

MERENJA U EMP

Senzori i merno-prilagodna kola u
elektromotornim pogonima

MERENJA U EMP

Značaj:

- Monitoring i dijagnostika
- Regulacija i zaštita
- Estimacija i napredno upravljanje

Šta se meri u EMP:

- Struja
- Napon
- Brzina/Pozicija
- Temperatura
- Mehanički momenat i sila



Najznačajniji parametri mernih uređaja:

- Tačnost
- Cena
- Merni opseg
- Galvanska izolacija
- Linearnost
- Stabilnost
- Otpornost na tranzijente
- Propusni opseg
- Ugradna kompatibilnost
- ...

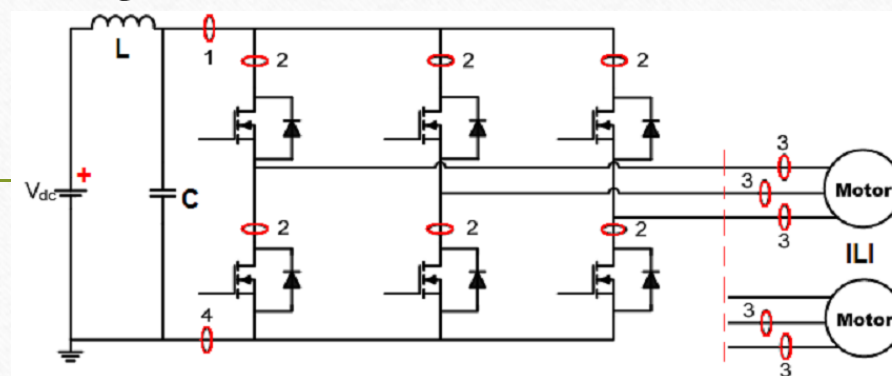
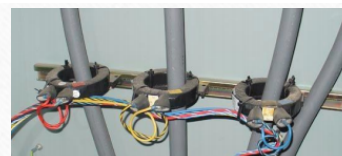
MERENJE STRUJE U EMP

Značaj:

- Prekostrujna zaštita pretvarača i mašine
- Monitoring i dijagnostika
- Regulacija i strujno napajanje

Senzori (otporni i elektromagnetni):

- Strujno-merni transformatori
- Senzori na bazi HALL-ovog efekta
- Merni šantovi
- Rogovski kalem



STRUJNO MERNI TRANSFORMATORI

- Merna metoda zasnovana na elektromagnetnim principima
- Merenje „visokih“ struja u EMP
- Skaliranje struje primara putem prenosnog odnosa SMT-a
- Galvanska izolacija – bezbednosni efekat

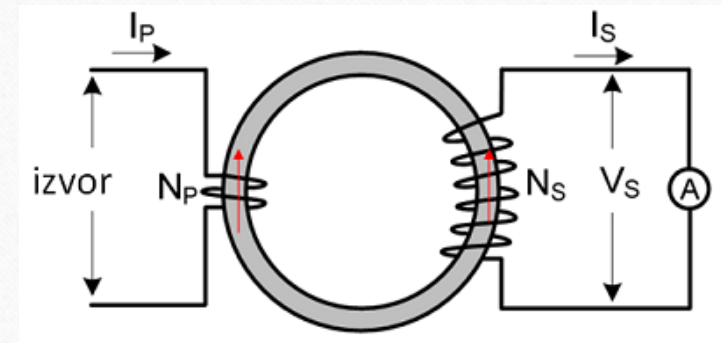


Primar – jedan ili nekoliko namotaja velikog preseka; vezivanje redno u energetski krug, standardizovane struje 5A, 10A, 15A, ..., 75A

Sekundar – veći broj namotaja malog preseka, potrošač u sekundaru malog otpora, rad u „*kratkom spoju*“, standardizovane struje 5A i 1A

Torusno kolo – magnetna sprega namotaja

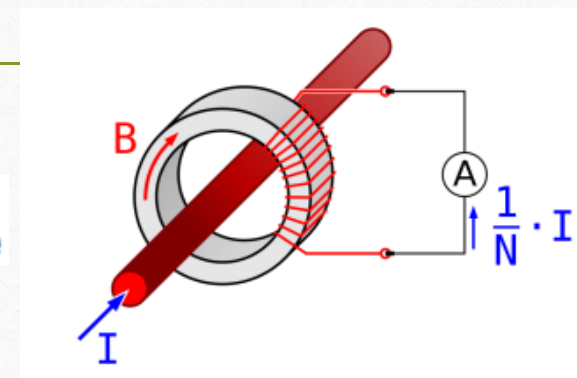
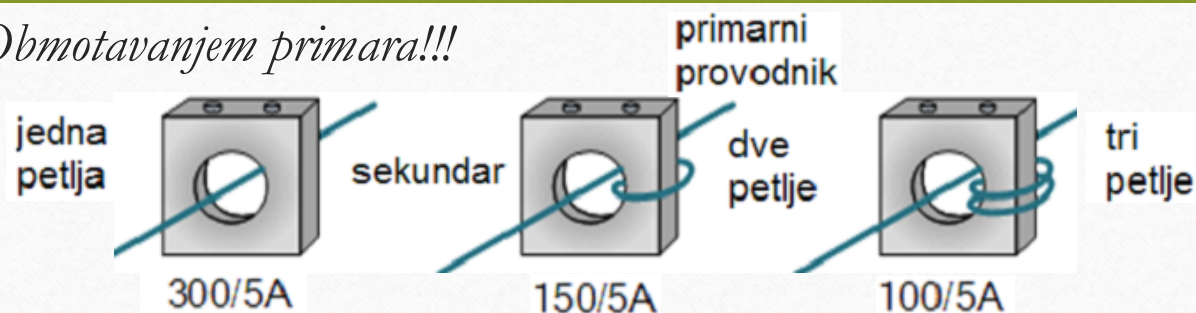
Klase tačnosti: 0.2; 0.5; 1; 3 i 10



$$\frac{V_P}{V_S} = \frac{I_S}{I_P} = \frac{N_P}{N_S}$$

STRUJNO MERNI TRANSFORMATORI

- Mogućnost promene prenosnog odnosa –
- *Obmotavanjem primara!!!*



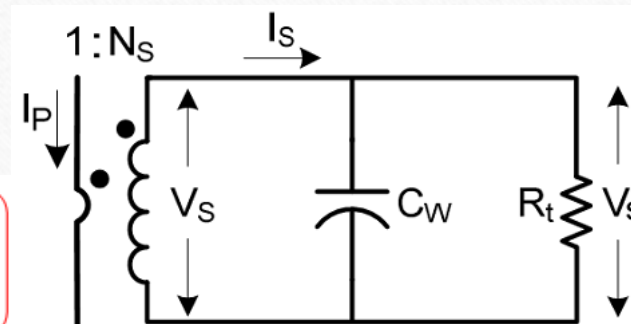
Primar – jedan namotaj $N_p=1$

Sekundar – N_s navojaka – C_w parazitna kapacitivnost sekundara (N_s je veliko pa nije zanemariva)

Izlazno kolo – otpornost za detekciju struje i opterećenje SMT – sekundar strujnog trafoa ne sme biti u praznom hodu

$$\frac{I_s}{I_p} = \frac{1}{N_s}$$

$$V_{sense} = I_s R_t = \frac{I_p}{N_s} R_t$$



STRUJNO MERNI TRANSFORMATORI

• Tačnost SMT-a

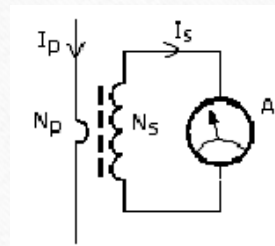
- Strujna greška $p_i[\%] = \frac{K_n I_2 - I_1}{I_1} 100$
- Ugaona greška – razlika faznih stavova struja primara i sekundara
- Klasa tačnosti – dozvoljena strujna greška pri I_n

• Snaga SMT-a

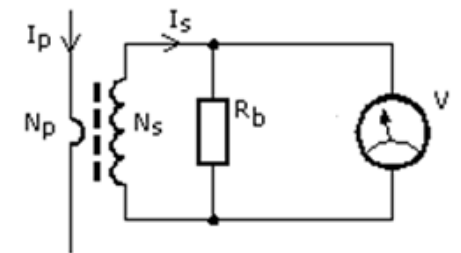
- Rad pri niskim B – veća tačnost
- Povećanje snage? – povećanje preseka jezgra a
- Veća snaga – veće jezgro – teži i veći SMT
- Tipične snage SMT – 5 [VA], 10 [VA], 15 [VA]

• Načini spajanja sekundara SMT-a

- Sekundar zatvoren Ampermetrom male impedanse
- Sekundar zatvoren sa „blinder“ otpornikom



$E = 4,44 \cdot N \cdot f \cdot a \cdot B$
 N - broj namotaja sekundara
 f - učestanost
 a – presek magnetnog jezgra
 B - magnetna indukcija



Snaga koja se ima na sekundaru :

$$S = 4.44 \cdot N \cdot f \cdot a \cdot B \cdot I_2$$

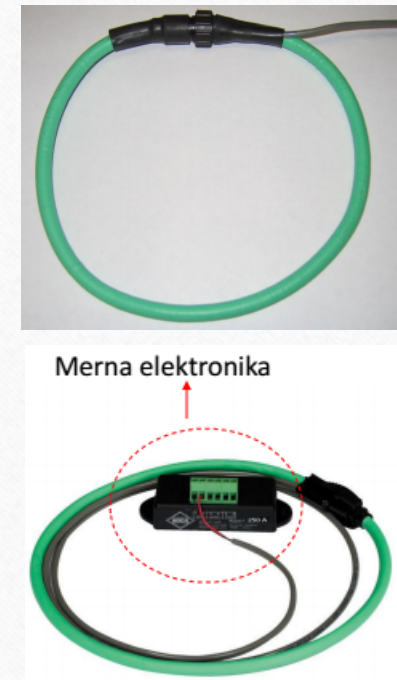
I_2 -struja sekundara

KALEM ROGOWSKOG

- Tehnika bazirana na vazdušnom strujnom transformatoru
- Fleksibilna konstrukcija koja omogućuje imunost na smetnje
- Meri se izvod promene struje koji se integri u vremenu
- Primena samo za merenje naizmeničnih struja

Konstrukcija:

- Obuhvatni kalem
- Planarni kalemi



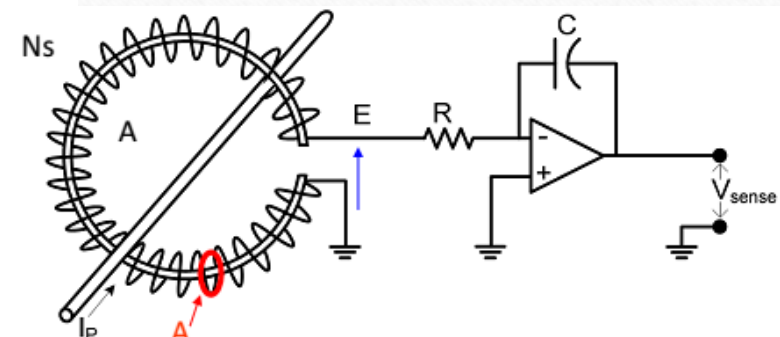
KALEM ROGOWSKO

- Induktivnost vazdušnog kalema: $M = \frac{\mu_0 AN_S}{l}$

- Indukovana EMS u namotaju sekundara:
 $E = M \frac{dI_P}{dt}$ Srazmerna izvodu struje u vremenu

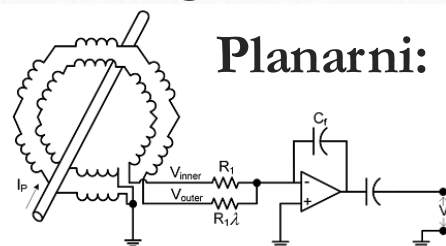
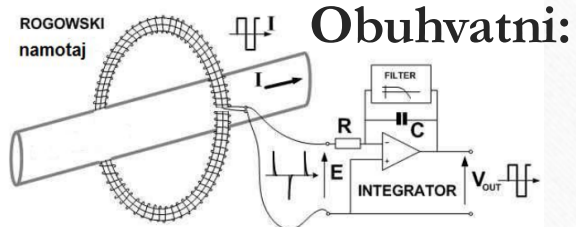
- Integracijom EMS se dobija napon proporcionalan struji primarnog voda

Električna šema:



$$V_{sense} = \frac{1}{RC} \int E dt = \frac{1}{RC} \frac{\mu_0 AN_S}{l} I_P$$

Nakon integracije, napon je srazmeran struji primarnog voda!!!



MERNI ŠANT

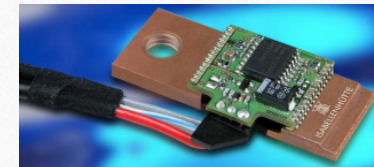
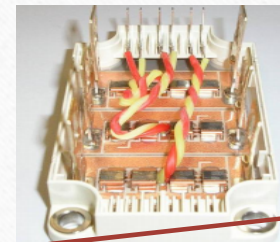
- Otporni senzor (tehnika zasnovana na detekciji pada napona na etalon otporu)
- Jednostavnost i niska cena

Nedostaci:

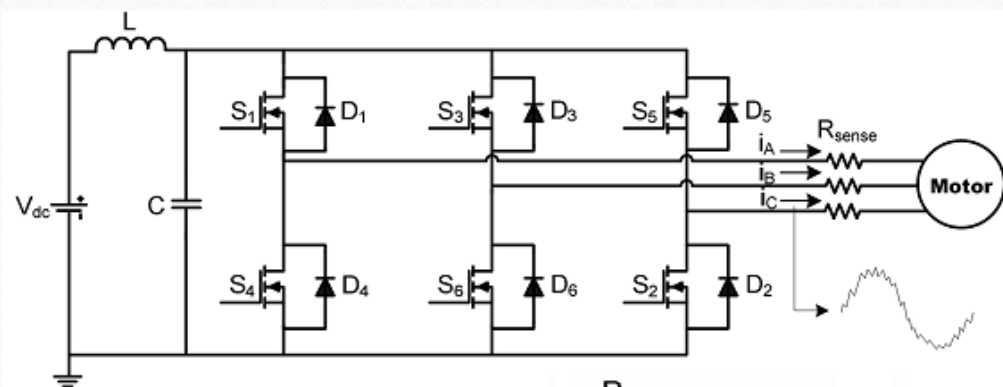
- Temperaturna promenljivost pri visokim strujama!
- Disipacija i gubici na senzoru! $P_{\gamma} = R \cdot I^2$
- Ne pruža galvansku izolaciju!

Primena:

- Unutar poluprovodničkih modula (frekventni pretvarači)
- Kao zasebni merni pretvarači
- Moduli za ugradnju u energetske pretvarače

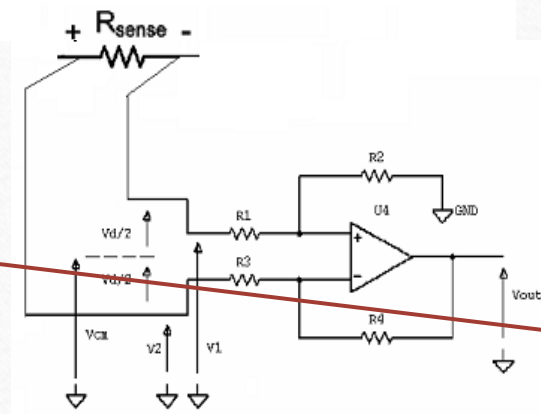


MERNI ŠANT



Rešenje za dv/dt :

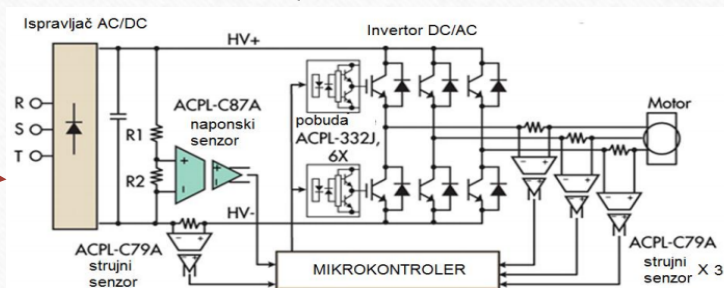
Optoizolacija!!!



Konfiguracija sa otporima

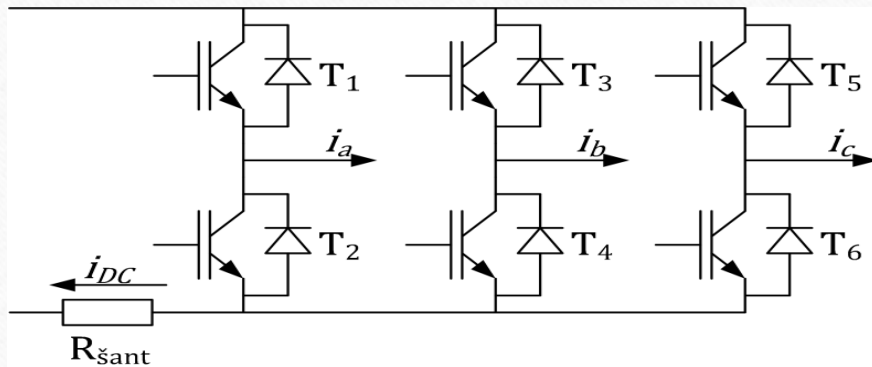
u fazama motora:

- Signal dostupan u PWM periodi
- Povećana disipacija zbog visokih struja!
- Common mode signali! Strme ivice usled dv/dt efekta!

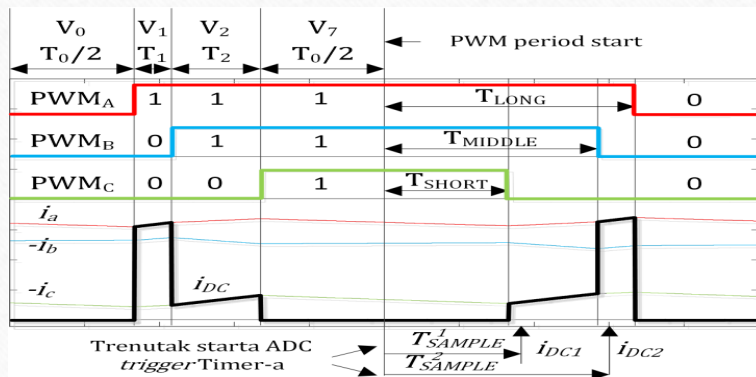


ACPL-C79A strujni senzor sa optoizolacijom koji koristi otporni šant u svakoj od faza motora

MERNI ŠANT



Primer za prekidačku šemu u I sektoru SVPWM



Merna metoda sa jednim otporom u DC međukolu pretvarača

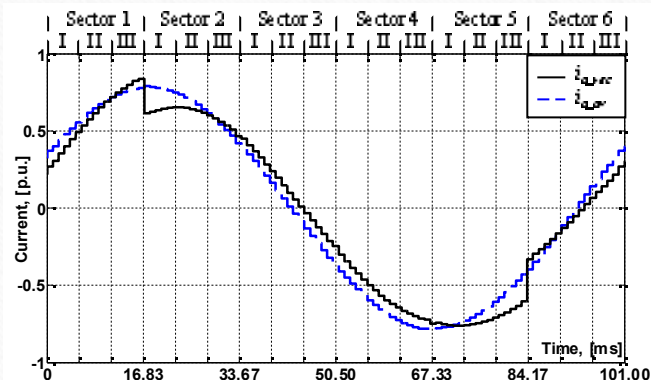
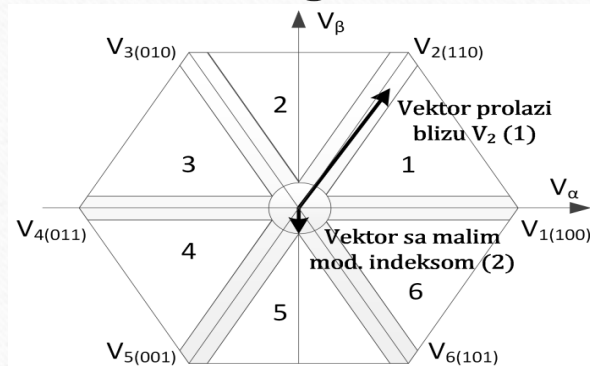
- Signal dostupan samo u slučaju postojanja aktivnih vektora SVPWM!
- Neophodnost postojanja algoritma za rekonstrukciju faznih struja!
- Smanjena disipacija energije šant-a!
- Problem *Common mode* signala manje izražen!

Algoritam za rekonstrukciju!

Sektor	PWM vremena uključenja	V_k	V_{k+1}	i_{DC1}	i_{DC2}	Rekonstruiše se
1	$T_A=LONG, T_B=MIDDLE, T_C=ZERO$	$V_1(100)$	$V_2(110)$	$+i_a$	$-i_c$	$i_b = -i_a - i_c$
2	$T_A=MIDDLE, T_B=LONG, T_C=ZERO$	$V_3(010)$	$V_2(110)$	$+i_b$	$-i_c$	$i_a = -i_b - i_c$
3	$T_A=ZERO, T_B=LONG, T_C=MIDDLE$	$V_3(010)$	$V_4(011)$	$+i_b$	$-i_a$	$i_c = -i_a - i_b$
4	$T_A=ZERO, T_B=MIDDLE, T_C=LONG$	$V_5(001)$	$V_4(011)$	$+i_c$	$-i_a$	$i_b = -i_a - i_c$
5	$T_A=MIDDLE, T_B=ZERO, T_C=LONG$	$V_5(001)$	$V_6(101)$	$+i_c$	$-i_b$	$i_a = -i_b - i_c$
6	$T_A=LONG, T_B=ZERO, T_C=MIDDLE$	$V_1(100)$	$V_6(101)$	$+i_a$	$-i_b$	$i_c = -i_a - i_b$

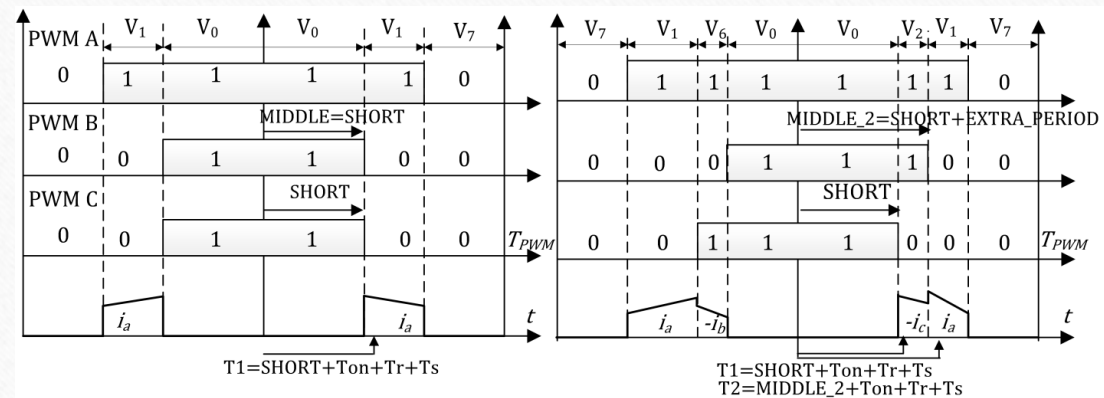
MERNI ŠANT

Oblasti gde je rekonstrukcija struja onemogućena!



Merna metoda sa jednim otporom u DC međukolu pretvarača

Prostorna dispozicija PWM impulsa u svrhe rekonstrukcije



Rekonstruisana struja jedne faze i njena srednja vrednost

STRUJNE TEHNIKE BAZIRANE NA HALL EFEKTU

- Princip uspostavljanja razlike potencijala na krajevima poluprovodničke ploče kada se struja I_C nađe u magnetnom polju indukcije B (pravi ga merena struja)
- Izlazni signal napon srazmeran sa merenom strujom
- Preciznost i veliki propusni opseg!
- Galvansko odvajanje!

Nedostaci:

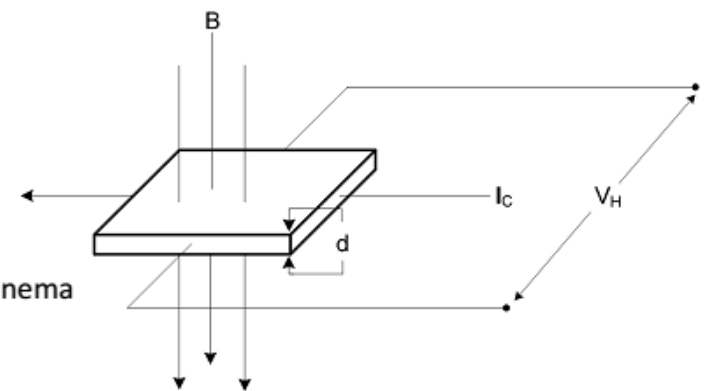
- Problem offset-a
- Potrebno spoljno napajanje
- Promene karakteristika sa temperaturom

Holov napon

$$V_H = \frac{K}{d} B I_C + V_{OH}$$

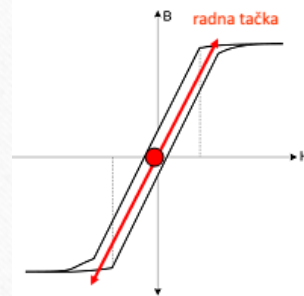
Offset napon koji postoji i kada nema eksternog polja

Holov efekt?

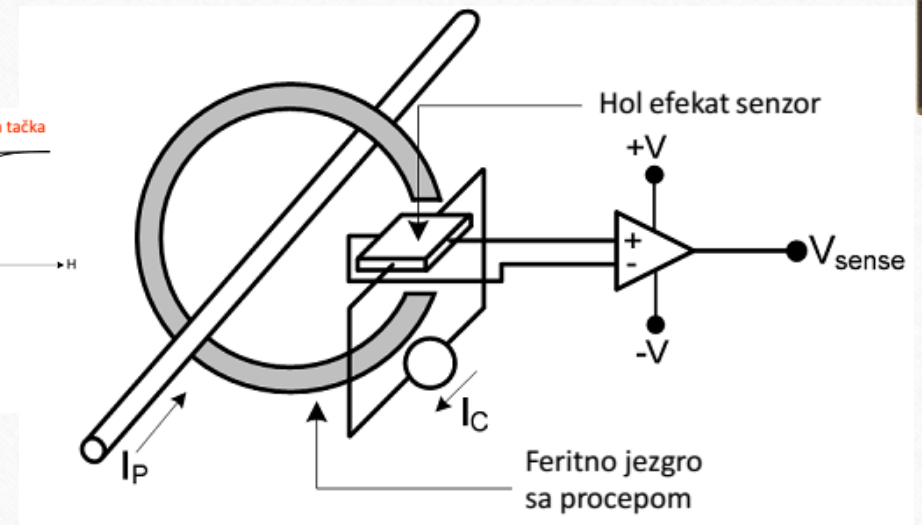


STRUJNE TEHNIKE BAZIRANE NA HALL EFEKTU

- Struja može biti i jednosmerna i naizmenična
- Izlazni signal srazmeran merenoj struji
- Merena struja generiše magnetno polje (B)
- Mala cena
- Jednostavna konstrukcija
- Velika osetljivost na smetnje
- Slab signal se mora pojačati i prilagoditi
- Problem zasićenja magnetnog kola!

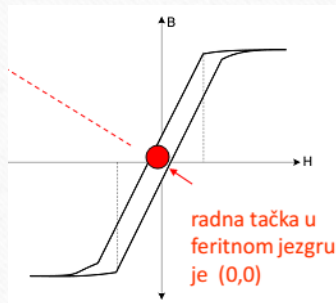


Metoda u otvorenoj sprezi

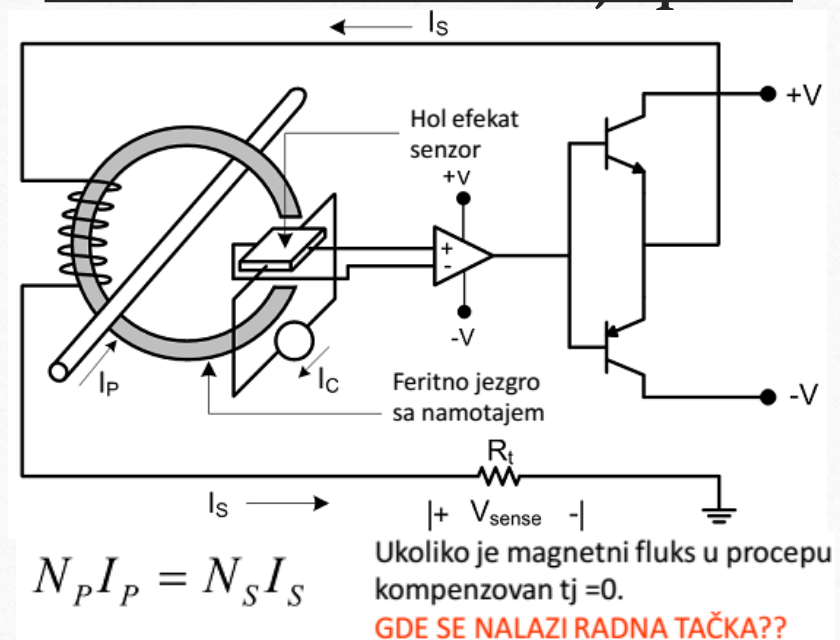


STRUJNE TEHNIKE BAZIRANE NA HALL EFEKTU

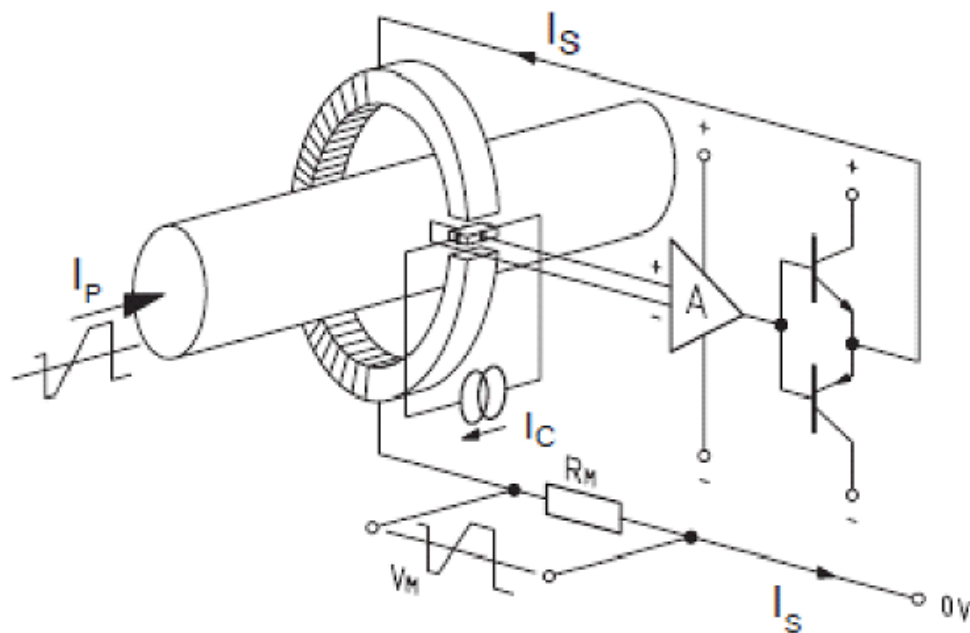
- Struja može biti i jednosmerna i naizmenična
- Izlazni signal srazmeran kompenzacionoj struji koja izjednačava polje primarne struje
- Merena struja generiše magnetno polje (B)
- Veća cena
- Složenija konstrukcija
- Manja osetljivost na smetnje
- Propusni opseg do 200MHz
- Otklonjen problem nelinearnosti usled zasićenja!



Metoda u zatvorenoj sprezi



STRUJNE TEHNIKE BAZIRANE NA HALL EFEKTU



Metoda u zatvorenoj sprezi

- 3D prikaz merenja struje sa strujnim LEM modulom sa povratnom spregom
- Napon V_M je proporcionalan primarnoj struji, a njegov talasni oblik je neizobličen
- Proticanjem kompenzacione struje kroz merni otpornik dobija se željeni napon na izlazu davača!!!

$$N_P I_P = N_S I_S$$

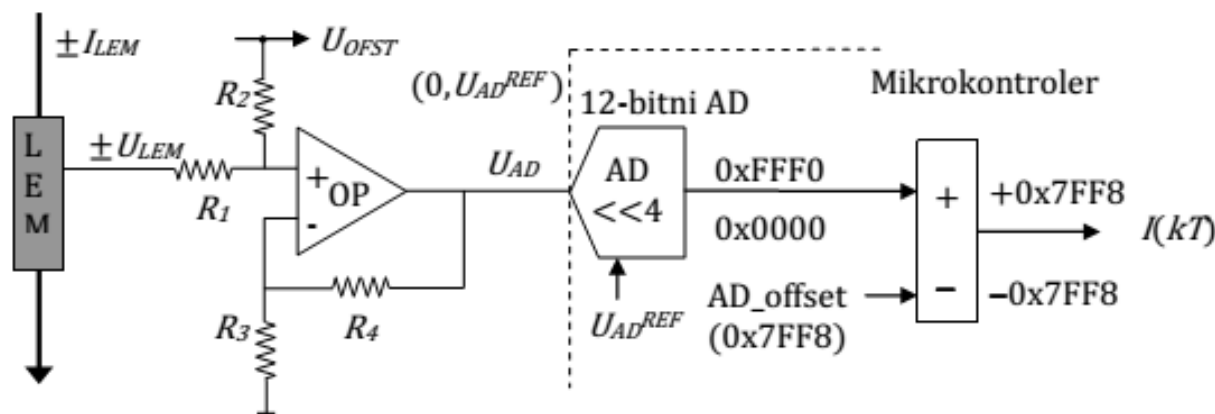
Ukoliko je magnetni fluks u procesu kompenzovan tj $=0$.

GDE SE NALAZI RADNA TAČKA??

STRUJNE TEHNIKE BAZIRANE NA HALL EFEKTU

Procesuiranje signala sa LEM davača

$$I(k) = AD_{broj}^{16b} - 0x7FF8 = \frac{I(t)}{I_{LEM}^{MAX}} 0x7FF8.$$



Opseg signala struje, napona LEM sonde in ulaznog napona AD konvertora

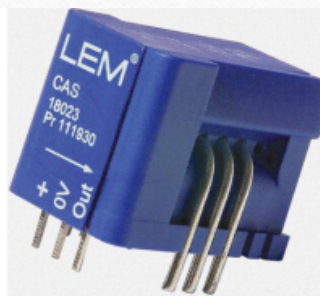
struja [A]	Napon LEM [V]	Napon AD [V]
I_{LEM}^{MAX}	U_{LEM}^{MAX}	U_{AD}^{REF}
0	0	$U_{AD}^{REF} / 2$
$-I_{LEM}^{MAX}$	$-U_{LEM}^{MAX}$	0

Pojačanje na ADC ref i offset:

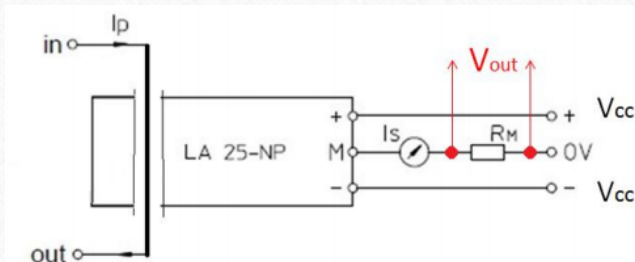
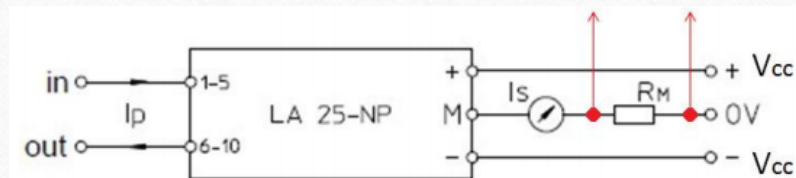
$$U_{AD}(t) = \frac{U_{AD}^{REF}}{2U_{LEM}^{MAX}} \frac{U_{LEM}^{MAX}}{I_{LEM}^{MAX}} I(t) + \frac{U_{AD}^{REF}}{2} = \frac{U_{AD}^{REF}}{2} \frac{I(t)}{I_{LEM}^{MAX}} + \frac{U_{AD}^{REF}}{2}$$

STRUJNE TEHNIKE BAZIRANE NA HALL EFEKTU

Izgled pojedinih LEM modula



Načini vezivanja LEM sonde



MERENJE NAPONA U EMP

Značaj:

- Monitoring i dijagnostika
- Prenaponska zaštita u pogonu
- Estimacija u EMP

Senzori (otporni i elektromagnetni):

- Naponski-merni transformatori
- Razdelnici napona (otporni i kapacitivni)
- Senzori na bazi HALL-ovog efekta
- DC-DC pretvarači



RAZDELNICI NAPONA

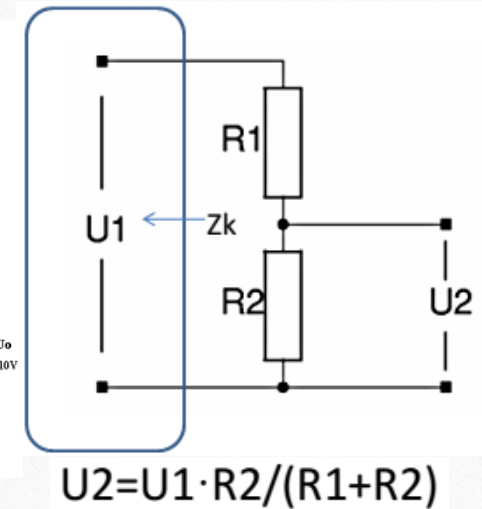
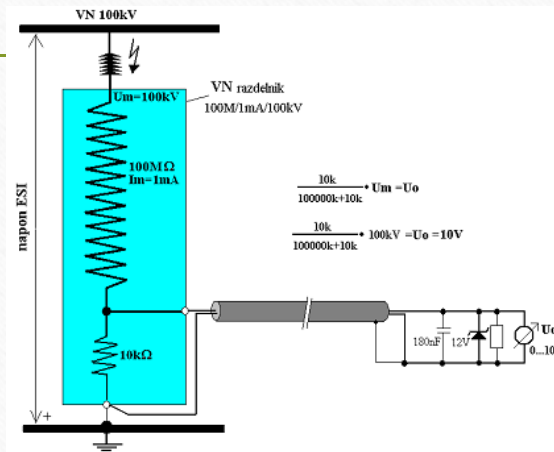
Podela:

- Otpornički razdelnik
- Kapacitivni razdelnik

Praktični aspekti:

- Merenje AC i DC veličina
- Nema galvansko odvajanje
- Malo fazno kašnjenje – otpornički
- Manji gubici – kapacitivni

Primer: otpornički razdelnik



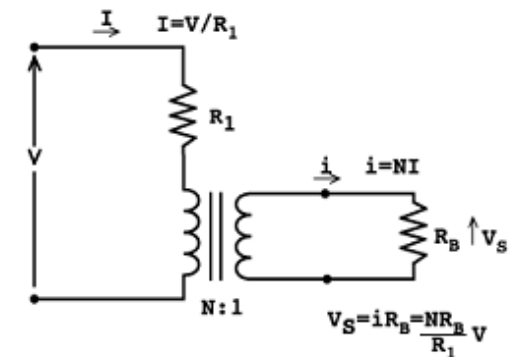
- R_1 i R_2 moraju biti mnogo veći od impedanse ostatka kola kako bi uticaj ovog senzora bio neznatan

SENZORI NAPONA ZASNOVANI NA HALL EFEKTU

Podela:

- Merenje AC i DC veličina
- Galvanska izolovanost
- Merenje struje kroz poznati otpor
- Osetljiviji senzor struje – više navojaka na primarnoj strani
- Problem disipacije?
- Temperaturna osetljivost otpora za detekciju!
- Napajanje i cena?

Primer: LEM sonda



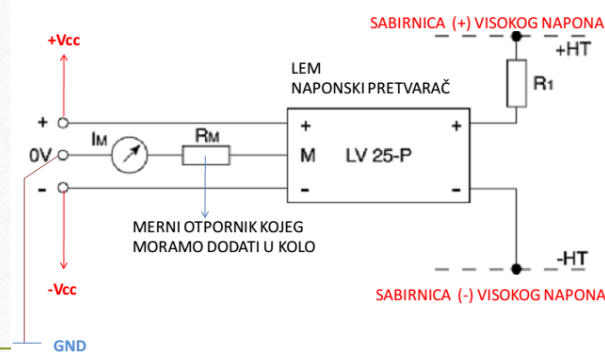
LEM naponski pretvarač ustvari koristi električno izolovani strujni senzor za merenje struje kroz jedan ili dva precizna visokonaponska otpornika koji se priključuju na visoki napon koji se meri. Signalno kolo je izolovano od primara, čak i ako se desi prekid na otpornicima u primaru.

SENZORI NAPONA ZASNOVANI NA HALL EFEKTU

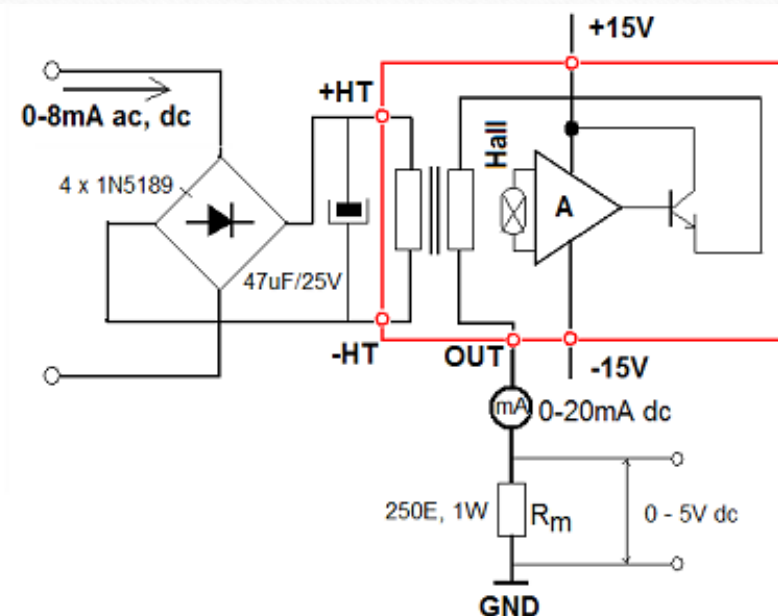
Principski blok dijagram:

- Primer sa strujnim senzorom u zatvorenoj sprezi
- Visoka linearnost u detekciji
- Velika efektivna osetljivost korišćenjem velikog broja namotaja na primaru
- Osetljiviji senzor struje – više navojaka na primarnoj strani

Vezivanje LEM:



Primer: LEM sonda



MERENJE BRZINE I POZICIJE EMP

Značaj:

- Regulacija i napredno upravljanje
- Monitoring i dijagnostika

Senzori:

- Tahogeneratori (DC i AC)
- Enkoderi (inkrementalni i apsolutni)
- Rezolver
- Potenciometri za merenje pozicije



TAHOGENERATOR

Podela:

- AC tahogenerator
- DC tahogenerator

Generalna svojstva:

- DC tahogenerator – MJS sa permanentnim magnetima na statoru
- AC tahogenerator – SM sa permanentnim magnetima na rotoru
- Neopterećen generator (mala struja indukta)



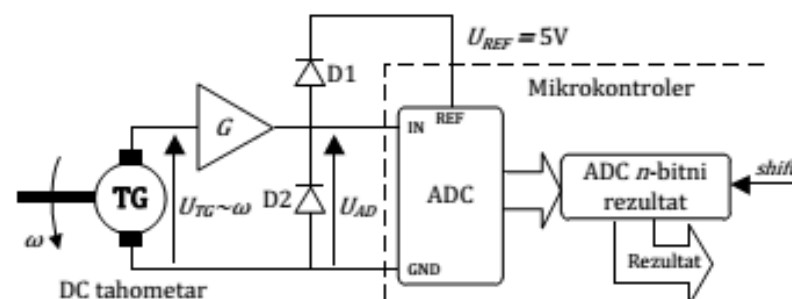
TAHOGENERATOR

DC tahogenerator:

- MJS sa permanentnim magnetima na statoru
- Neopterećen generator (mala struja indukta)
- Prirodni davač brzine – informacija o poziciji se dobija integraljenjem
- Brzina obrtanja srazmerna naponu indukta tahogenerators – analogni signal $U_{TG} = k_{TG} \omega_{TG}$.
- Komutator sa srebrnim prstenom (dug vek trajanja)
- Potreba za pojačanjem signala za skaliranje na ADC
- Četkice visokog kvaliteta

$$G = \frac{U_{AD}^{REF}}{U_{TG}^{MAX}}.$$

Procesuiranje signala:



$$AD_{broj} = \frac{\omega_{TG}(t)}{\omega_{TG}^{MAX}} (2^n - 1).$$

Problemi:

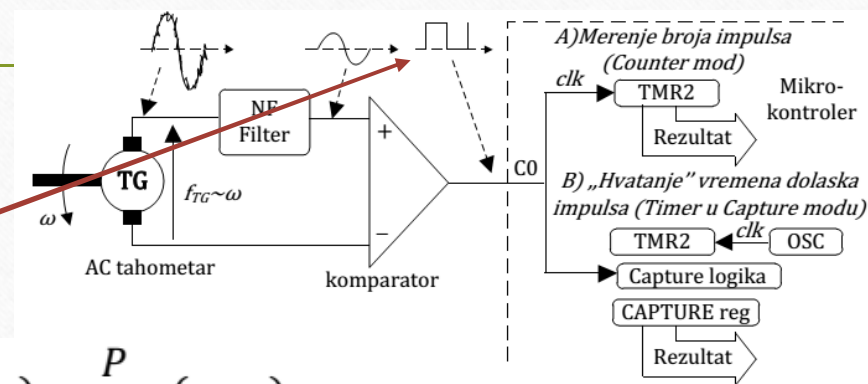
- Mala imunost na šum:
- Podizanje analogne mase i offset

TAHOGENERATOR

AC tahogenerator:

- SM sa permanentnim magnetima na rotoru
- Neopterećen generator (mala struja indukta)
- Prirodni davač brzine – informacija o poziciji se dobija integraljenjem
- Brzina obrtanja srazmerna frekvenciji napona indukta tahogeneratora – impulsni signal $f_{TG}(\text{Hz}) = \frac{P}{60} n(\text{rpm})$,
- Prosta konstrukcija bez četkica i komutatora
- Komplikovanije procesuiranje signala
- TIMER modul u modu rada COUNTER ili CAPTURE
- Konstrukcija sa tipičnim brojem pari polova P: 8 ili 16

Procesuiranje signala:



Problemi:

- Komplikovanije procesuiranje
- Nestanak signala na malim ω
- Mala rezolucija pri malim ω

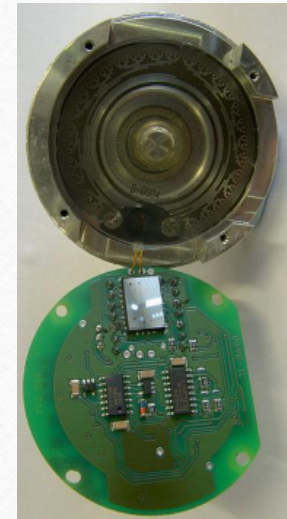
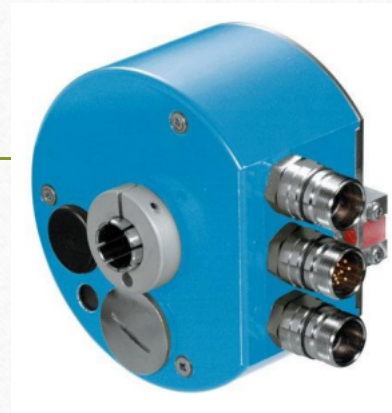
ENKODERI

Podela:

- Apsolutni enkoder
- Inkrementalni enkoder

Aspekti i svojstva senzora:

- Optički enkoderi, magnetni enkoderi
- Prirodni davač pozicije
- Robusna konstrukcija
- Mala cena
- Potreba za napajanjem (5V, 12V, 24V)
- Izlaz Push-Pull, Line driver, Open collector
- Interfejsna elektronika u kućištu

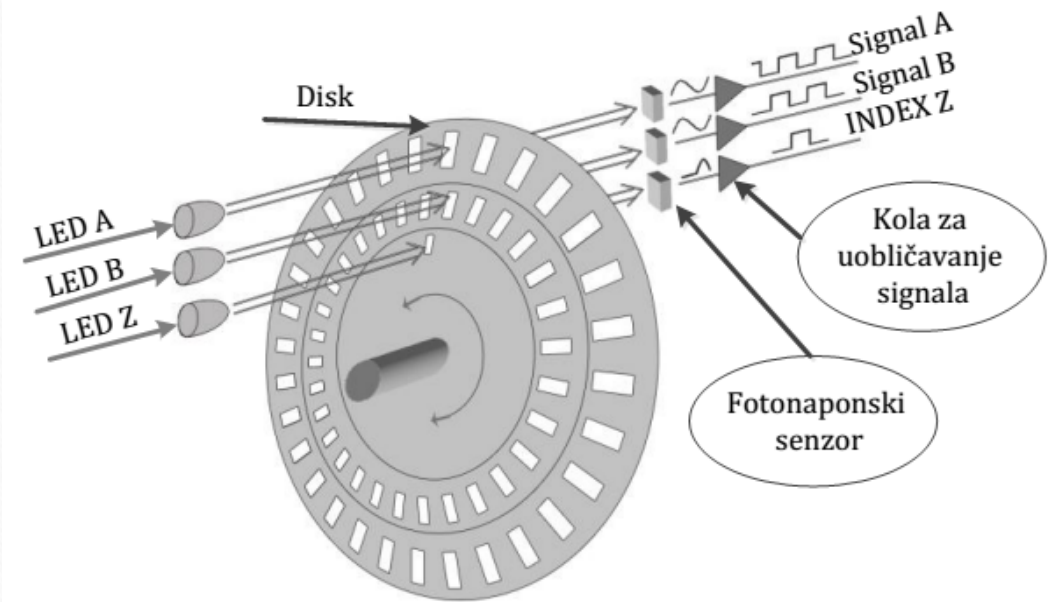


ENKODERI

Inkrementalni enkoder:

- Disk sa žlebovima rotira sa vratilom
- 3 kanala: A, B i Z
- Prostorna dispozicija žlebova kanala A i B za 90° pravi faznu dispoziciju signala impulsa A i B
- Z kanal – jedan žleb po obrtaju INDEX za apsolutnu poziciju vrtila
- Broj žlebova kanala A i B – rezolucija enkodera – broj impulsa po krugu N
- Tipično N – 1024, 2048, 4096
- Osetljivost na mehaničke vibracije
- Potreba za napajanjem

Izgled inkrementalnog enkodera:



ENKODERI

Inkrementalni enkoder:

- QEI brojač se inkrementira/dekrementira na impulse A i B
- INDEX resetuje UP/DOWN brojač
- Komplementarni signali $\bar{A}$, $\bar{B}$ i $\bar{Z}$ smanjuju smetnje
- Vrednost brojača je pozicija
- Rezolucija N , $2N$ ili $4N$

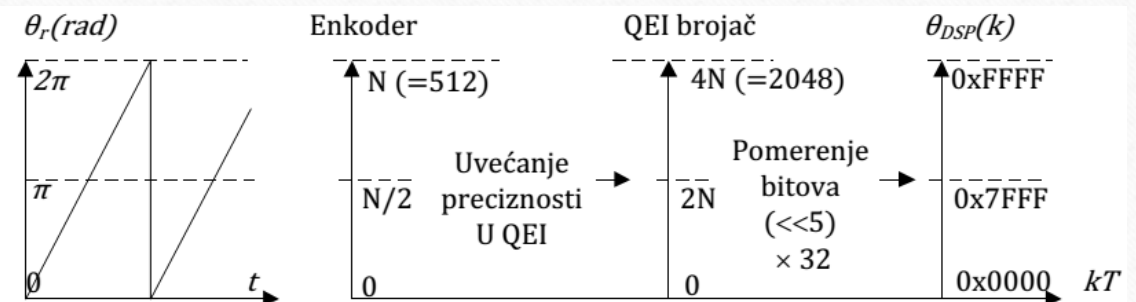
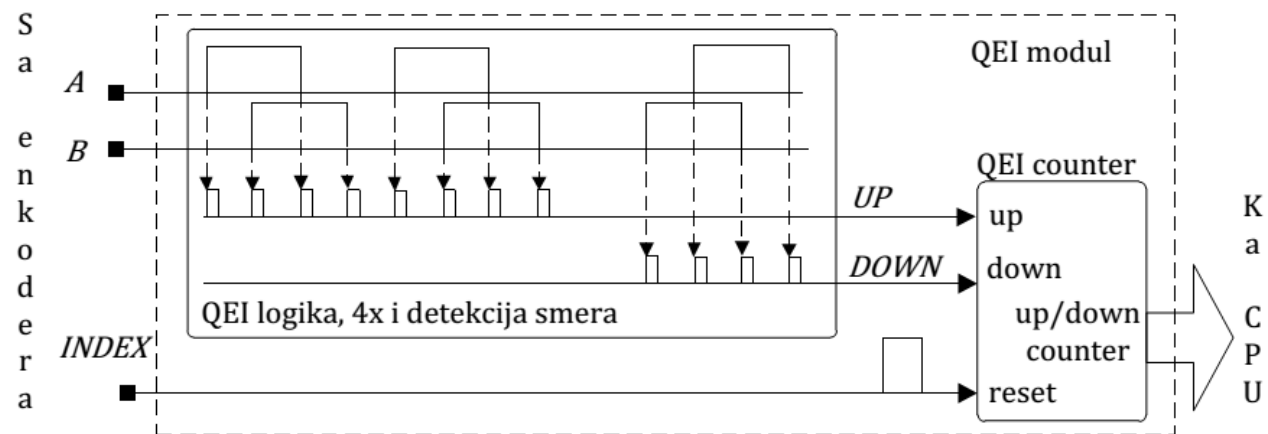
Logika brojanja UP/DOWN:

$$UP = A \uparrow \cdot \bar{B} + A \cdot B \uparrow + A \downarrow \cdot B + \bar{A} \cdot B \downarrow,$$

$$DOWN = \bar{A} \cdot B \uparrow + A \uparrow \cdot \bar{B} + A \cdot B \downarrow + A \downarrow \cdot \bar{B}$$

Ilustracija rada enkodera:

$$n_{QEP} = 4N \frac{\theta_r}{2\pi}$$



ENKODERI

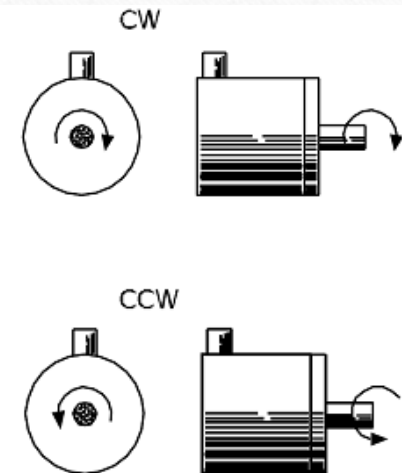
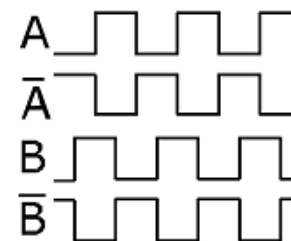
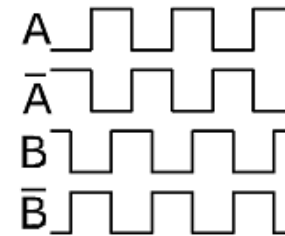
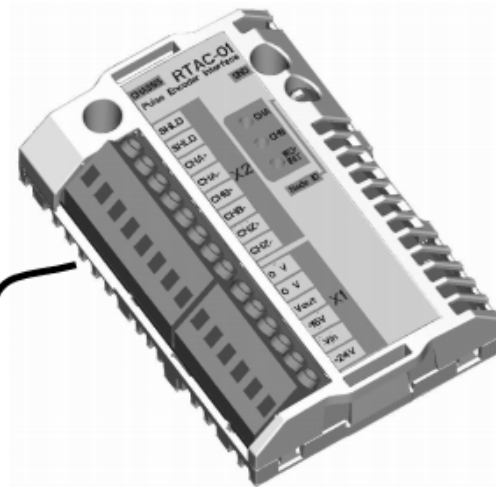
Inkrementalni enkoder

Način povezivanja:

Ilustracija rada enkodera:



Konektor



ENKODERI

Apsolutni enkoder:

- Disk sa žlebovima
- N kanala omogućuje N bitnu rezoluciju
- Više kanala, bolja rezolucija veća cena
- Kodiranje pozicije – grejov kod, binarni kod
- $\Delta\theta = 2\pi/2^N$ – inkrement pozicije

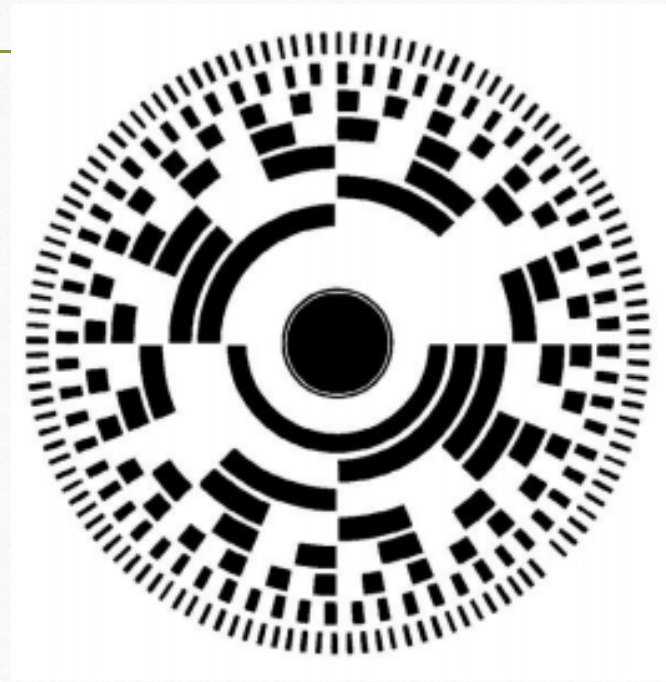
Grejov kod
Menja se
samo po
jedan bit



Binarni kod
Bitovi
različite
“težine”



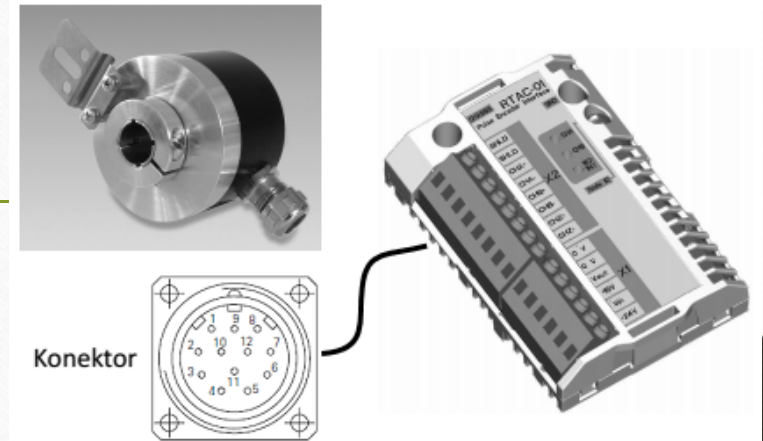
Izgled diska enkodera:



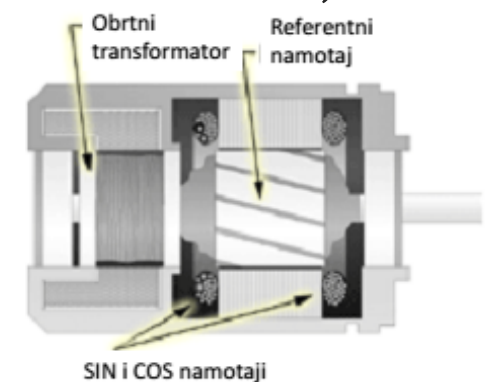
REZOLVER

Praktični aspekti:

- Elektromagentni rezolver
- Robusni konstrukcija
- Nisu skupi
- Potreba za pobudnim signalom visoke učestanosti
- Potreba za značajnim izvorom za napajanje
- Analogni signali ograničavaju brzinu protoka signala i dužinu kabla
- Korišćenje kabla sa odvojenim paricama (širm)



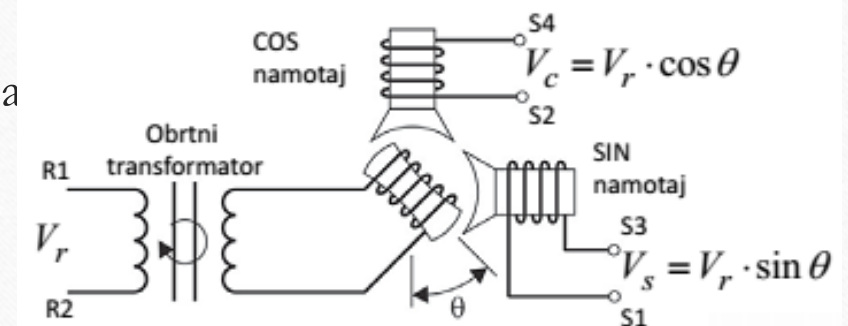
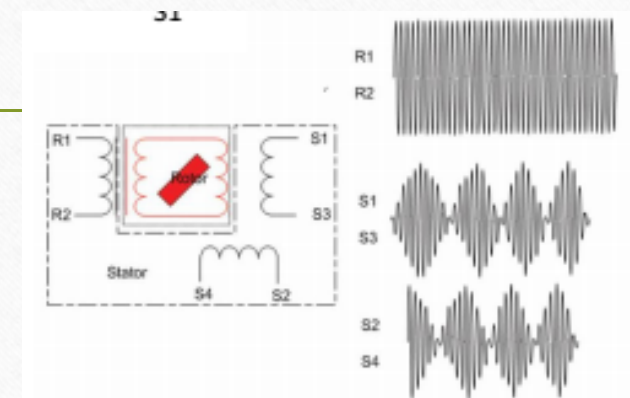
Konstrukcija



REZOLVER

Konstrukcija i princip rada:

- Jedan obrtni trafo i sinhrona mašina u generatorskom režimu
- Primar rotacionog trafoa se napaja pobudnim signalom konstante amplitude od 2 do 10 kHz
- Na sekundaru se indukuje napon koji napaja obrtni pobudni namotaj za sinhroni generator.
- Generator ima dva namotaja pod 90° (SIN i COS) u kojima se indukuje signal iste pobudne učestanosti od prvog obrtnog trafoa sa promenljivom amplitudom čija je frekvencija jednaka frekvenciji obrtanja rotora
- Na osnovu obvojnice signala SIN i COS namotaja može se odrediti pozicija vratila

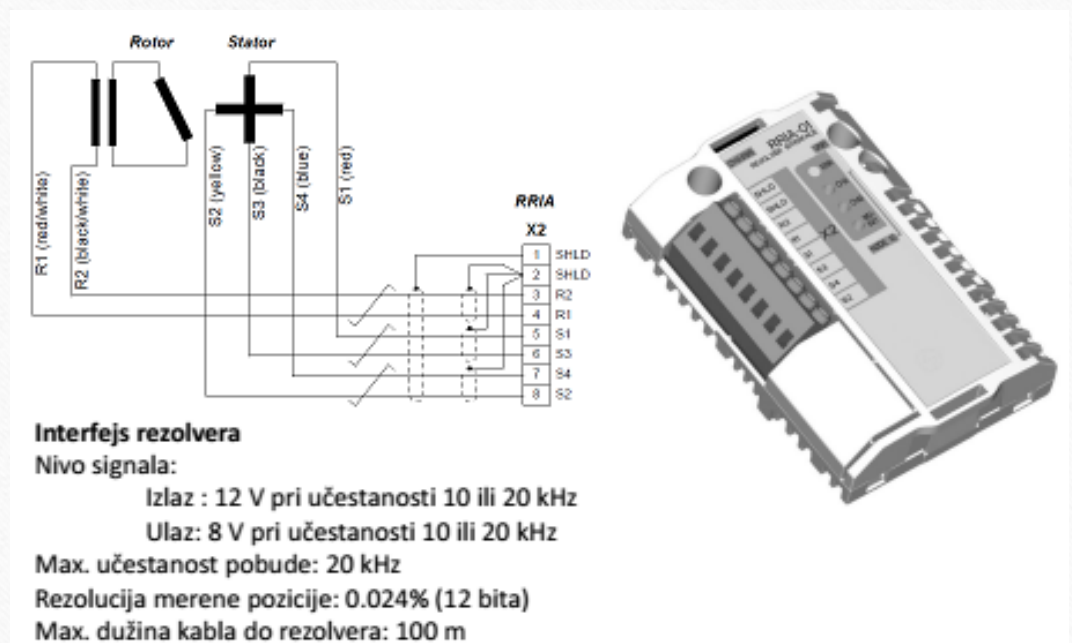


REZOLVER

Prednosti i mane:

- Potreba za posebnim uređajem za elektronsku demodulaciju i interfejs sa kontrolerom
- Komplikovaniji prenos signala pogotovo na veće daljine
- Velika rezolucija ugla, naročito kod višepolnih rezolvera
- Nema kontakata sa rotorom niti varničenja ni habanja

Način montaže elektromagnetnog rezolvera



POTENCIOMETRI POZICIJE

Karakteristike:

- Merenje na bazi promene otpornosti zbog pomeranja klizača
- Enkoder sa sajlom, linearni enkoder
- Širok opseg dužina
- Robusna konstrukcija
- Niska cena
- Onemogućeno korišćenje u Ex sredinama
- Ograničen hod klizača (dužinom ili uglom)



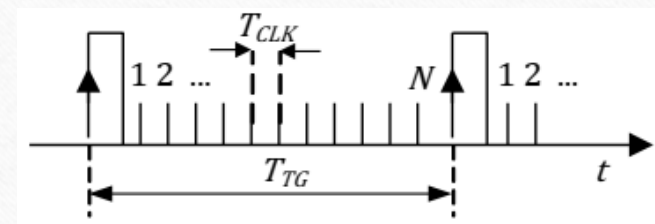
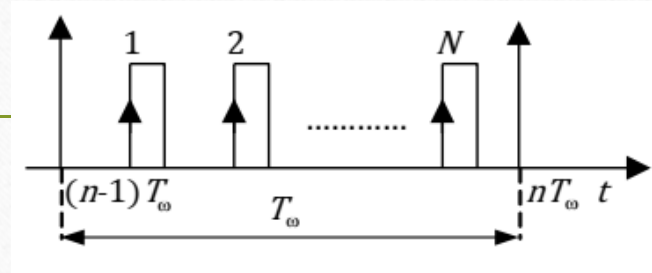
METODE ZA RAČUNANJE BRZINE

Metode:

- Brojanjem pristiglih impulsa u intervalu
- Merenje vremena između pristiglih impulsa
- Kombinovana metode

Karakteristike:

- Procesuiranje impulsnog signala u svrhu računanja brzine
- Informacija je diskretizovana brojem impulsa



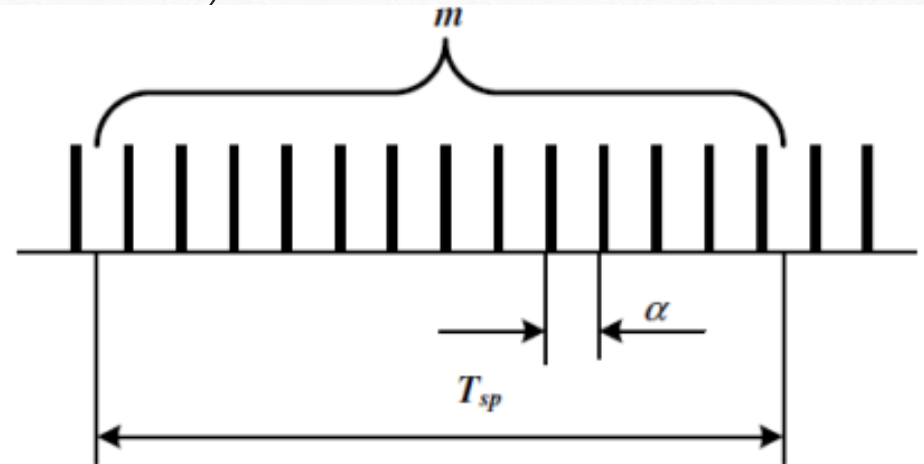
METODE ZA RAČUNANJE BRZINE

Brojanje pristiglih impulsa u intervalu:

- Interval za brojanje T_{SP} (tipično od $1ms$ do $20ms$)
- Povorka m impulsa u intervalu T_{SP}
- Pojava impulsa na promenu ugla α
- Dovođenje na ulaz COUNTER modula

Praktični aspekti:

- Računski najmanje zahtevna
- Brzina n srazmerna broju pristiglih impulsa m
- Velika greška pri malim T_{SP} i ako senzor ima malu rezoluciju N (AC taho gde je $N = P$)



$$n = \frac{m\alpha}{T_{SP}} = \frac{60m}{NT_{SP}} = K \cdot m [o/min]$$

METODE ZA RAČUNANJE BRZINE

Brojanje pristiglih impulsa u intervalu:

$$n = \frac{m\alpha}{T_{SP}} = \frac{60m}{NT_{SP}} = K \cdot m \text{ [o/min]}$$

- Izbrojen broj impulsa uvek ceo broj
- Nepovoljan kod AC taho gde je $N = 8$ ili 16
- Povoljniji kod enkodera gde je $N = 1024, 2048, 4096$
- Greška u merenju uvek negativna $\Delta n = \frac{60 \cdot \Delta m}{NT_{SP}} = \frac{60 \cdot (-1)}{NT_{SP}}$
- Primer AC taho $N = 8, T_{SP} = 5ms$ sledi $\Delta n = 150$ o/min
- Primer Enkoder $N = 4096, T_{SP} = 5ms$ sledi $\Delta n = 3$ o/min

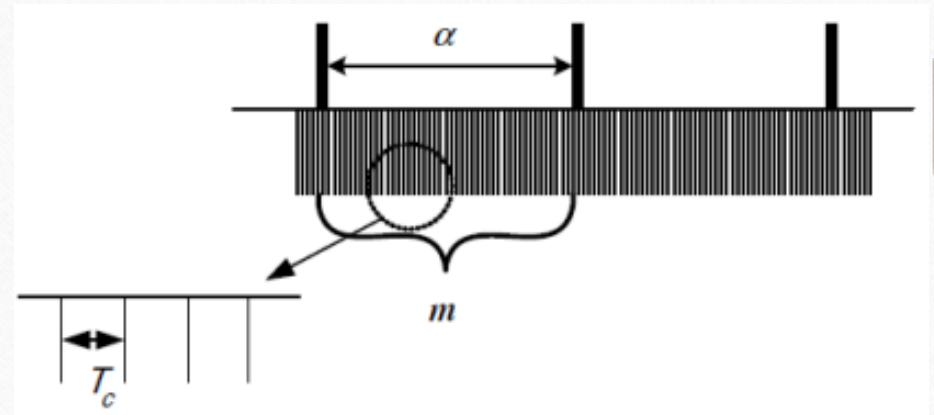
METODE ZA RAČUNANJE BRZINE

Merenje vremena između pristiglih impulsa:

- Interval update-a brzine je promenljiv
- Povorka m clock signala u intervalu između dva impulsa sa senzora
- Period oscilatora $T_c = 1/f_c$
- Dovođenje na ulaz CAPTURE modula

Praktični aspekti:

- Računski zahtevnija zbog deljenja
- Brzina n obrnuto proporcionalna broju pristiglih impulsa m



$$n = \frac{\alpha}{mT_c} = \frac{60f_c}{Nm} = K/m \text{ [o/min]}$$

METODE ZA RAČUNANJE BRZINE

Merenje vremena između pristiglih impulsa:

- Izbrojen broj impulsa uvek ceo broj
- Nepovoljan kod ultra velikih brzina i ultra malih brzina
- Frekvencija clock signala poželjno da bude što veća
- Greška u merenju uvek negativna $\Delta n = \frac{60}{NT_C} \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{m-1} \right)$
- Primer AC Taho $N = 16$, $f_C = 30\text{MHz}$ pri $n = 2000 \text{ o/min}$ sledi $m = 229$ a $\Delta n = -0.04 \text{ o/min}$
- Period odabiranja promenljiv – dug pri malim brzinama
- Opadanje rezolucije sa porastom brzine sa $1/n^2$
- Pogrešna informacija o brzini pri startu (problem malih brzina)

$$n = \frac{\alpha}{mT_C} = \frac{60f_C}{Nm} = K/m \text{ [o/min]}$$

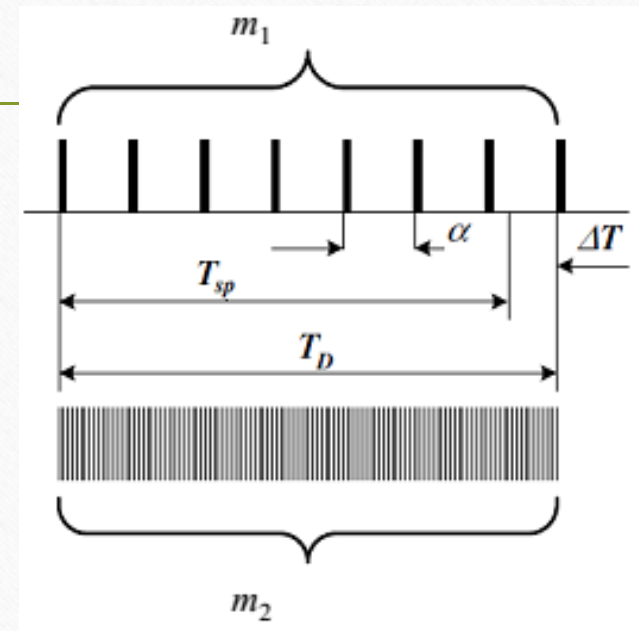
METODE ZA RAČUNANJE BRZINE

Kombinovana metoda:

- Spaja dobre osobine prethodne dve metode
- Pruža dobru rezoluciju i na malim i na velikim brzinama

Praktični aspekti:

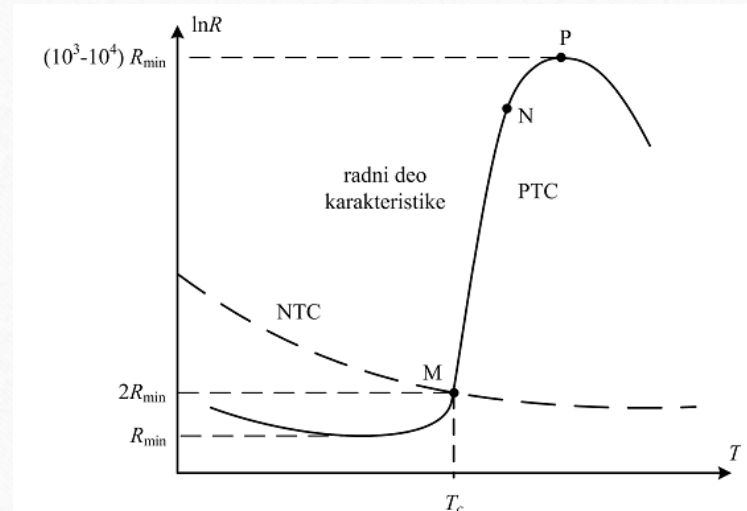
- Najsloženiji hardver
- Promenljiva perioda odabiranja (update-a brzine)
- Detekcija brzine sa velikom rezolucijom
- Korišćenje male periode odabiranja



$$n = \frac{m_1 \alpha}{N(T_{SP} + \Delta T)} = \frac{60 f_c m_1}{N m_2} [o/min]$$

MERENJE TEMPERATURE U EMP

- Meri se temperatura namotaja motora ili hladnjaka pretvarača
- Na osnovu maksimalne dozvoljene temperature (povišenja) vrši se termička zaštita u pogonu
- Mogućnost adaptacije parametara motora sa promenom temperature
- Davači temperature - termistori
 - PTC sonda
 - NTC sonda



NTC TERMISTOR

- Samozagrevanje
- Dispacija
- Ekstremno hladne sredine
- Restart!

$$R_T = R_{T0} \exp \left[B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right]$$

Otporno/temperaturna karakteristika!

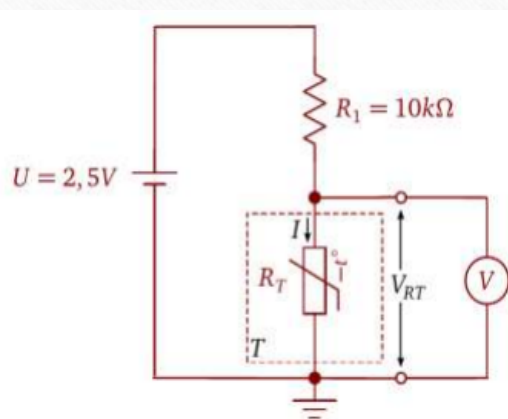
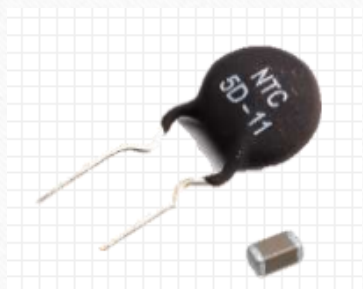
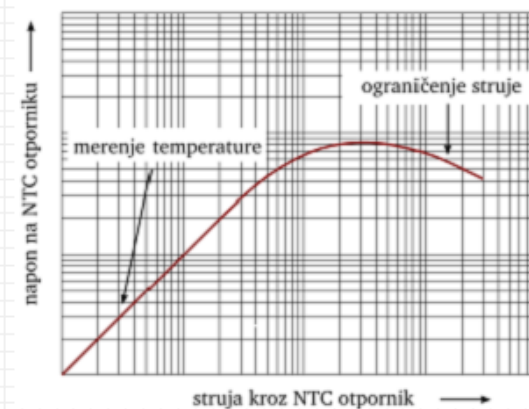
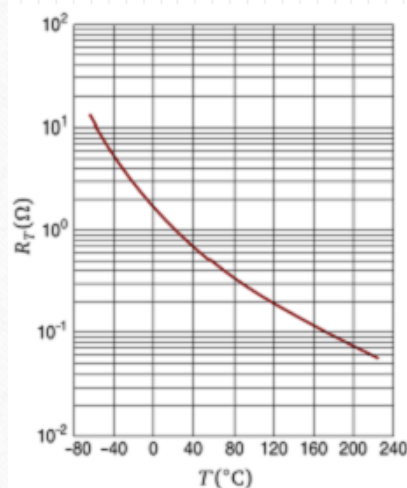
Nelinearna

Samozagrevanje:

$$P = \frac{U^2}{R_T} = \delta(T - T_0)$$

δ – koeficijent disipacije

$$R_T = R_\infty e^{\frac{B}{T}}$$

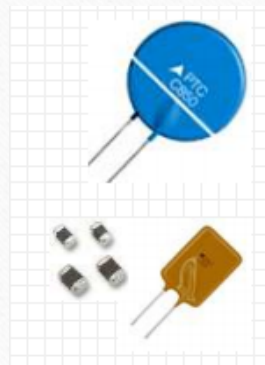


PTC TERMISTOR

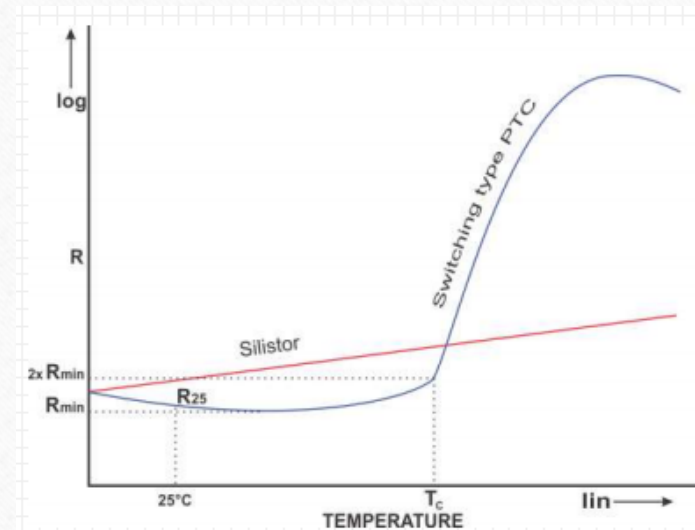
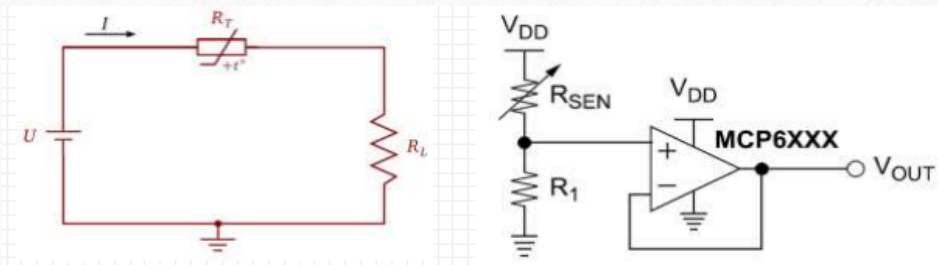
- Linearni - silistori
- Nelinearni – barijum titanat

Primena:

- Spoljno grejani – temperaturna zaštita
- Interno grejani – strujna zaštita, grejni elementi



Otporno/temperaturna karakteristika!



MERENJE MOMENTA U EMP

- Koriste se u osnovi kočnice kojima se vrši mehaničko opterećenje ispitne mašine
 - Pronijeva kočnica
 - Hidraulička kočnica
 - Magnetne kočnice (histerezisne i sa vrtložnim strujama)
 - Elektrodinamometar
 - Torziometar (merne torzione trake)

MAGNETNA KOČNICA

HISTEREZISNA KOČNICA

- Magnetne kočnice – Histerezisna
 - Radi na principu gubitaka u gvožđu
 - Generator jednosmerne struje bez namotaja rotora
 - Konstrukcija sa histerezisnim efektom
 - Momenat se na statoru meri pomoću torzione opruge



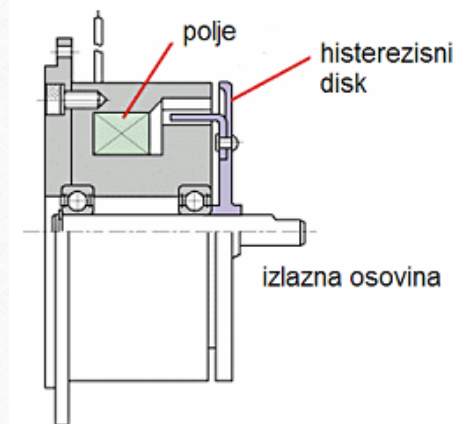
$$M = \frac{P_h}{\Omega} = k$$

Njeno funkcionisanje odgovara loše konstruisanom generatoru u kome se celokupna snaga pretvara u toplotu u obliku gubitaka usled histerezisa u gvožđu rotora!!

Gubici usled histerezisa su proporcionalni prvom stepenu brzine obrtanja dok je odgovarajući momenat konstantan i nezavisan od brzine obrtanja (kao kod Pronijeve kočnice)

$$P_h = \eta \cdot f \cdot B_m^\alpha \cdot m_{Fe} = k\Omega$$

- Rotor u kome se javljaju gubici usled histerezisa je od tvrdog čelika
- Kod tvrdog čelika je tipična velika površina histerezisnog ciklusa
- Veliki su gubici usled histerezisa i značajno veći od gubitaka usled vrtložnih struja
- Induktor (namotaj polja) je na statoru i pobuđuje se jednosmernom strujom
- Preko pobudne struje se reguliše momenat opterećenja
- Gubici u rotoru usled histerezisa su:



MAGNETNA KOČNICA

- Magnetne kočnice – Vrtložna

Ovi gubici su srazmerni kvadratu brzine obrtanja, dok je odgovarajući momenat:

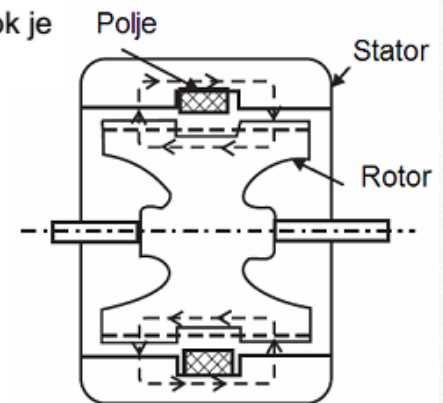
$$M_v = \frac{P_v}{\Omega} = k\Omega$$

- Radi na principu gubitaka u gvožđu
- Generator jednosmerne struje bez namotaja rotora
- Konstrukcija sa efektom vrtložnih struja
- Momenat se na statoru meri pomoću torzione opruge



- Rotor je načinjen od mekog gvožđa velike permeabilnosti, čime se potenciraju gubici usled vrtložnih struja
- Gubici usled vrtložnih struja su dati izrazom:

$$P_v = \sigma \cdot f^2 \cdot B_m^2 \cdot m_{Fe} = k\Omega^2$$



-Momenat usled vrtložnih struja je proporcionalan prvom stepenu brzine obrtanja, kao kod električni kočnica (generatora)

-Ovo je logično, obzirom da su gubici usled vrtložnih struja električne prirode

TORZIOMETRI

- Primena za stacionarne ili sporopromenljive režime
- Princip rada na osetljivim mernim trakama čiji se otpor menja uvrtnjem torzionog štapa
- Montaža između dve mehanički spregnute mašine
- Merne trake pod 45° koje pripadaju mernom mostu
- Neopterećeno stanje – most je u ravnoteži
- Opterećenjem se menja otpor traka i generisan naponski signal se meri
- Problem: osetljivost na mehanička naprezanja i vibracije

