

# Mjerna tehnika

## **MJERENJE UGAONE BRZINE I BROJA OBRTAJA**

# Sadržaj lekcije:

- Uvod
- Mjerenje ugaone brzine pomoću tahometara
- Senzori ugaone brzine

# Uvod

- Ugaona brzina nekog objekta se definišira kao promjena vrijednosti ugla rotacije u jedinici vremena i predstavlja mjeru brzine kojom se objekat obrće.
- Najčešća jedinica za broj obrtaja je obrtaj po minuti (round per minute), ali može se koristiti bilo koja jedinica mjere ugla po jedinici vremena.
- Translatorsna i ugaona brzina u tehničkoj praksi mjere se u širokom opsegu: translatorsna brzina 0-15000 m/s, a ugaona 0-20000 rad/s.
- Danas se za mjerenje ugaone brzine, prema ISO sistemu jedinica, koristi jedinica  $s^{-1}$ .

# ABS uređjaji

- **Senzori za mjerenje ugaone brzine se koriste kod sistema automatskog upravljanja, kao što su ABS (Antilock Brake Sistem), brzina približavanja alata obratku, kod robota itd.**
- **Uređaji za mjerenje ugaone brzine, kojom se obrću rotirajući elementi, nazivaju se tahometri.**

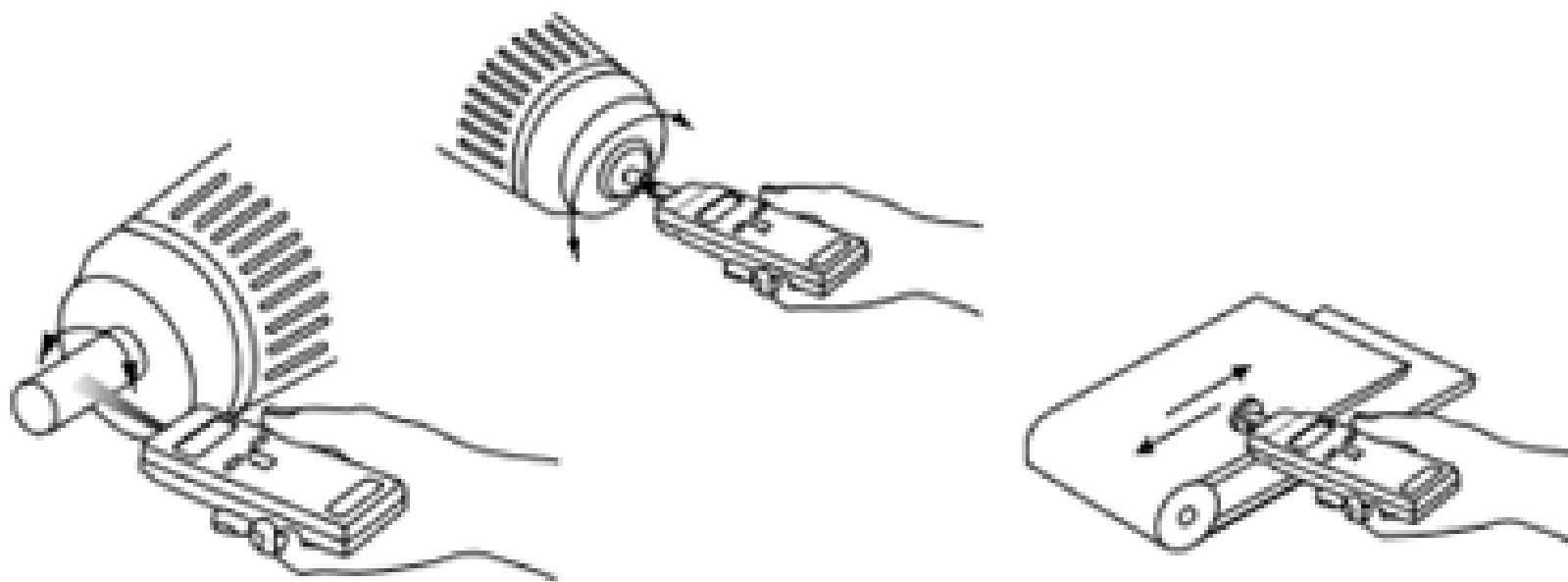
# Mjerenje ugaone brzine pomoću tahometara

- Za mjerenje mehaničke veličine, ugaone brzine, koriste se različiti principi na kojima su konstruirani tahometri.
- Prema tipu konverzije ulaznog signala u izlazni razlikuju se:
  - mehanički,
  - magnetni,
  - elektromehanički i
  - stroboskopski.

# Podjela mehaničkih tahometara

- Mehanički tahometri mogu biti:
- centrifugalni,
- frikcionni,
- vibracionni,
- hidraulički i
- pneumatski.
- **Mjerenja se mogu vršiti:**
- kontaktnim,
- bezkontaktnim tj. optičkim metodama
- kontaktnim metodama na traci.

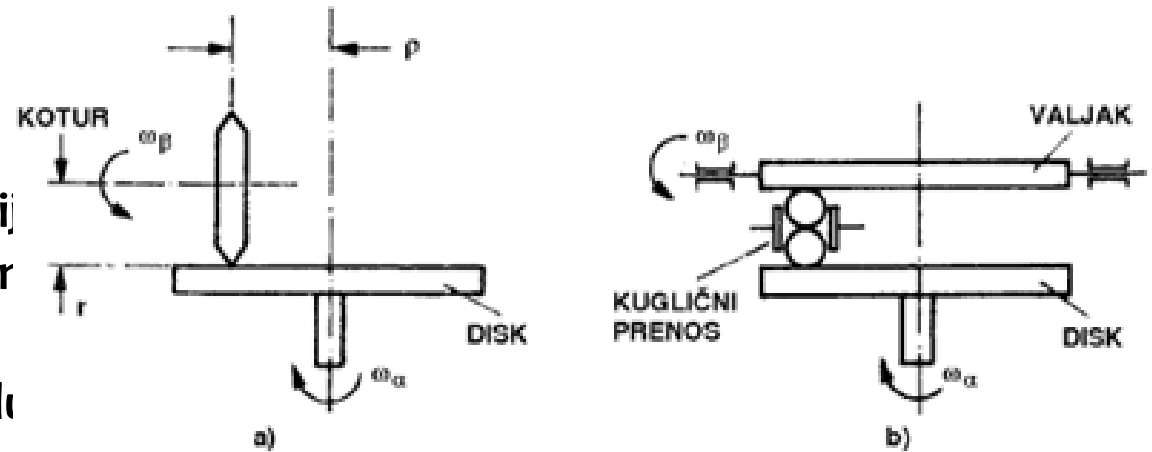
# Načini mjerenja ugaone brzine



Slika 6.1. Mjerenje ugaone brzine:  
a) optičko, b) kontaktno, c) kontaktno na traci

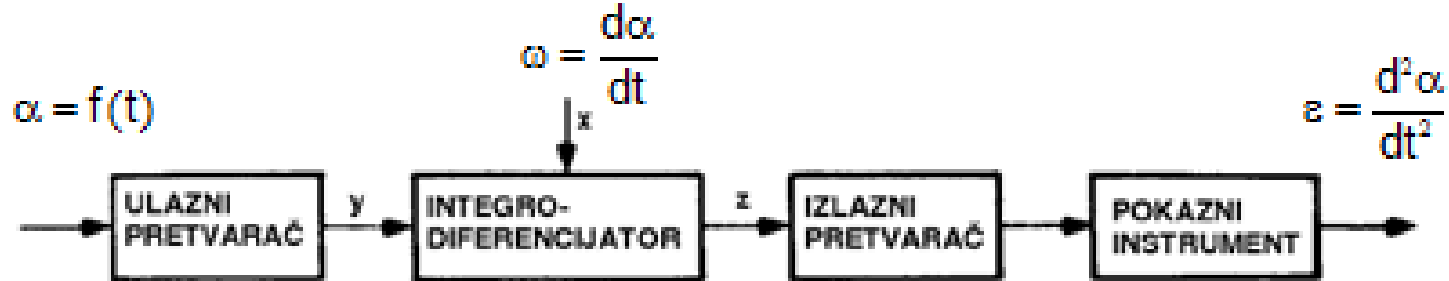
# Principi rada senzora brzine

Osnovni element senzora brzine je diferencijator, koji omogućava automatsku konverziju mjerene ulazne veličin i izlaznog signala proporcionalan izvodi te veličine. Najčešće se koriste mehanički tahometri. Na slici 6.3 prikazana je šema mehaničkog tahometra sa kuglama.



Slika 6.3. Frikcioni integrodiferencijator:  
a) sa koturom i diskom, b) sa kugličnim prenosom





Slika 6.2. Principijelna šema senzora za brzinu i ubrzanje

Integratori i diferencijatori se razlikuju

- po fizikalnom principu rada mehanički, elektromehanički, električni, elektronski, optički i dr.
- po tipu procesa koji služi za integriranje i diferenciranje (stacionarni, nestacionarni),
- po tipu operacija (integrator, diferencijator) i
- po strukturi (direktni, inverzni).

$$\omega_a \rho = \omega_b r$$

$$\frac{d\alpha}{dt} \rho = \frac{d\beta}{dt} r$$

gdje su:

$\omega_a, \omega_b$  su ugaone brzine diska i kotura,

$\alpha$  i  $\beta$  ugaoni pomjeraji njihovih osa,

te  $\rho$  i  $r$  pozicija i radijus kotura

# Senzori ugaone brzine , centrifugalni senzor

- Centrifugalna sila i njena komponenta duž ose:

$$F = m\rho\omega^2 \quad \text{i} \quad F_{ax} = F / 2\text{tg}\alpha$$

- Geometrijske relacije:

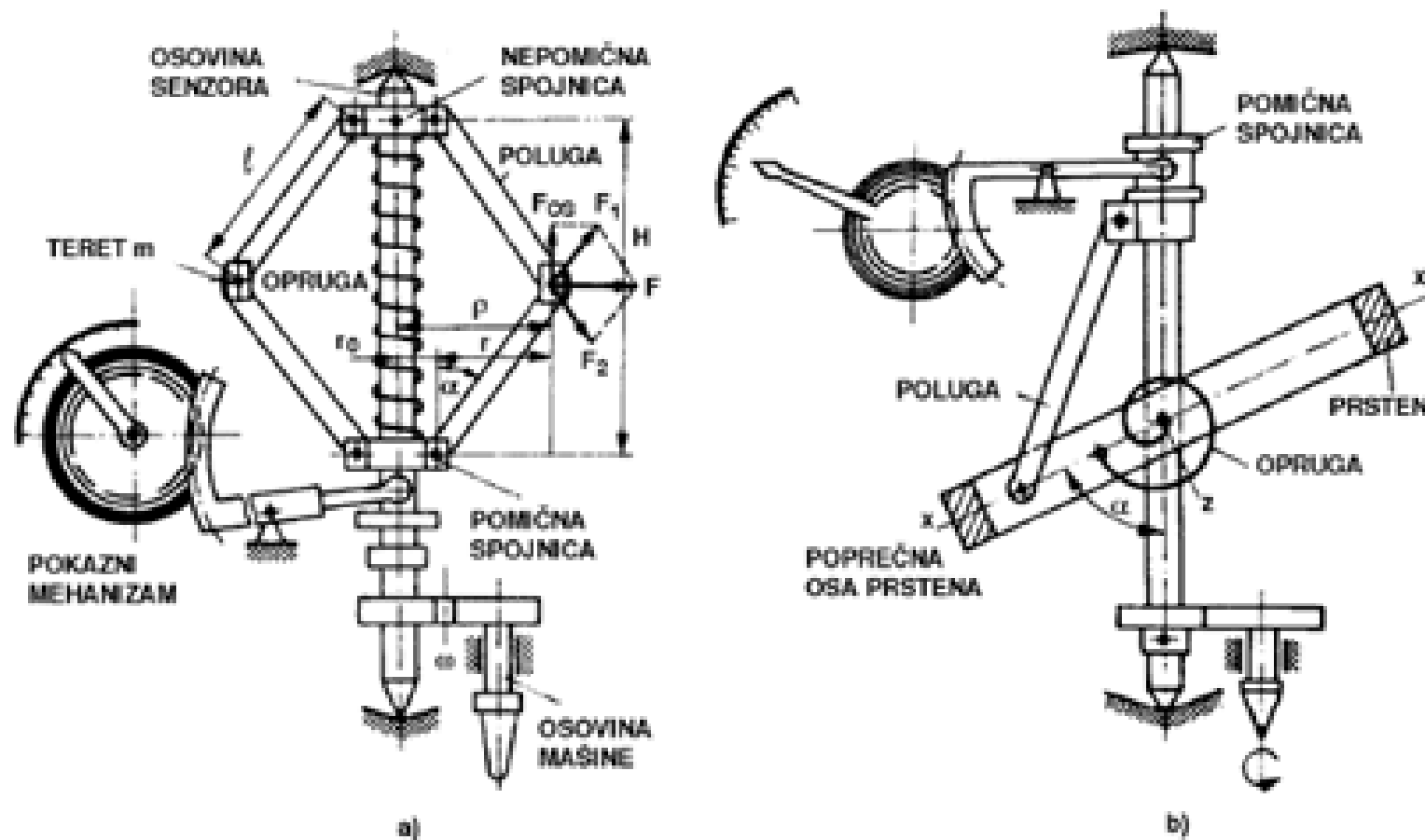
$$\rho = r + r_0 \quad \text{i} \quad r = l \sin\alpha, \quad F_{ax} = \frac{m(r_0 + l \sin\alpha)}{2\text{tg}\alpha} \omega^2.$$

- Centrifugalni senzor sa prstenom

$$\omega = \frac{2(\alpha - \alpha_0)M_0}{(I_x - I_z) \sin 2\alpha},$$

- Centrifugalni senzor sa kuglama:

$$\omega = A \cdot \sqrt{\frac{z_1 + z_0}{(2l - z_0) \left( 1 + \frac{2r_0}{(4lz_0 - z_0^2)^{1/2}} \right)}}$$



Slika 6.4. Centrifugalni senzor: a) sa kugloma, b) sa prstenom

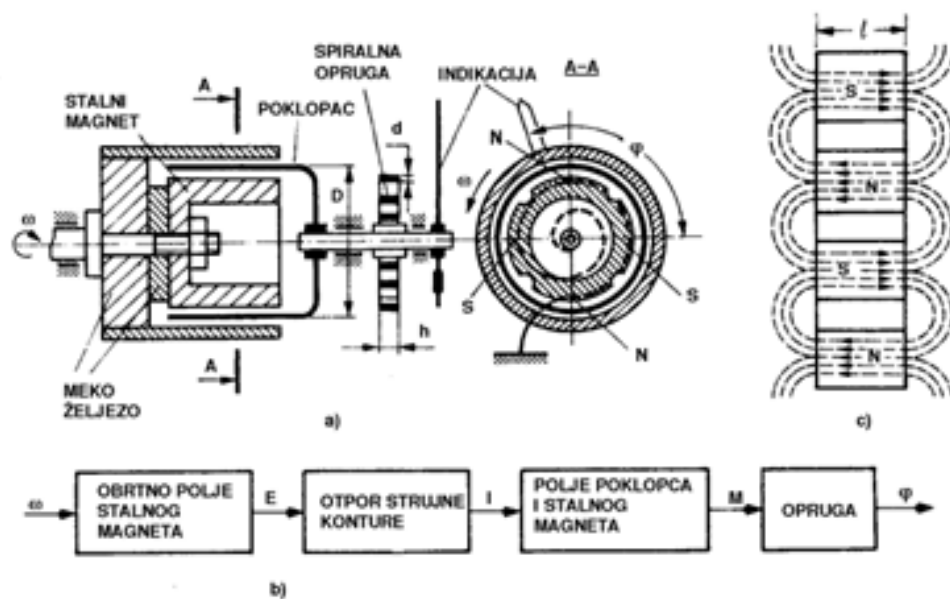
## 6.3.2. Magnetni senzor

- Jednačina ravnoteže momenata:

$$BH \frac{D}{2} 2p = \frac{Ebh^3}{12L} \alpha$$

- Struja u poklopcu i elektromaotorna sila E:

$$\alpha = \frac{12(BID)^2 \Delta \Omega pL}{k_s \rho EBh^3} \omega = k\omega$$



Slika 6.5. Magnetni senzor: a) funkcionalna šema, b) lanac konverzija, c) magnetno polje vrtložnih struja

# Tahogeneratori

- Indukovana elektromotorna sila  $E$  proporcionalna je fluksu pobude i brzini obrtanja  $\omega$ :

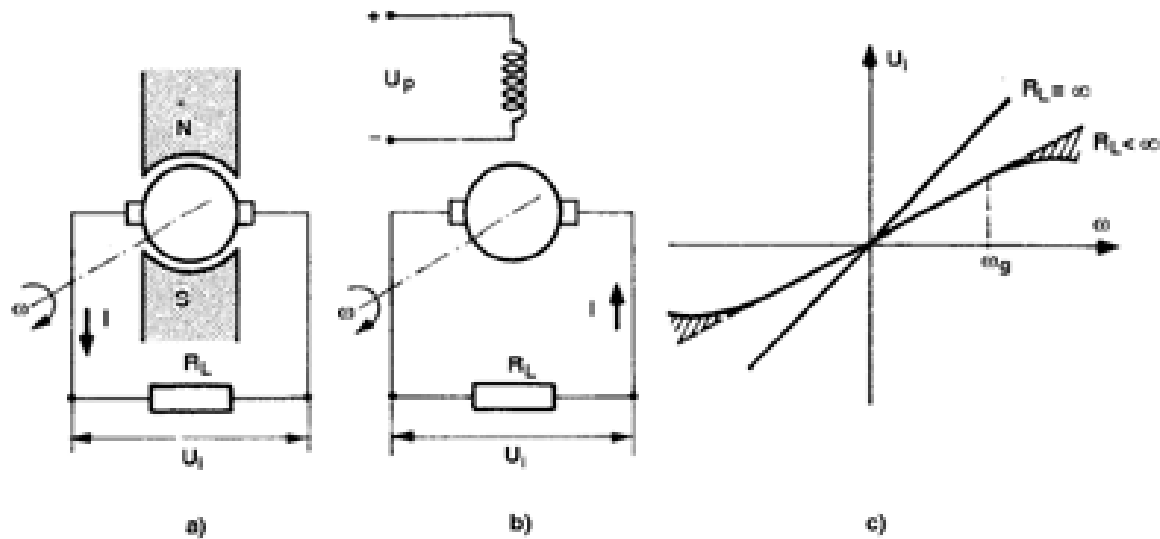
$$E = c\Phi\omega$$

- Struja u rotoru kola:

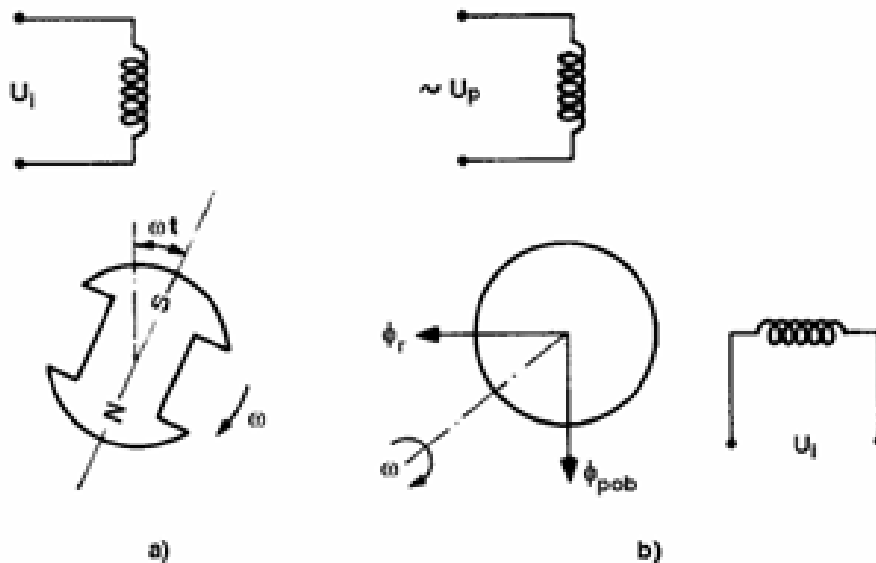
$$I = \frac{E}{R_r + R_l} = \frac{c\phi\omega}{R_r + R_l} \quad |$$

- Izlazni napon tahogeneratora proporcionalan je brzini vrtnje,

$$U_i = \frac{c\phi\omega}{R_r + R_l} R_l = k\omega$$



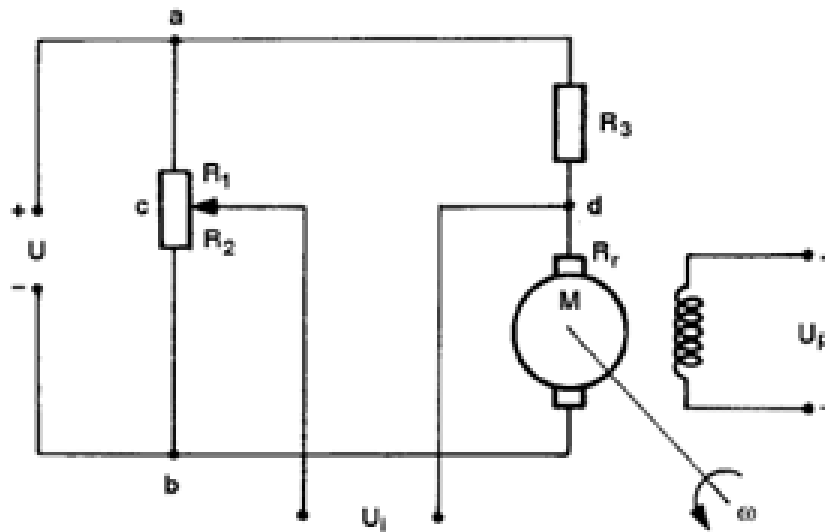
Slika 6.6. Istosmjerni tahogenerator:  
 a) pobudno kolo sa stalnim magnetom, b) nezavisno pobudno kolo,  
 c) uticaj opterećenja na statičku karakteristiku



Slika 6.7. Naizmjenični tahogenerator:  
 a) sinhroni tahogenerator, b) asihroni

# Naizmjenični tahogeneratori

- Naizmjenični tahogeneratori prave se kao sinhroni ili asihroni tahogeneratori.
- Djelovanjem fluksa  $\phi_T$ , u izlaznom namotaju nastaje naizmjenična elektromotorna sila iste frekvencije kao i pobudni napon i sa amplitudom koja je proporcionalna brzini vrtnje rotora, tj.
- Izlazni signal je u fazi sa pobudnim signalom, a za suprotni smjer vrtnje faza se pomjeri za  $\pi$ .



Slika 6.8. Tahometarski most

Ako u izlaznom kolu ne teče struja ( $R_{opt} = \infty$ ), tada su izlazni napon i struja rotora:

$$U_i = U_{ac} - U_{ad} = UR_1 / (R_1 + R_2) - I_r R_3$$

$$I_r = (U - k\omega) / (R_r + R_3)$$

Eliminacijom promjenljive  $I_r$ , dolazi se do rješenja

$$U_i = U \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_r + R_3} \right) + \frac{kR_3}{R_r + R_3} \omega.$$

Ravnoteža se postiže pomjeranjem klizača potencijometra dok motor miruje ( $\omega = 0$ ).  $R_1 R_r = R_2 R_3$  – ravnoteža mosta

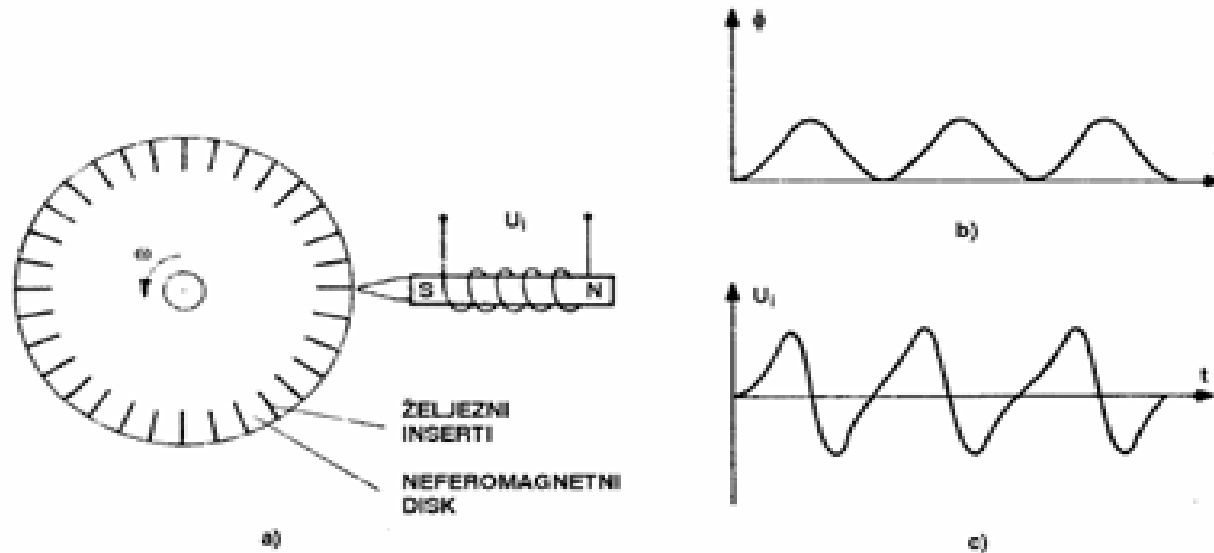
Izlazni napon direktno je proporcionalan ugaonoj brzini:

$$U_i = kR_3 \omega / (R_r + R_3) = k_{TM} \omega,$$



# Elektromagnetni senzori

Rade na principu promjene otpornosti magnetnog kola usljed prolaska željeznih zubaca diska koji je montiran na rotirajuću osovinu.



Slika 6.9. Elektromagnetni senzor ugaone brzine indukcionog tipa:  
a) principijelna šema, b) vremenska promjena magnetnog fluksa,  
c) promjena izlaznog napona sa brzinom vrtnje

$\phi = M/R_m$  – elektromagnetni fluks

$E = - d\phi/dt$  – elektromotorna sila

Povećanje broja inserata (zubaca)  $N$  povoljno utiče na tačnost mjerenja pomoću frekvencometra.

$$f = N f_0.$$

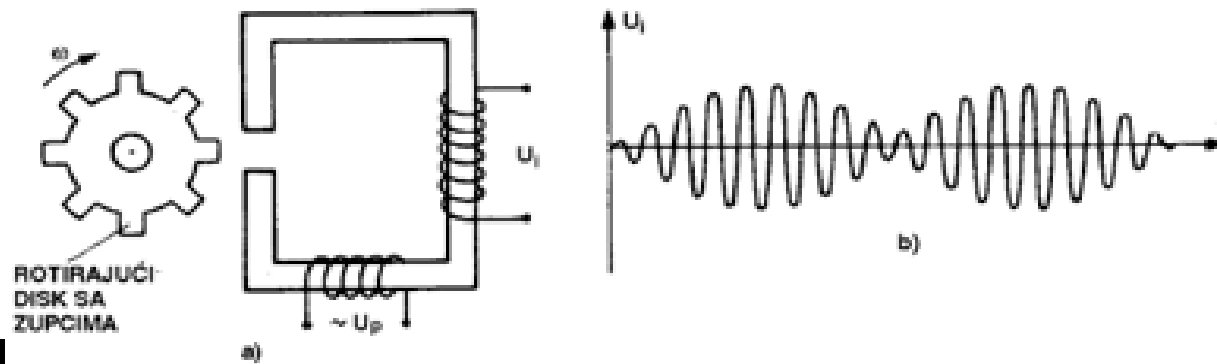
Srednja vrijednost ugaone brzine je:

$$\omega_{sr} = 2 \pi N/T$$

# Elektromagnetni senzor transformatorskog tipa

Dovodi se naizmjenični napon napajanja visoke frekvencije, a na sekundaru se dobija izlazni napon. Za tačno očitavanje potrebno je zadovoljiti uslov  $f_p \gg N f_o$ .

Kod digitalnih očitavanja izlaza prvo se mora izvršiti demodulacija, zatim transformacija u slijed impulsa, i na kraju njihovo brojanje.

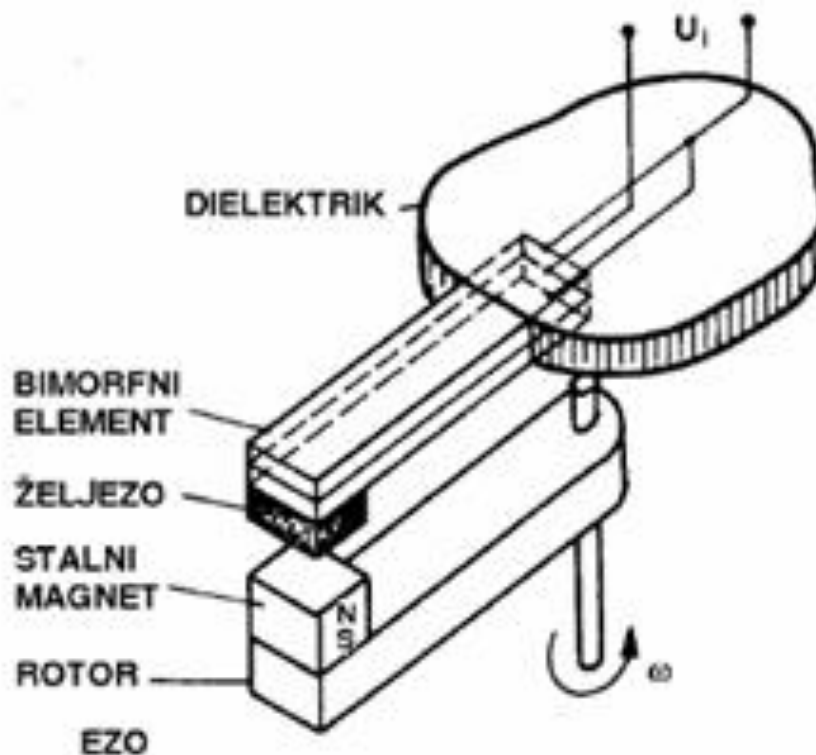


Slika 6.10. Elektromagnetni senzor transformatorskog tipa:  
a) principijelna izvedba, b) oblik izlaznog napona

# Piezoelektrični senzori

- Osnova za gradnju piezoelektričnog tahometra je bimorfni piezoelement u obliku trake.
- Zbog direktnog piezoelektričnog efekta nastaju impulsi naponskog signala na izlazu. Frekvencija ovih impulsa proporcionalna je brzini obrtanja.
- Zbog malih dimenzija piezoelektrični tahometar pogodan je za gradnju u minijaturnim servosistemima, u robotici itd.
- Tipična tačnost je  $\pm 0,5 - 1,5\%$ .

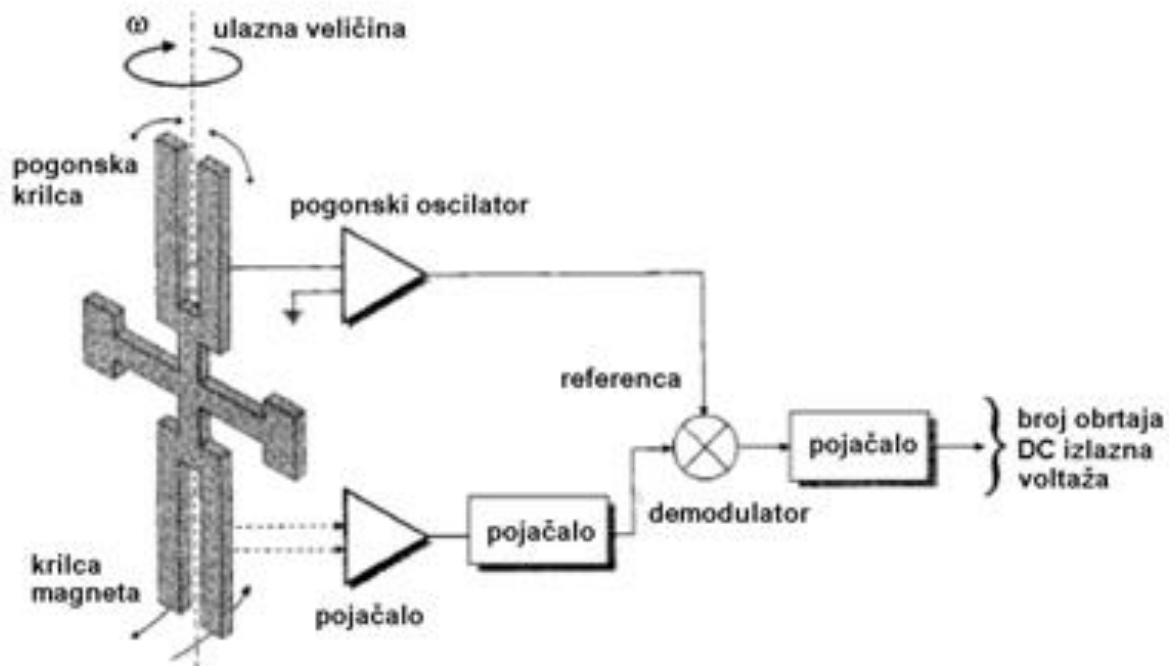
# Piezoelektrični tahometar



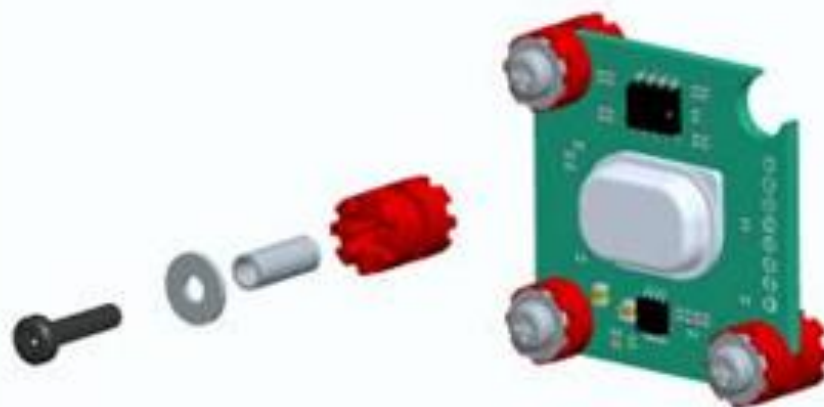
Slika 6.11. Piezoelektrični tahometar

# Žiroskopski senzori ugaone brzine

- Brojni žiroskopski senzori ugaone brzine su razvijeni tako da koriste minijaturne kvarcne elemente.
- Kvarcni element vibrira sa njegovom prirodnom frekvencijom.
- Obrtno kretanje uzrokuje sekundarne vibracije, koje su kada se demodulišu proporcionalne ugaonim vibracijama.
- Zbog različitih dimenzija u kojima se izrađuju žiroskopski senzori se koriste u automobilskoj i avionskoj industriji kao i u vojne svrhe.



Slika 6.12. Žiroskopski senzor



Slika 6.13. Izgled žiroskopskog senzora ugaone brzine sa pratećom

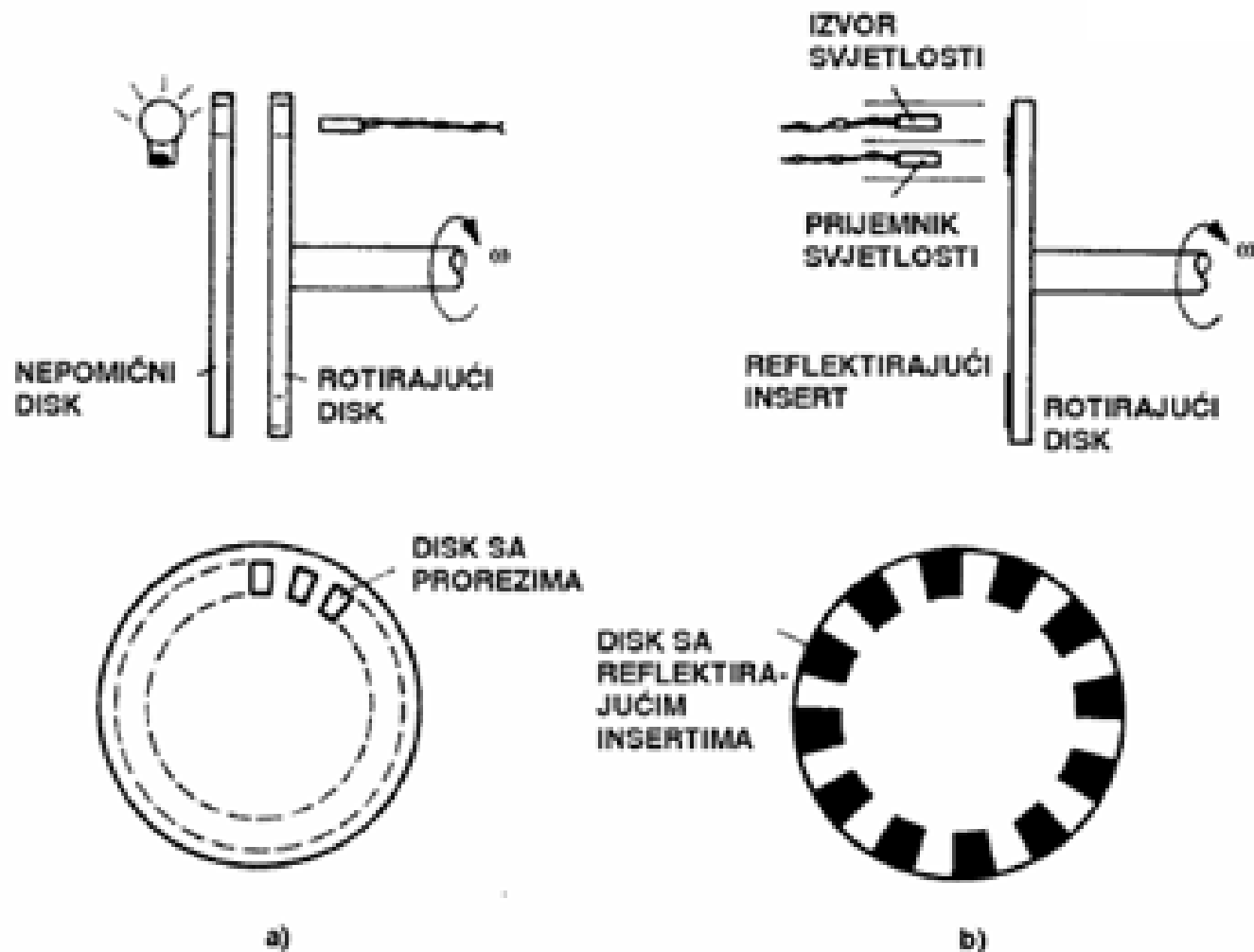


Slika 6.14. Stabilnost leta kod Apache Longbow helikoptera

# Optoelektronički senzor

- Spada u grupu senzora sa impulsnim izlaznim signalom čija je frekvencija jednaka višestrukoj frekvenciji obrtanja osovine.
- Svjetlosni predajnik je u većini slučajeva LED (Light Emiting Diode), a prijemnik fotoćelija.
- Mjerni opseg je 0 – 100000 o/min.





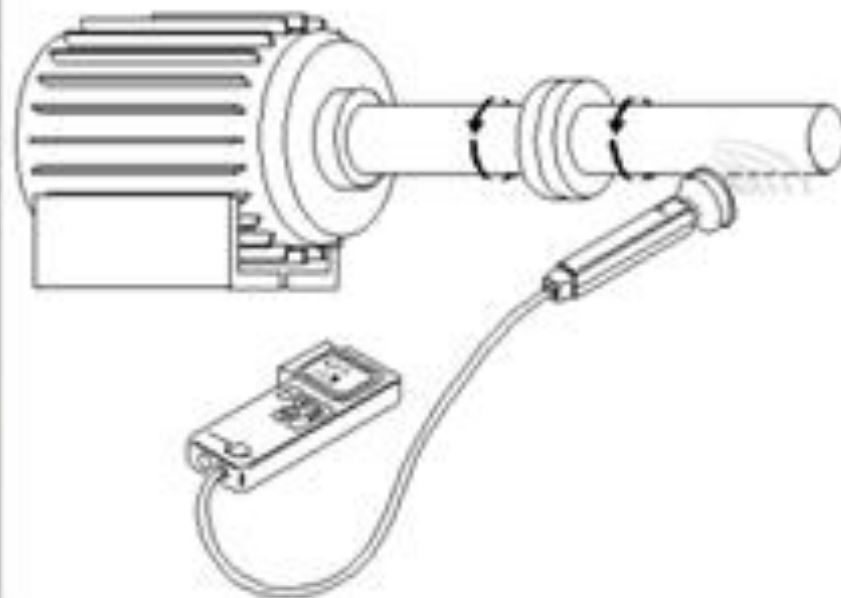
Slika 6.15. Optoelektronski tahometar: a) izvor i prijemnik svjetlosti su na suprotnim stranama diska, b) izvor i prijemnik svjetlosti na istoj strani diska.

# Stroboskopski senzor

- Radi na principu stroboskopskog efekta - prividno zaustavljanje osovine kada se ona osvjetljava impulsima svjetlosti čija je frekvencija jednaka frekvenciji obrtanja osovine.
- Isti efekat se primjećuje i kad je frekvencija  $f = i f_s$
- Rotirajuće tijelo se obilježi uočljivim znakom i osvjetli bljeskajućim svjetlom, te kontinuiranim podešavanjem frekvencije podese najveća moguća frekvencija za koju se uočava sinhronizam.



a)



b)

Slika 6.16. Stroboskopski mjerni uređaj testo 745:  
a) mjerenje na ploči, b) mjerenje na vratilu

# Stroboskopska lampa-bljeskalica

$$f = \frac{f_{\max} \cdot f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}}, |$$

Ako bljeskalica ima konstantnu frekvenciju  $f$ , tada se na čelo vratila čija se ugaona brzina mjeri učvrsti bijela ploča sa crnim segmentima. Broj segmenata iznosi  $q=1,2,3,\dots$  i oni su poredani u koncentrične krugove.

$$n = \frac{f}{q} \pm \frac{z}{q}$$

$z$  – broj segmenata koji je prošao kroz jednu tačku u jedinici vremena

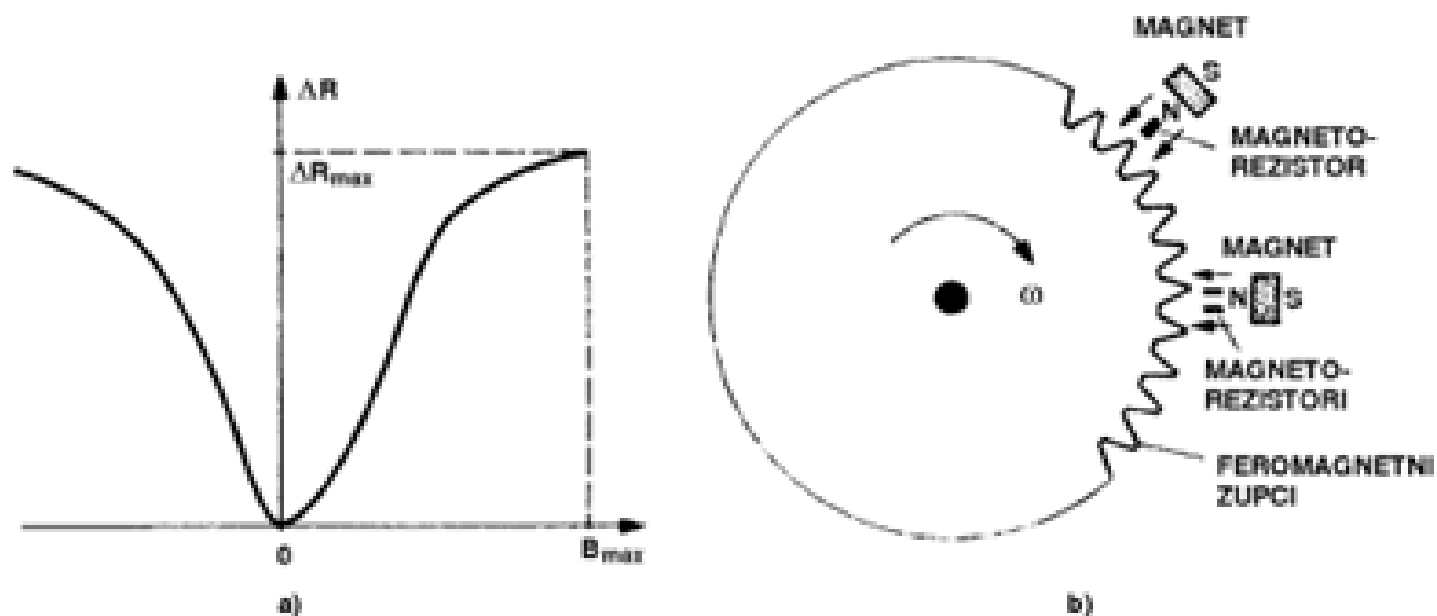
Pri niskim frekvencijama do ( $f < 10\text{Hz}$ ) dolazi do trperenja slike. Mjerni opseg 25000 bljeskova u minuti, a tačnost  $\pm 1\%$ .

Mjerno područje za stroboskopsko mjerenje: 100 – 20000 rpm. Mjerno područje za mehaničko mjerenje: 20 – 20000 rpm. Mogućnost mjerenja

# Magnetorezistivni senzor

- Magnetorezistivni senzor mijenja svoj otpor  $R$  u zavisnosti od magnetnog polja.
- Nailaskom zubaca od feromagnetnog materijala mijenja se magnetno polje u kojem se nalazi senzor, tako da se na izlazu dobija odgovarajući naponski impuls.
- Šema sa dva magnetorezistora omogućava i detekciju smjera vrtnje.

# Magnetorezistivni senzor

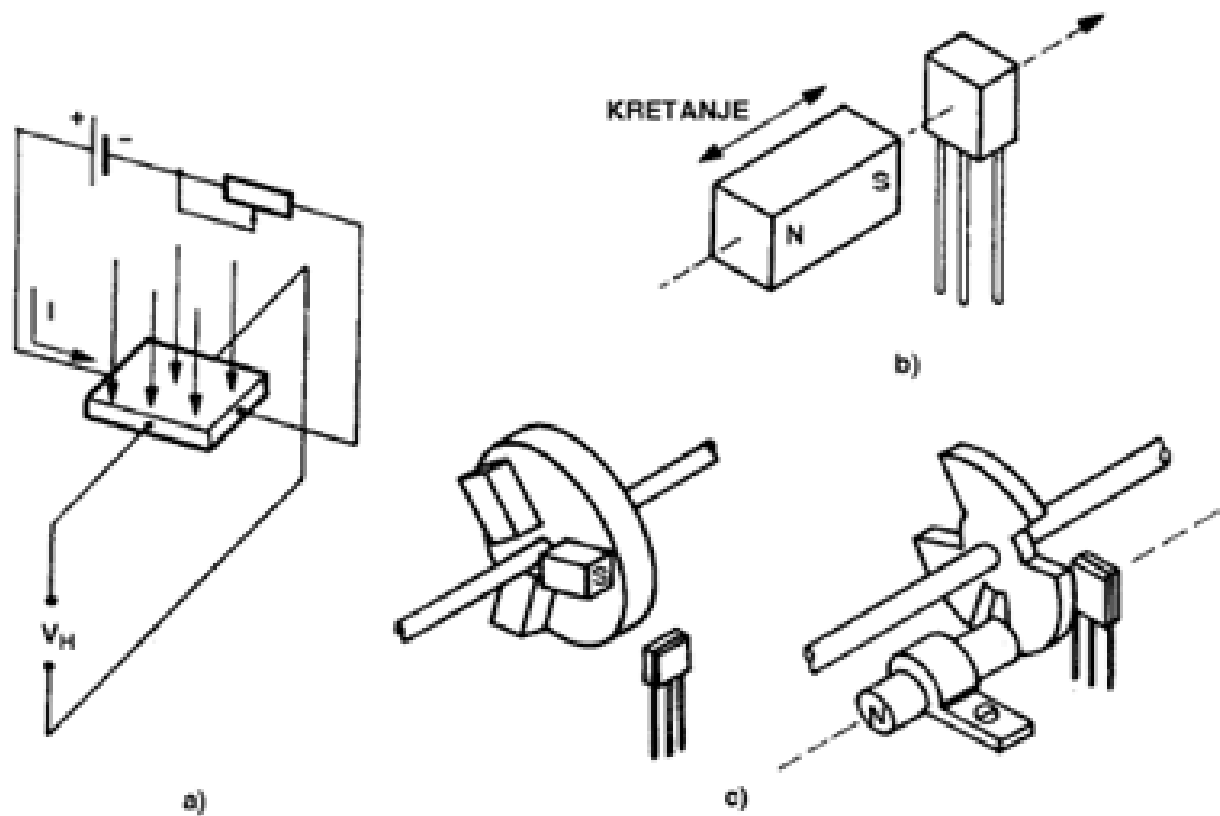


Slika 6.17. Magnetorezistivni senzor: a) tipična karakteristika, b) praktična izvedba za detekciju ugaone pozicije (brzine)

# Senzori na bazi Holovog efekta

- Holov efekat nastaje kada se poluprovodnik kroz koji teče struja unese u magnetno polje.
- Ako se poluprovodnička pločica nalazi u fiksiranom položaju okomito na magnetno polje indukcije  $B$  i ako kroz pločicu protiče struja  $I$ , tada se u smjeru poprečno na tok struje javlja tzv. Holov napon
-

# Senzori na bazi Holovog efekta



Slika 6.18. Senzor na bazi Holovog efekta: a) Holov efekt, b) modifikovani senzor sa digitalnim izlazom - Holov prekidač, c) detekcija ugaone brzine pomoću Holovog prekidača