke temperature, točkovno merjenje, - nizka napetost, linearizacija
- Spektrometer
 - Meritev IR sevanja z ustreznimi polprevodniki
 - + najvišje temperature, temperatura površin, brez kontakta, - cena



Temperatura

Vezava termo upora/termistorja in termo element



Nivo tekočin

Pulzni laser

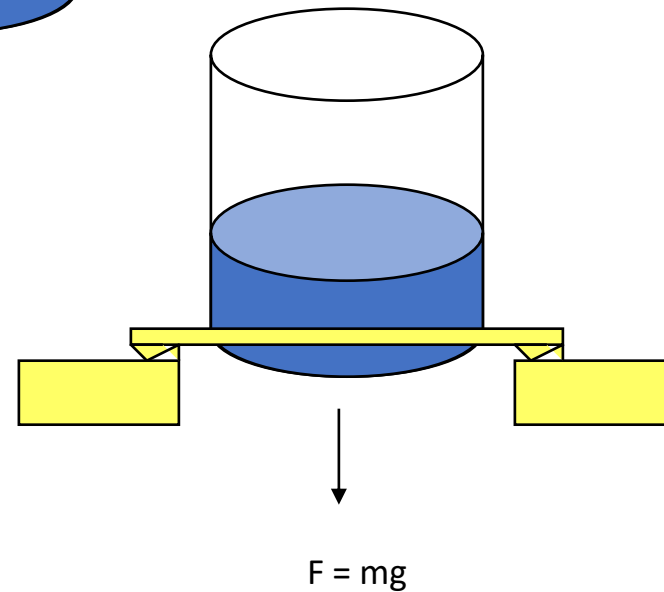
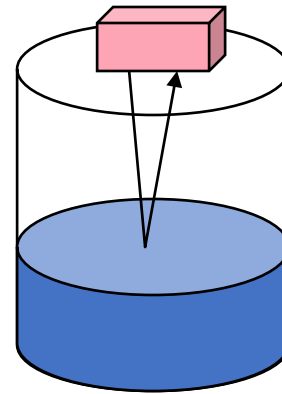
Pulzno z mikrovalovi

Ultrazvočno

Bremenska celica (merilni lističi)

Kapacitivno (neprevodna tekočina)

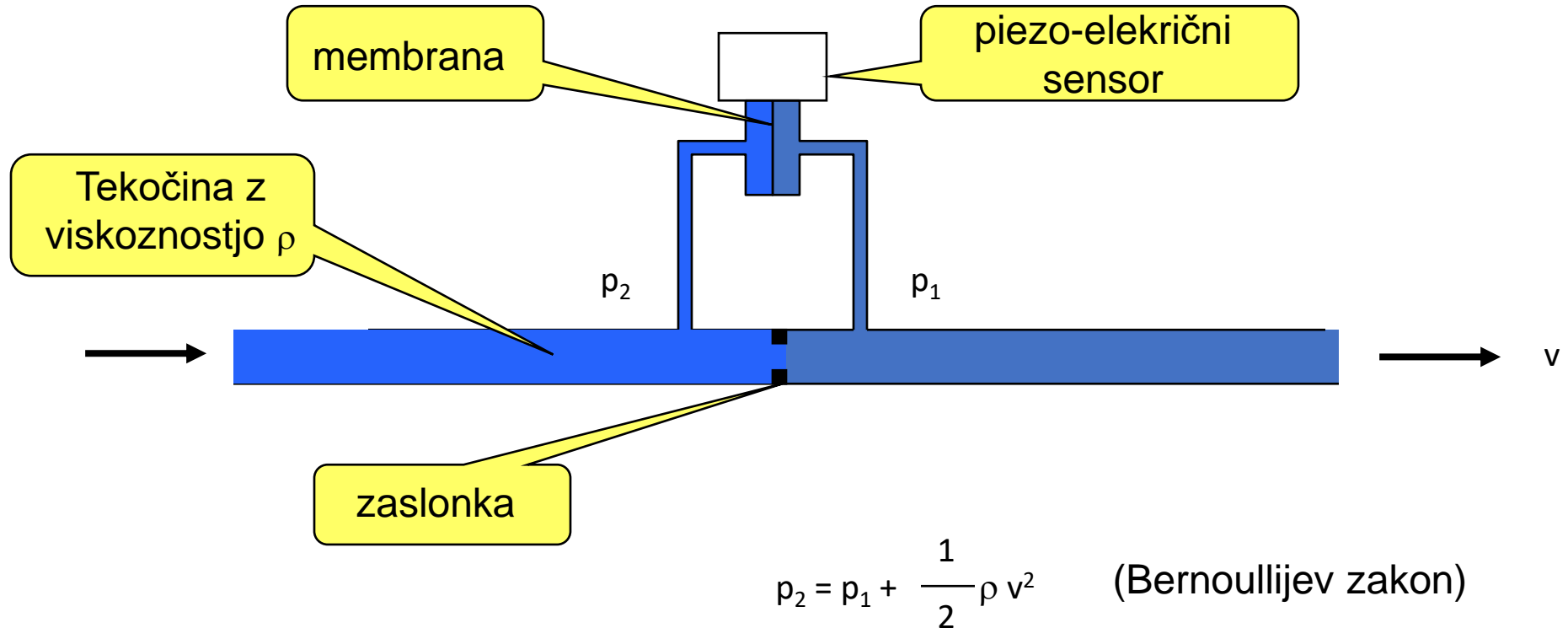
Mehansko: plovec



Hitrost pretoka tekočin

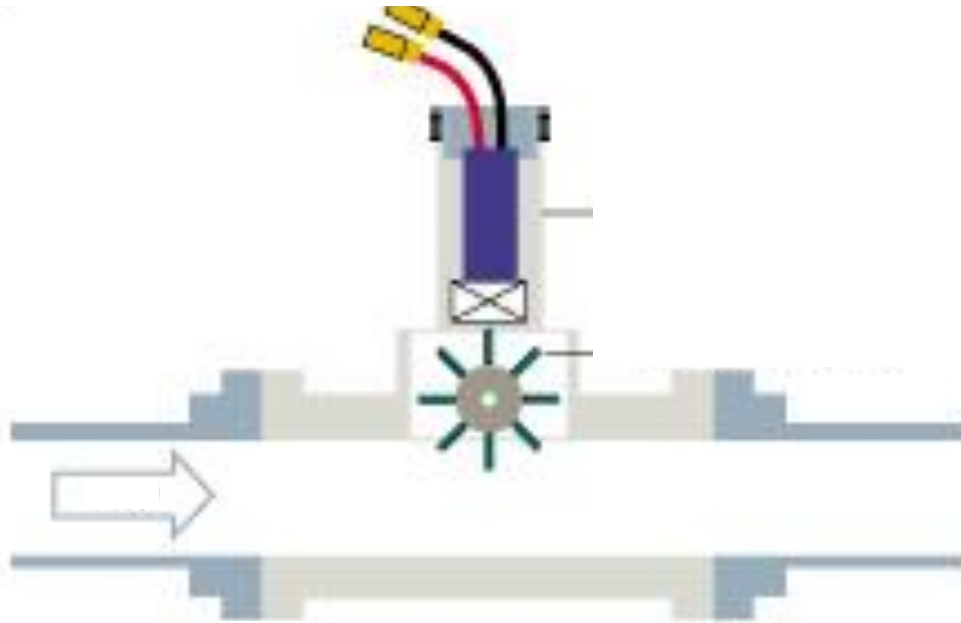
Zaslonka

- Meritev tlačne razlike

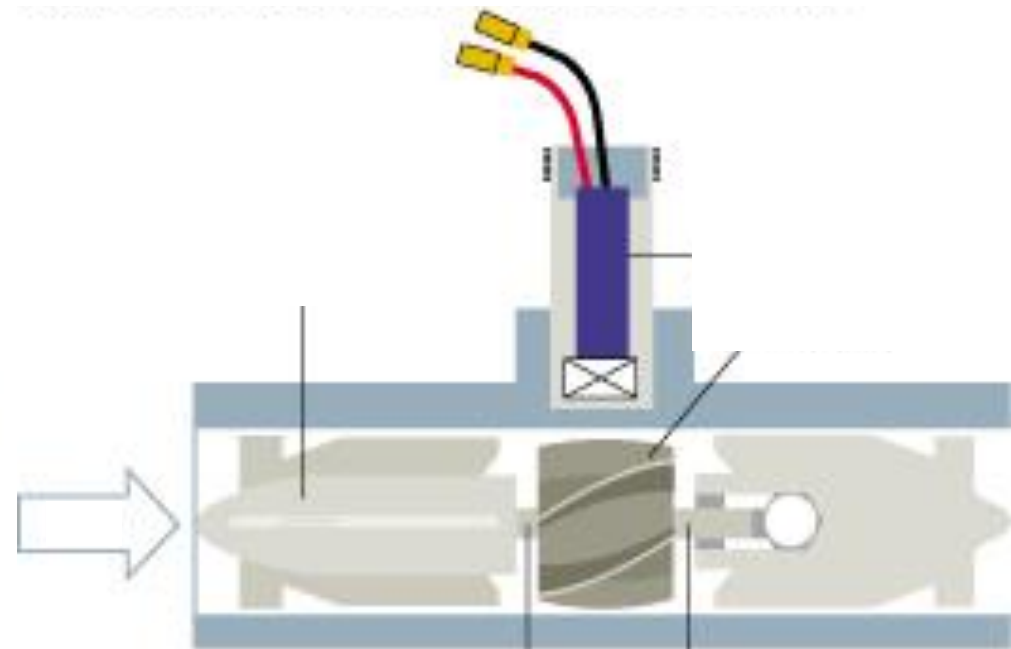


Hitrost pretoka tekočin

Vodno kolo

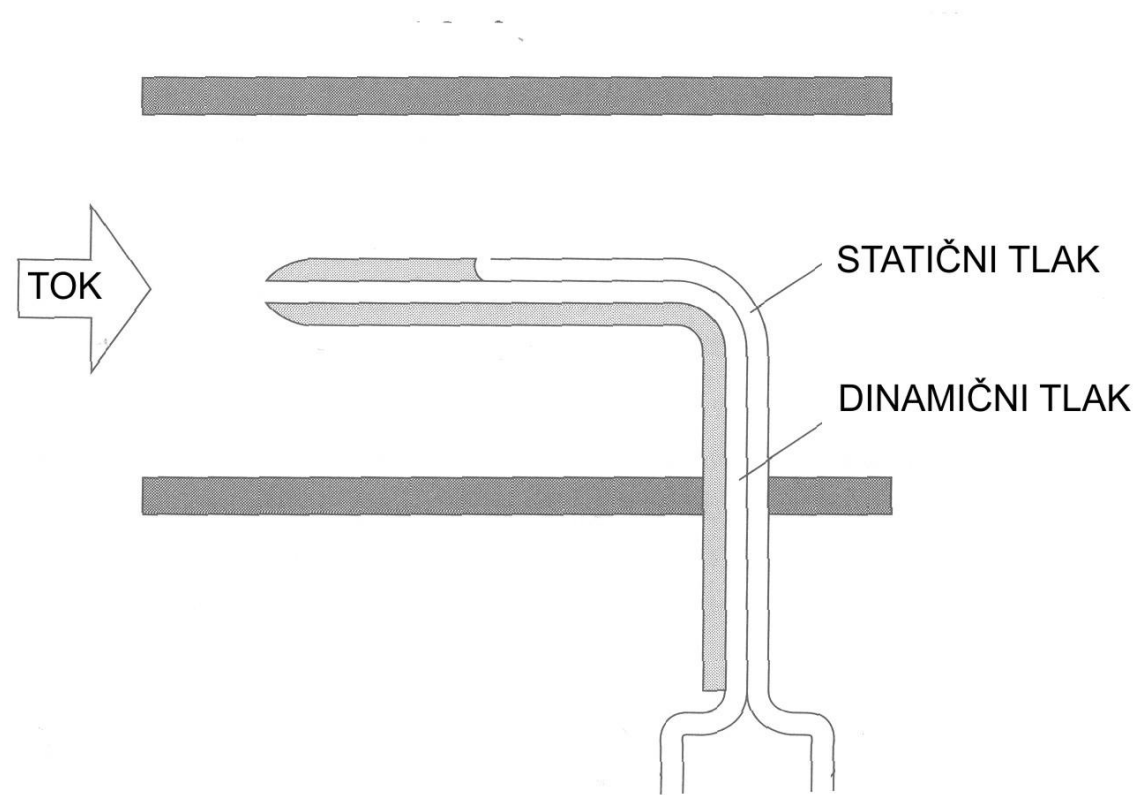


Turbinski merilnik



Hitrost pretoka tekočin

Pitotova cev



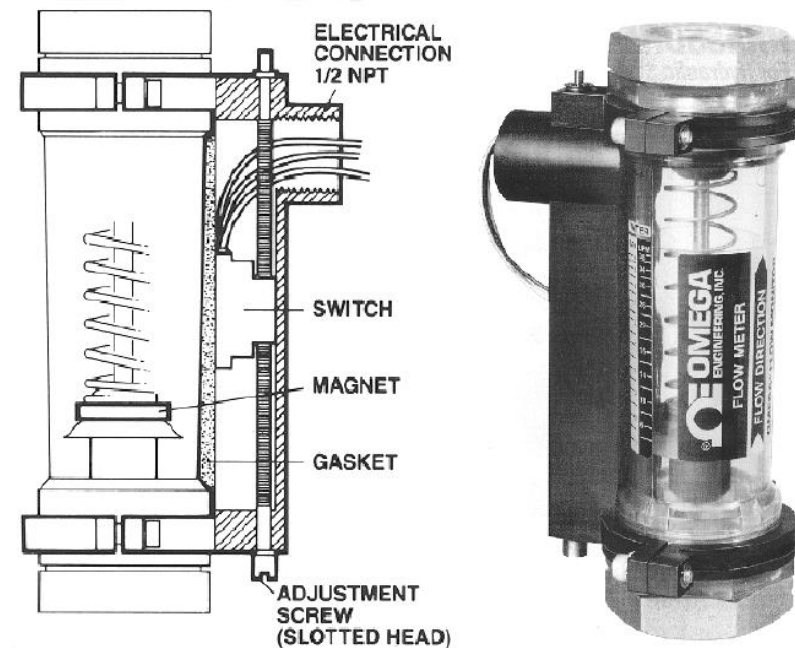
Hitrost pretoka tekočin

Senzor pretoka z magnetnim stikalom

- Se aktivira, ko doseže nastavljeno vrednost
- V cev vstavimo oviro
- Če tekočina oviro dovolj odkloni, se senzor aktivira

Termalni senzor pretoka

- Meri koliko toplote tekočina odvede od grelca, ki je nameščen v cevi
- Dve sondi:
 - ena ni greta – referenčna, za kompenzacijo temperature tekočine
 - druga je greta – za določanje hitrosti
- Super: ni mehanskih delov, se ne umaže, primerno za nečiste tekočine



Izvršni sistemi

Roke sistema za vodenje

- v procesu povzročijo spremembo v pretoku energije ali snovi
- informacijo v obliki standardiziranih signalov pretvorijo v ustrezno spremembo v procesu

Predstavljajo 10% elementov v polju

Lahko so binarni ali analogni

Upravljeni so z enakimi električnimi signali kot senzorji, vendar z veliko večjimi močmi

- 4..20 mA, 0..10 V, 0..24 V, ...

Tipični predstavniki

- Električni kontaktorji in releji
- Ogrevalni elementi
- Pnevmatiski in hidravlični elementi
- Električni motorji

Kontaktorji in releji

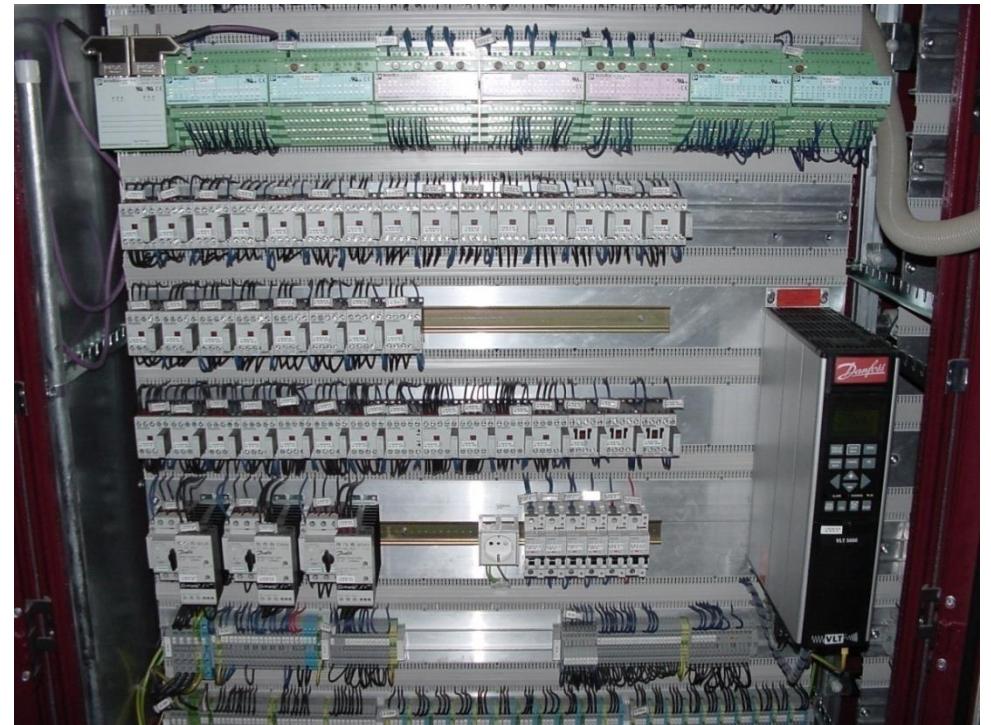
Električni tok, ki teče skozi rele, premika jedro v elektromagnetu in z jedrom tudi kontakte

Razlika

- Releji so manjši, primerni za manjše tokove
- Kontaktorji imajo več sekundarnih kontaktov

Najstarejši način za izvedbo logičnih funkcij

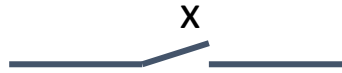
Danes se uporabljajo predvsem za prilagajanje napetostnih in tokovnih nivojev



Kontaktorji in releji

Označevanje relejev na shemah

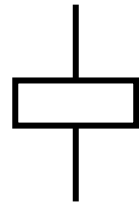
- Normalno odprti kontakt



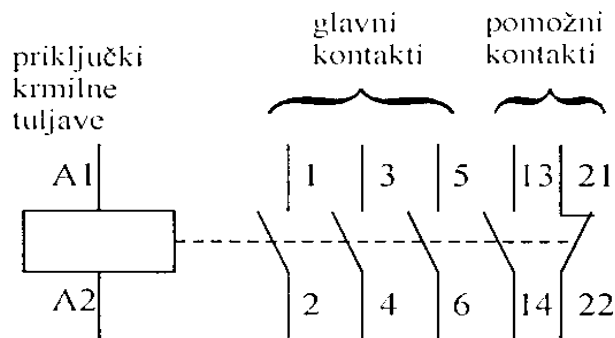
- Normalno zaprti kontakt



- Tuljava

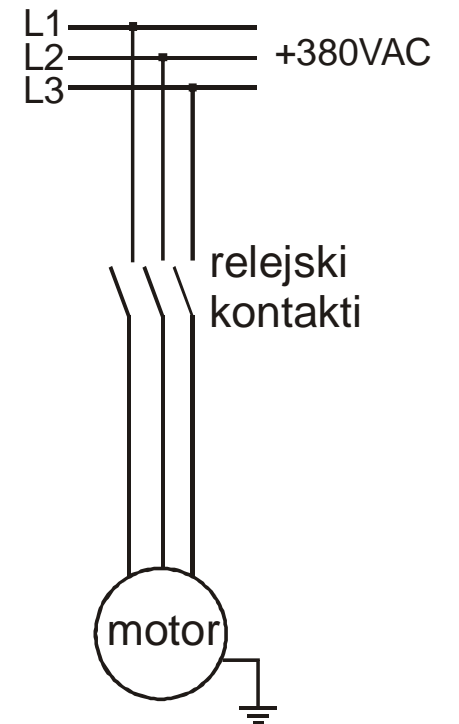
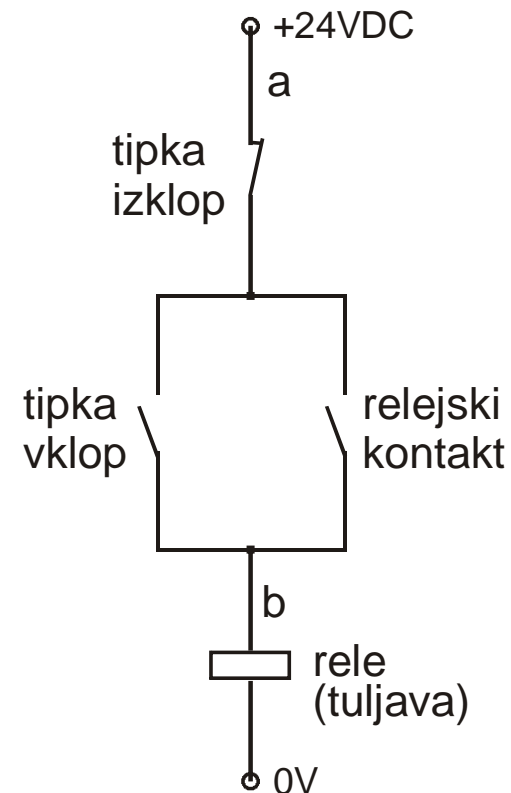


Shema



Primer uporabe

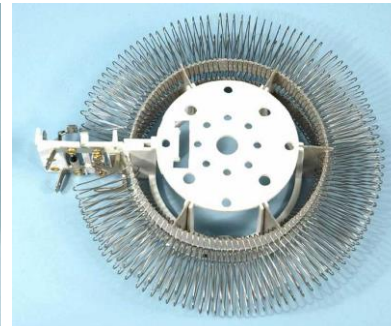
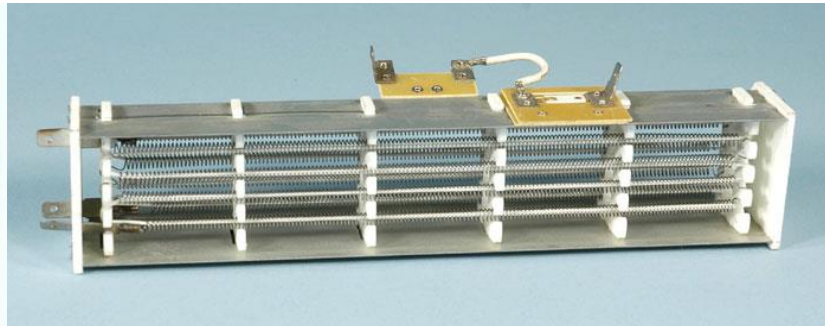
- Motor se začne vrteti, ko za trenutek pritisnemo tipko vklop
- Motor se ustavi, ko za trenutek pritisnemo tipko izklop



Ogrevalni elementi

Pretvorba električne energije v toploto

- Grelna žica
 - Zaradi upornosti materiala se le-ta greje, ko skozenj teče električni tok
- Posredni sistem: gretje medija, ki greje naprave



Pnevmatski in hidravlični elementi

Primeri



Črpalke, valji, bati

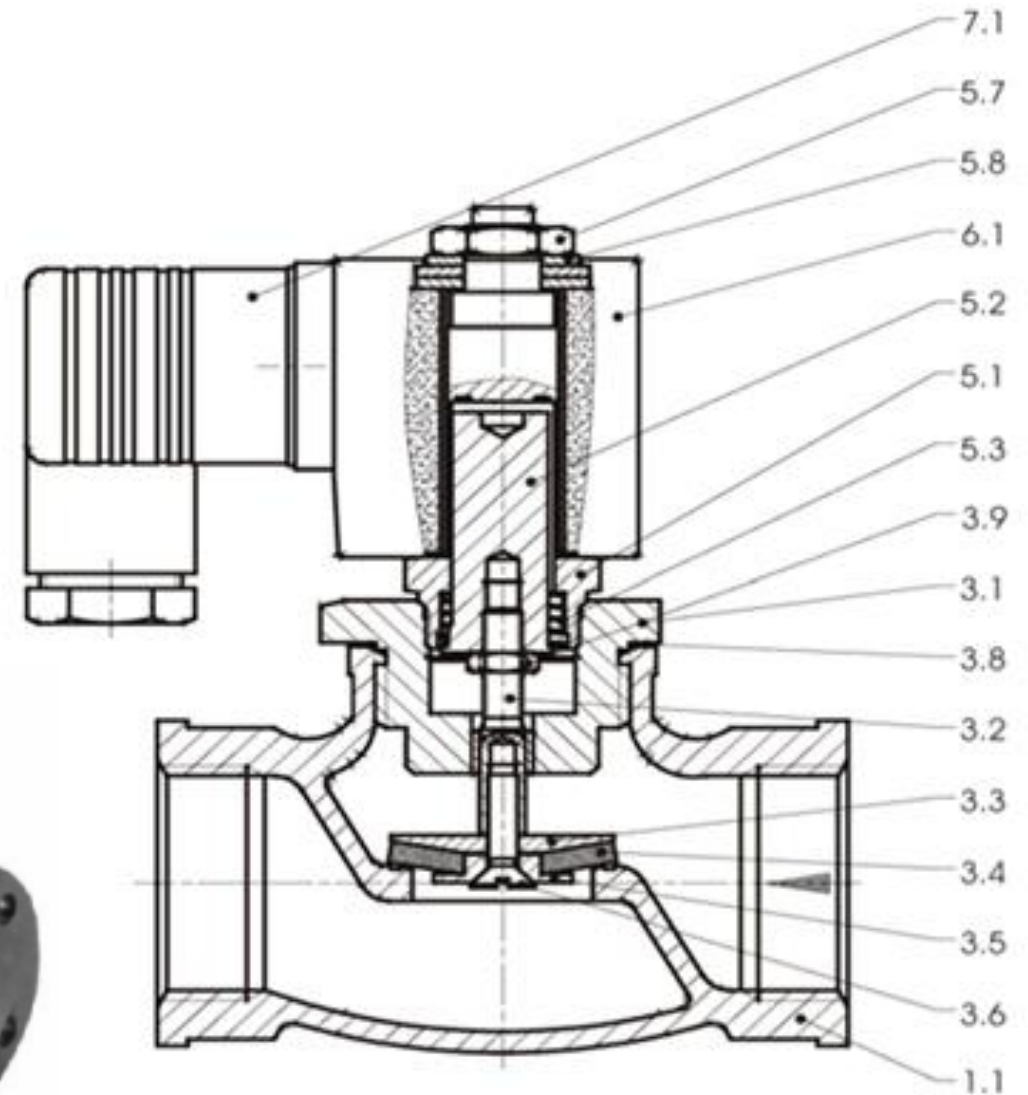


Pnevmatska stikališča in stikala

Pnevmatski in hidravlični elementi

Elektromagnetni ventil

- Odpiranje ventila
 - Električni tok, ki teče skozi navitje (6.1) ustvari magnetno polje
 - Magnetno polje potegne jedro (5.2) in z njim tudi tesnilo (3.4) v tuljavo
 - Kapljevina ima prost pretok
- Zapiranje ventila
 - Ko električni tok ne teče skozi navitje kapljevina sama potisne tesnilo navzdol in si zapre pot



Električni motorji

Enosmerni motorji (1832)

- Enostavno spreminjanje vrtljajev s spreminjanjem napetosti ali toka
- Danes se uporabljajo tam, kjer so potrebni visoki navori

Izmenični motorji (1888)

- Včasih: frekvenca vrtenja določena z omrežno frekvenco 50 Hz → 2900 /min
- Danes: vedno bolj popularni, v povezavi s frekvenčnimi pretvorniki, s katerimi lahko frekvenco poljubno spreminjamo
- Asinhronski | sinhronski motorji
 - A: Rotor se vrti sinhrono s poljem, namerno zaostaja za poljem
 - S: Rotor je napajan, polji se ujameta, ne zaostaja za poljem

Servo motorji

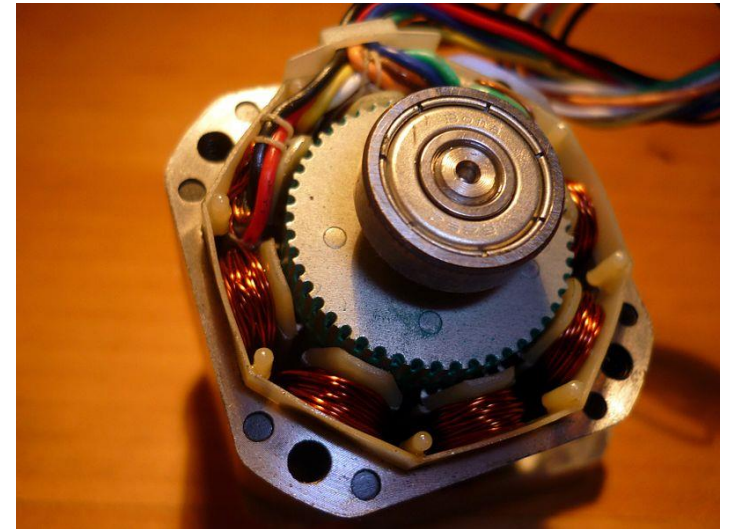
- Dodan imajo optični dajalnik impulzov, povratna zanka
- Namenjeni so natančnemu pozicioniranju
- Majhna vztrajnost rotorja → hitro spreminjanje dinamike



Električni motorji

Koračni motorji

- Rotor se zavrti samo enkrat pri spremembi vzbujanja na statorju
- Robotika
- Delovanje
 - Rotor v obliki zobnika
 - Okrog množica magnetov
 - Vklp posameznega magneta pritegne rotor in ga poravna z magnetom, pri tem se rotor malenkost zavrti
 - Magneti so rahlo zamaknjeni, zato vklp naslednjega magneta spet rahlo obrne rotor....



Električni motorji

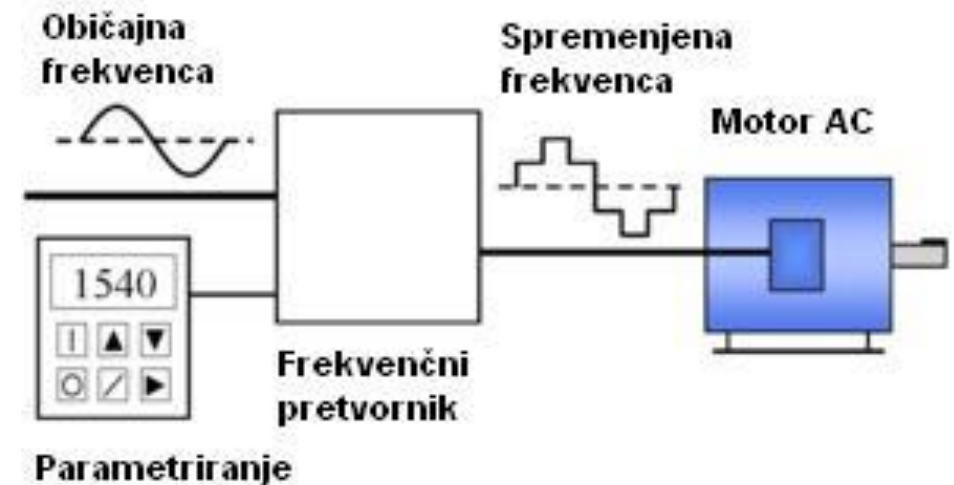
Asinhronski motorji

- Frekvenca osi [1/min]
 - f – frekvenca napajalne napetosti [1/s]
 - p – število polov
 - $f = 50$ Hz, $p=4$ (2 para), $f_{osi} = 1500$ rpm
- Hitrost vrtenja lahko spreminjamo s spreminjanjem napajalne frekvence

$$f_{osi} = \frac{60 \times f}{p / 2}$$

Frekvenčni pretvornik

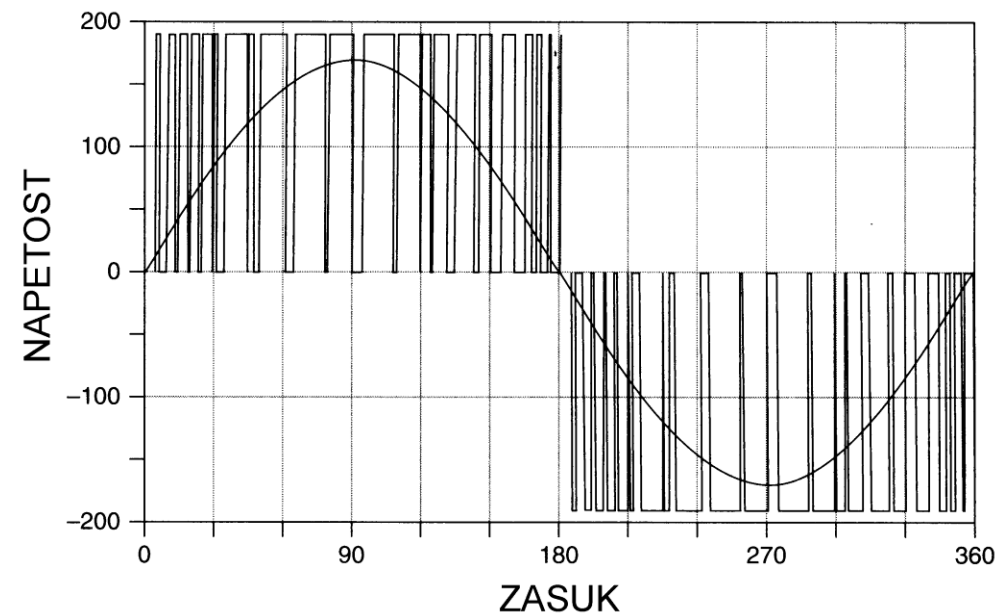
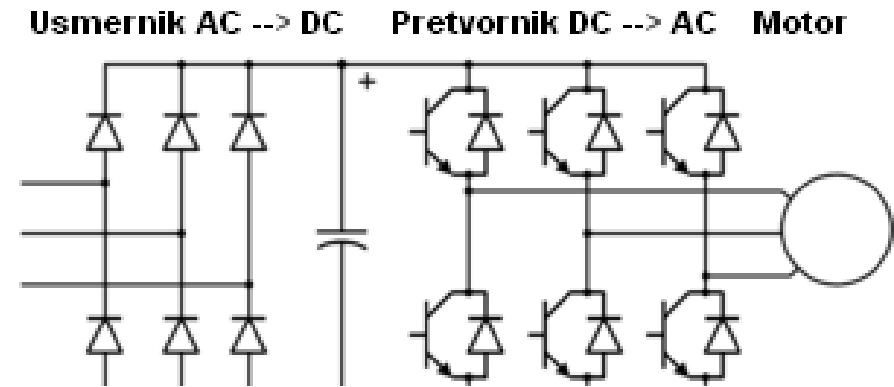
- Izmenično napetost usmeri, nato pa glede na zahtevano hitrost vrtenja, navor oziroma moč določi frekvenco napajalne napetosti



Električni motorji

Frekvenčni pretvornik

- Zgradba
 - DC → AC
 - Tehnologija IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)
- Princip delovanja
 - IGBT vklaplajo in izklaplajo DC napetost v določenih intervalih, pulzi so različno dolgi
 - Na ta način generirajo spreminjajočo se AC napetost na izhodnem delu.
 - Napetost se mora linearno spreminjati s frekvenco, da zagotovi konstantno moč motorja



Električni motorji

Frekvenčni pretvornik

- Tipični krmilni signali in odziv (hitrost motorja)

