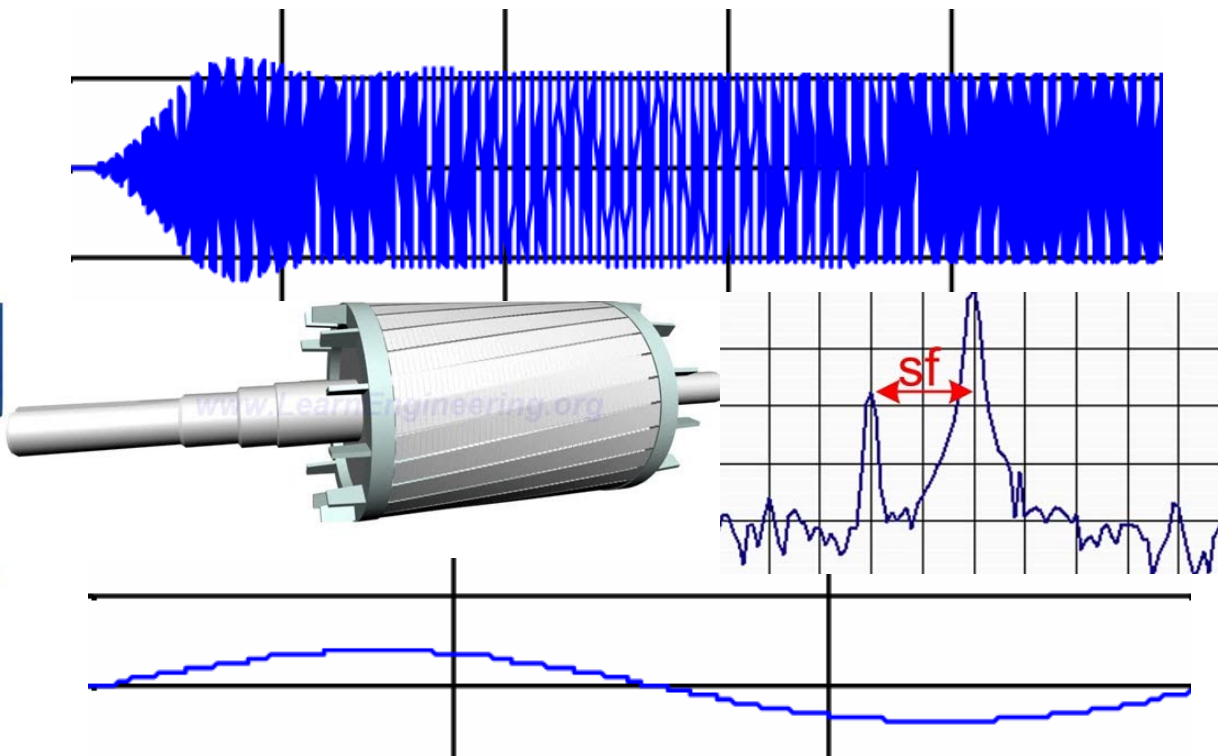




Visoka škola elektrotehike i računarstva strukovnih
studija-Beograd, 2015/2016
Specijalističke studije SNET

Monitoring i
Dijagnostika
Električnih
Mašina

MERENJE KLIZANJA ASINHHRONIH MAŠINA

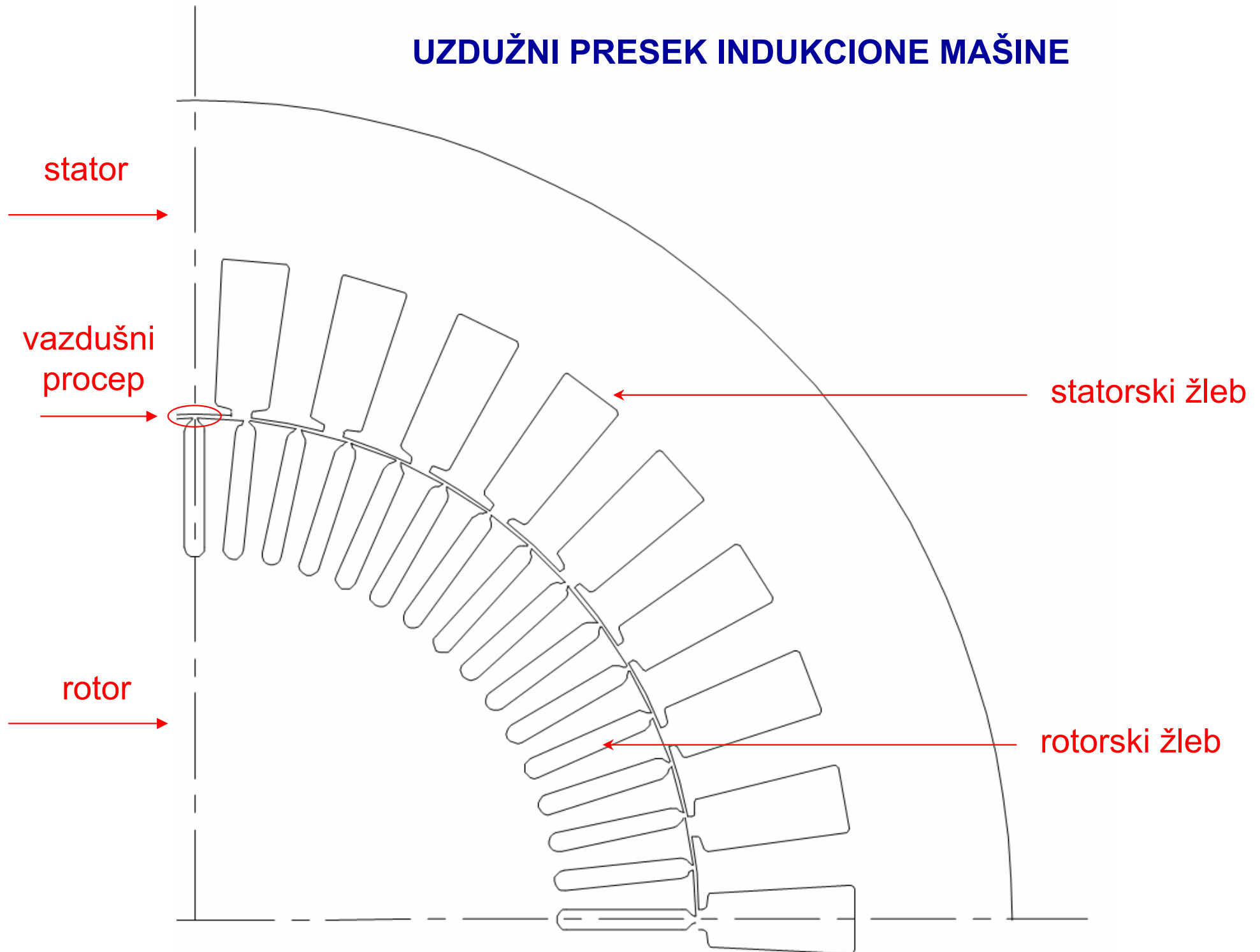


Predmetni profesor: Dr Željko Despotović

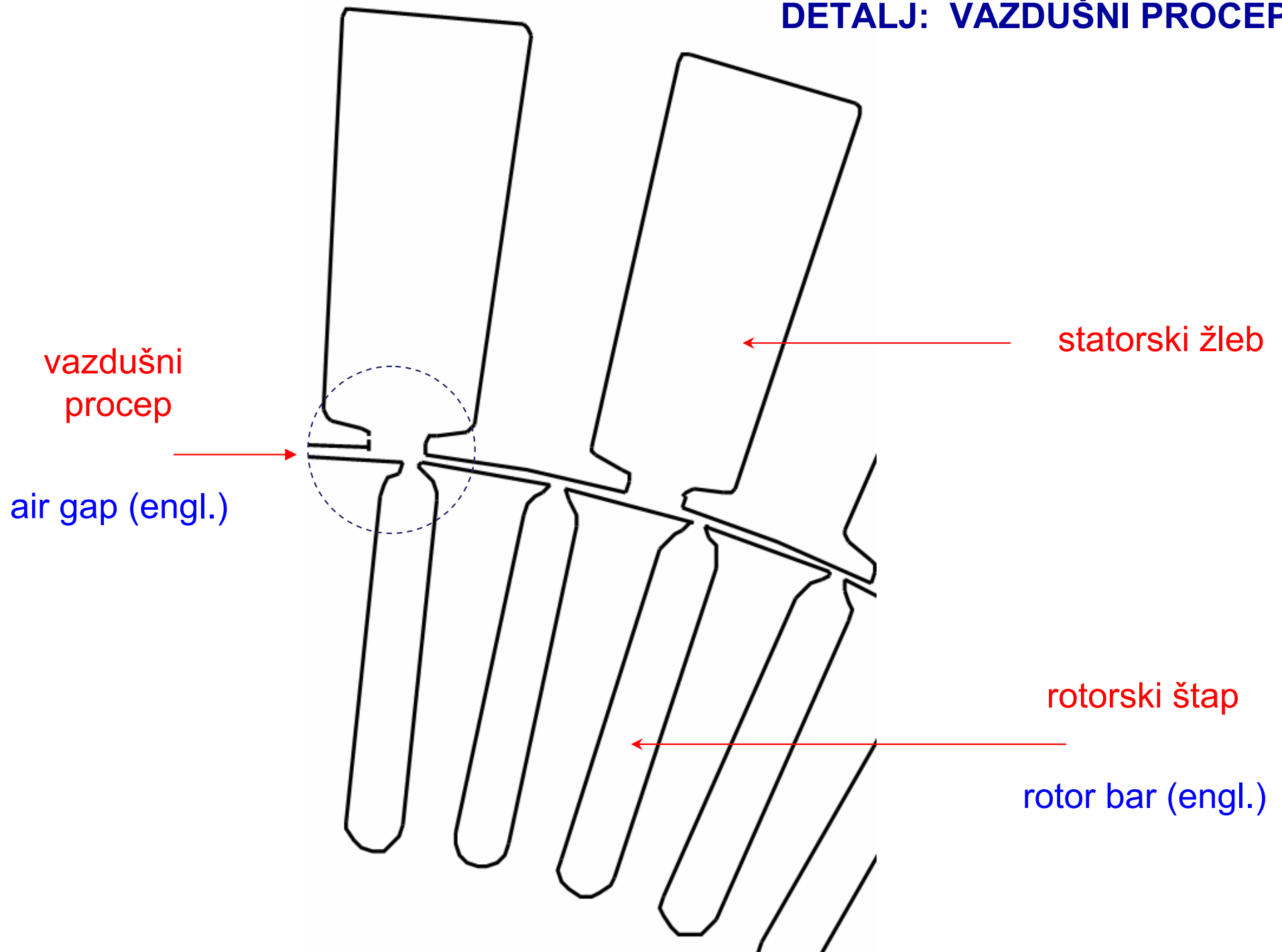
UVOD

- Kad kod je moguće, brzinu obrtanja treba meriti preko klizanja.
- Radi se o indirektnom ali preciznom merenju.
- Poznavanje tačne vrednosti klizanja je potrebno zbog određivanja gubitaka u namotaju rotora, odnosno kavezu asinhronne mašine.
- **Obrnuti postupak, određivanja klizanja merenjem brzine obrtanja, nije preporučljiv!!!!**
- Klizanje treba meriti direktno, izuzev u slučajevima velikih klizanja.

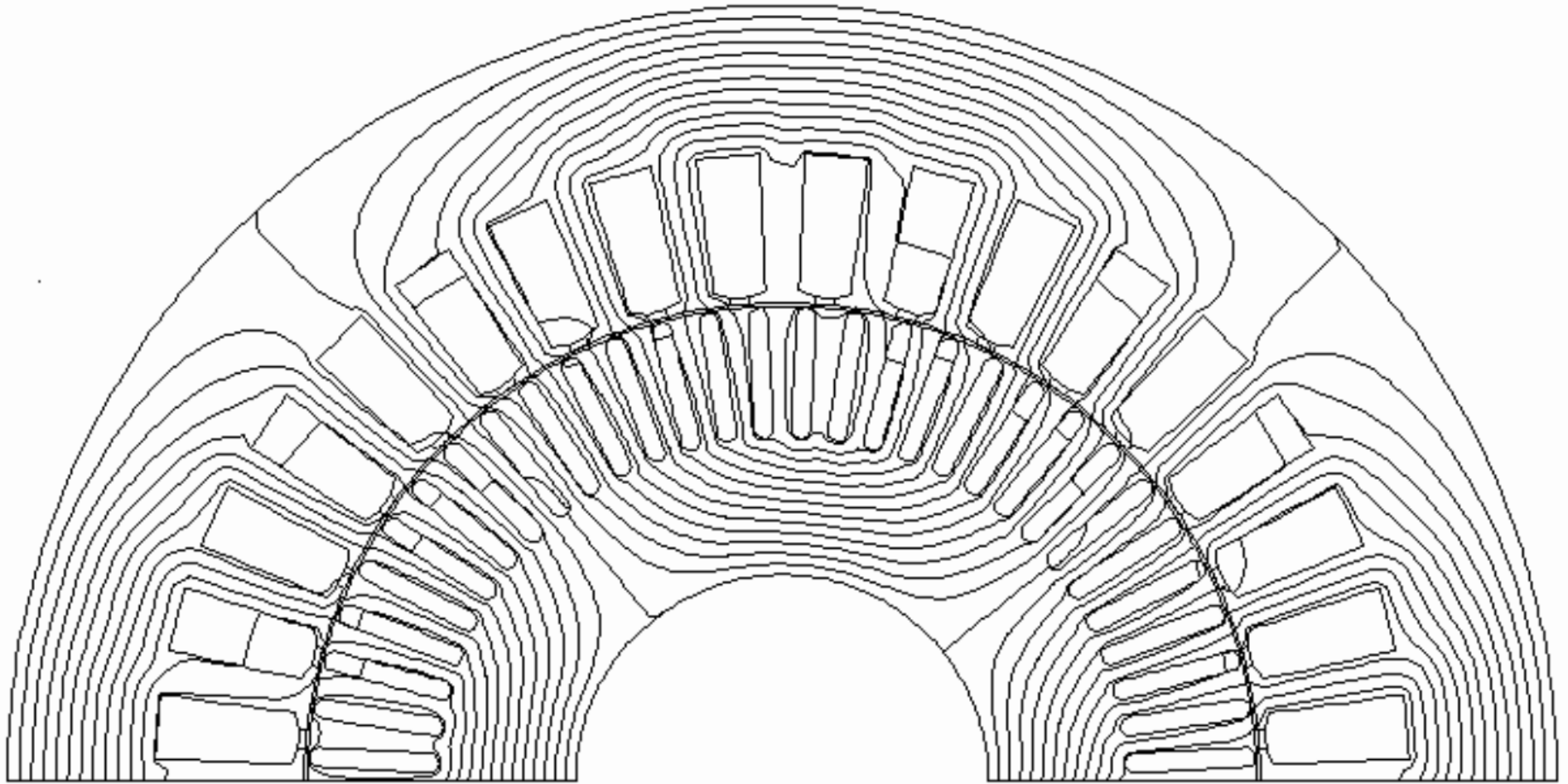
UZDUŽNI PRESEK INDUKCIONE MAŠINE



DETALJ: VAZDUŠNI PROCEP

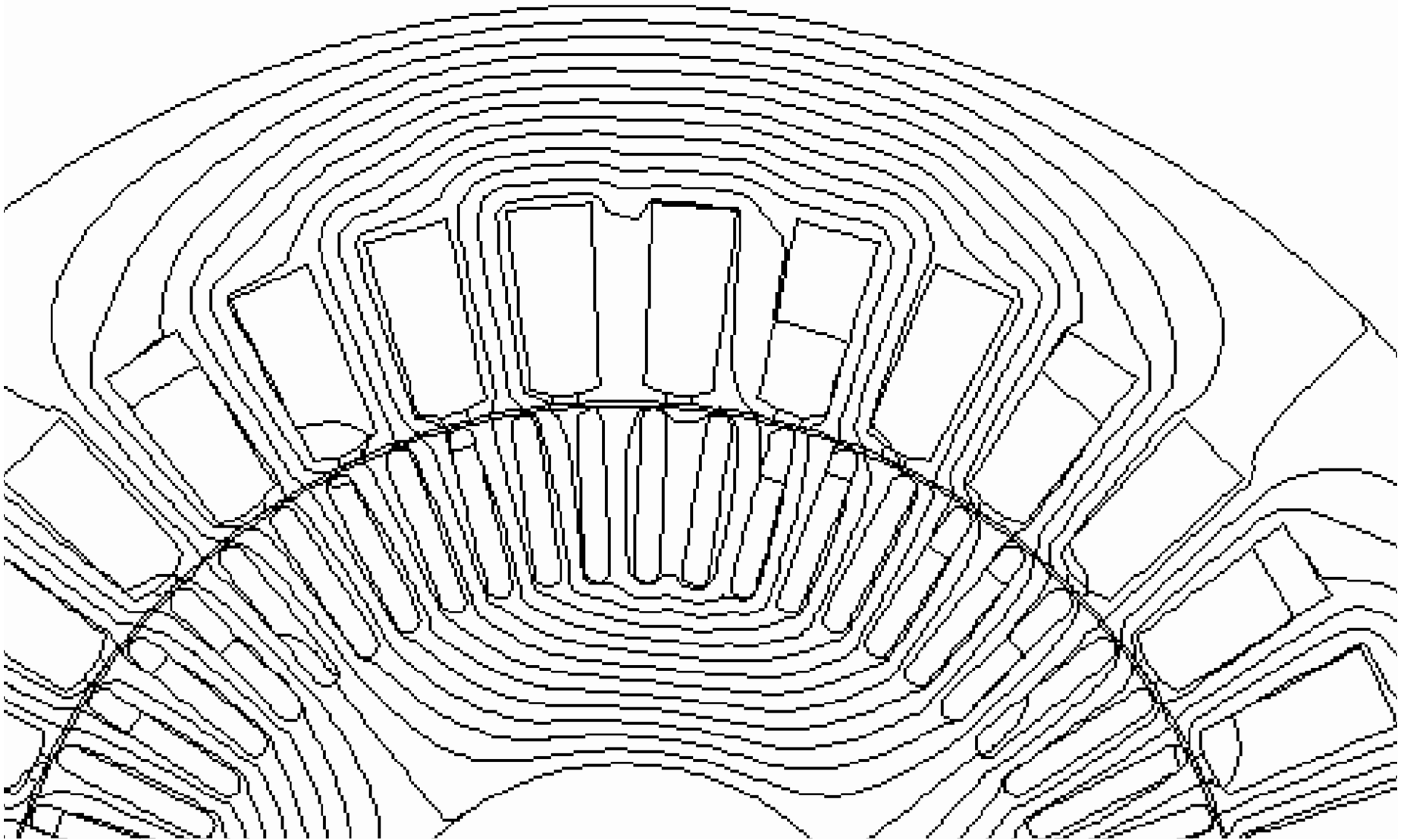


LINIJJE MAGNETNOG FLUKSA U ASINHRONOJ MAŠINI



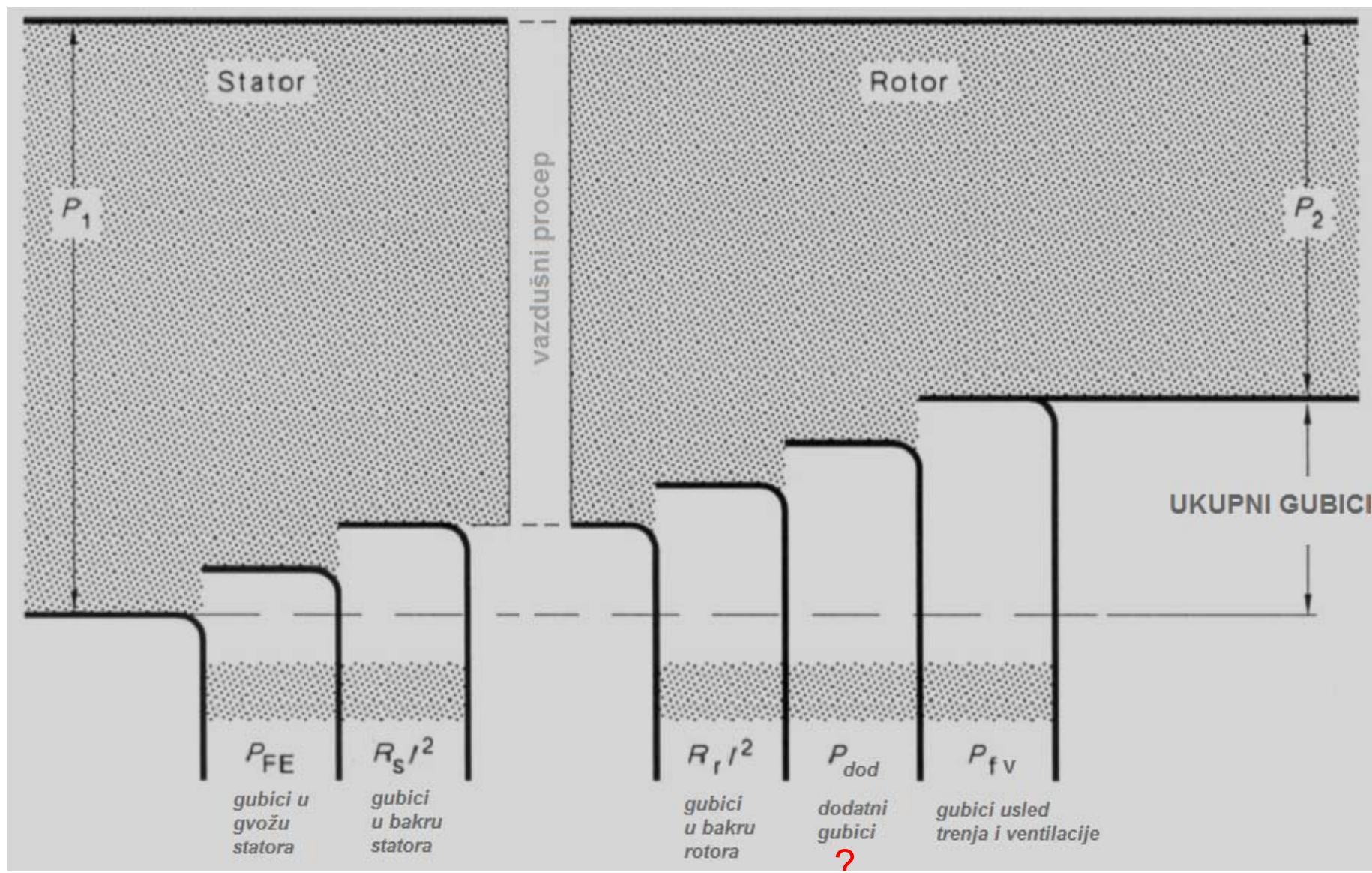
Magnetno polje teži da se zatvori na onim delovima gde je magnetni otpor najmanji, odnosno gde je magnetna permeabilnost najveća (Fe). Vazdušni zazor predstavlja deo magnetne putanje i u njemu je najveće gustina energije, koja određuje snagu mašine.

DETALJ: RASPODELA FLUKSA u MAŠINI



Najveći deo magnetnog fluksa se zatvara kroz magnetni materijal, obzirom da je tamo magnetni otpor najmanji. Normalna komponenta magnetne indukcije na graničnoj površini *Fe-vazduh* ostaje nepromenjena, dok se tangencijalna komponenta značajnije menja, kao što pokazuje slika.

DIJAGRAM GUBITAKA U ASINHRONOJ MAŠINI



$$\text{Rotorski gubici} = (P_1 - (I^2 R_s) - P_{FE}) \times s$$

s-klizanje

P_{dod}-dodatni gubici u rotoru? (engl. stray losses)

- Pulsacije fluksa u zubcima statora i rotora, ali i u vazдушnom procepu električne mašine su glavni izvor dodatnih gubitaka
- **Pulsacije??** Pulsacije usled promene magnetne reluktanse u oblasti zubaca tokom pomeranja statorskih zubaca u odnosu rotorske (reluktansa modulisanih harmonika) i fluktuacija amper-navoja tj. Magneto-Pobudne Sile (MPS) u skladu sa ugrađenom distribuiranom strujnom raspodelom provodnika u žlebovima (harmonici usled amper navoja).
- Učestanosti harmonika koji potiču od ovih pulsacija su iste, međutim ovi harmonici su vremenski pomereni jedni u odnosu na druge!!!!
- Preciznije, može se reći da u statoru postoji uticaj statorske MPS, rotorske MPS, pulsacija u žlebu koje su modulisane statorskim harmonicima ali i komponentama harmonika koje dovode do zasićenja
- U rotoru postoje komponente koje potiču od učestanosti usled klizanja struja izazvanih od osnovne komponente fluksa, struja usled statorske raspodele MPS, pulsacije u žlebu usled statorskih zubaca, zasićenja i struje izazvane harmonicima fluksa.

RELATIVNO KLIZANJE

- Relativna vrednost klizanja je po definiciji:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = 1 - \frac{n}{n_s}$$

n - brzina obrtanja rotora

n_s - sinhrona brzina obrtnog polja ($n_s=60f_s/p$)

- Važi i relacije:

$$n = (1 - s) n_s$$

$$n = (1 - s) \frac{60f_s}{p}$$

- Apsolutna greška klizanja je:

$$\Delta s = \frac{\Delta n}{n_s}$$

$$\frac{\Delta s}{s} = \frac{1}{s} \frac{\Delta n}{n_s}$$

Za mala klizanja: $s \ll 1$ $n \cong n_s$

$$\frac{\Delta s}{s} \gg \frac{\Delta n}{n}$$

ZAKLJUČAK: Klizanje treba meriti direktno izuzev u slučajevima velikih klizanja!!!!

Po jednoj drugoj definiciji, klizanje je jednako odnosu u čestanosti rotora i statora:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{n_r}{n_s} = \frac{f_r}{f_s}$$

Obzirom da je učestanost rotora mnogo manja od učestanosti statora (za $s=0.5\%$, i za $f_s=50\text{Hz}$, $f_r=0.25\text{Hz}$, $T_r=1/f_r=2.5\text{sec}$), postupci za merenje klizanja se baziraju na merenju broja M određenih pojava (skretanje kazaljke instrumenta i sl.) u posmatranom vremenu t .

$$\begin{array}{ccc} s = \frac{f_r}{f_s} & \xrightarrow{\quad} & s = \frac{M}{f_s t} \\ f_r = \frac{M}{t} & \nearrow & \end{array}$$

Pri realizaciji merenja mora se voditi računa o ograničenjima ljudskog oka i mernog sistema instrumenta, koji mogu da registruju 2 do 3 skretanja u sekundi!!!

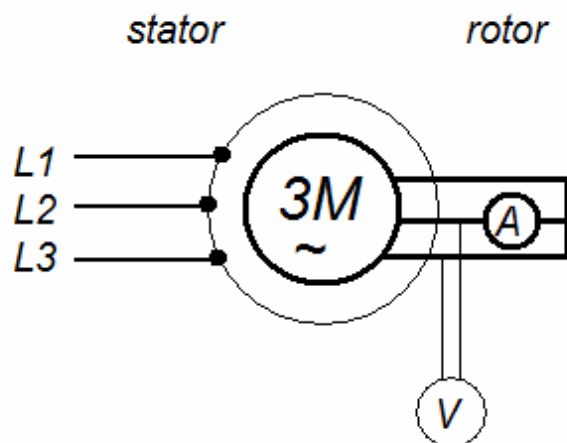
POSTUPCI MERENJA KLIZANJA

- Pomoću ampermetra i voltmetra kod namotanih rotora (sa kliznim prstenovima)
- Pomoću milivoltmetra i četkica
- Pomoću milivoltmetra i indukcionog kalema
- Pomoću magnetne igle
- Stroboskopska metoda
- Metoda merenja klizanja bazirana na merenju odnosa učestanosti*

**Andrew Baghurst, CalTest, Port Elliot, South Australia*
EMSA Workshop, Zurich 2012

Merenje klizanja pomoću ampermetra i voltmetra kod namotanih rotora (rotori sa kliznim prstenovima)

U kolo rotora sa kliznim prstenovima jednostavno se veže ampermetar direktno ili preko šanta, ili voltmetar između dva priključna kraja



M -broj skretanja za vreme t

$$s = \frac{M}{f_s t} = \frac{M}{50 t}$$

$$s\% = \frac{M}{f_s t} = \frac{2M}{t}$$

za instrument sa kretnim kalemom

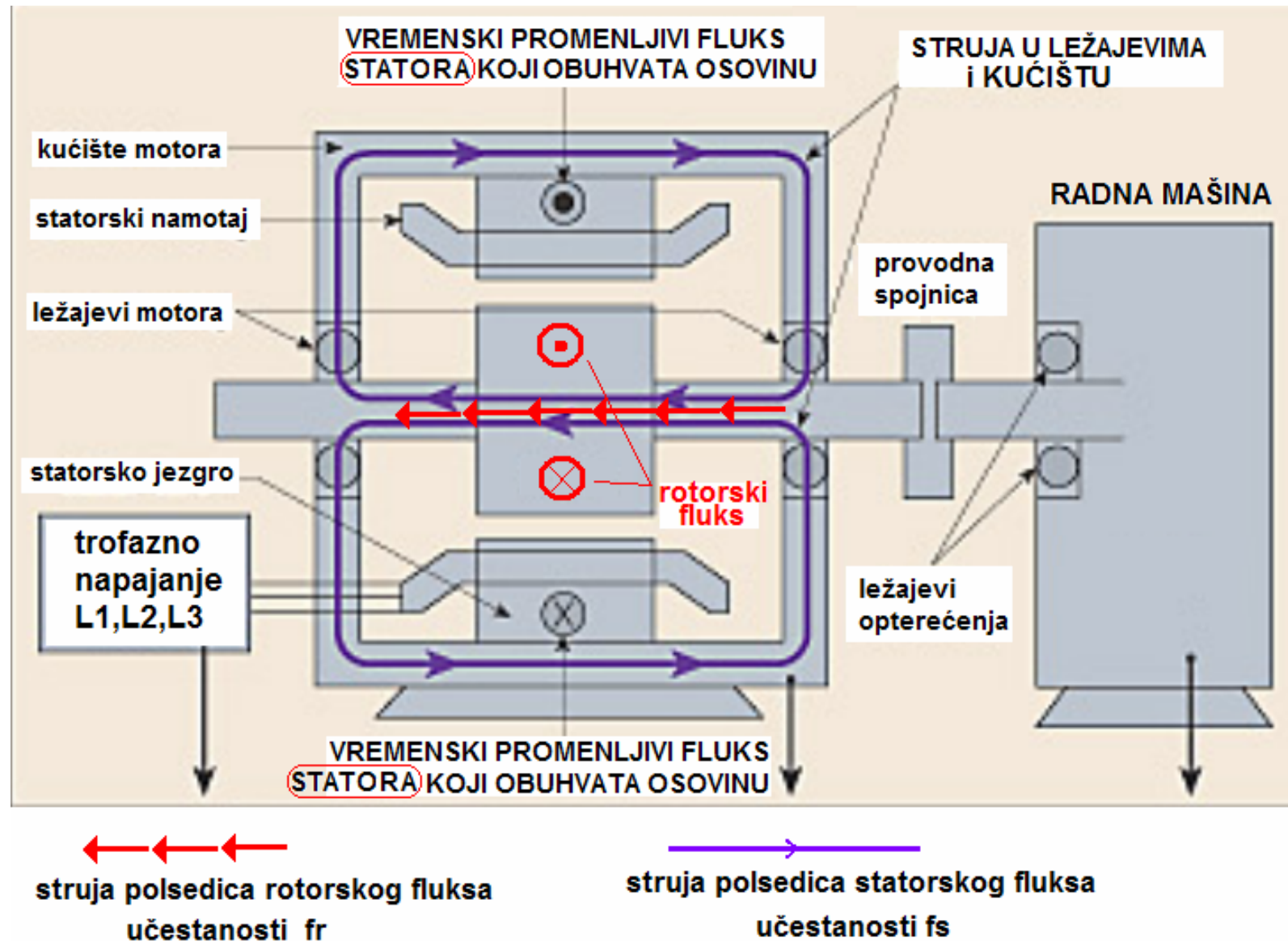
$$s = \frac{M}{f_s t} = \frac{M}{100 t}$$

$$s\% = \frac{M}{f_s t} = \frac{M}{t}$$

za instrument sa mekim gvožđem

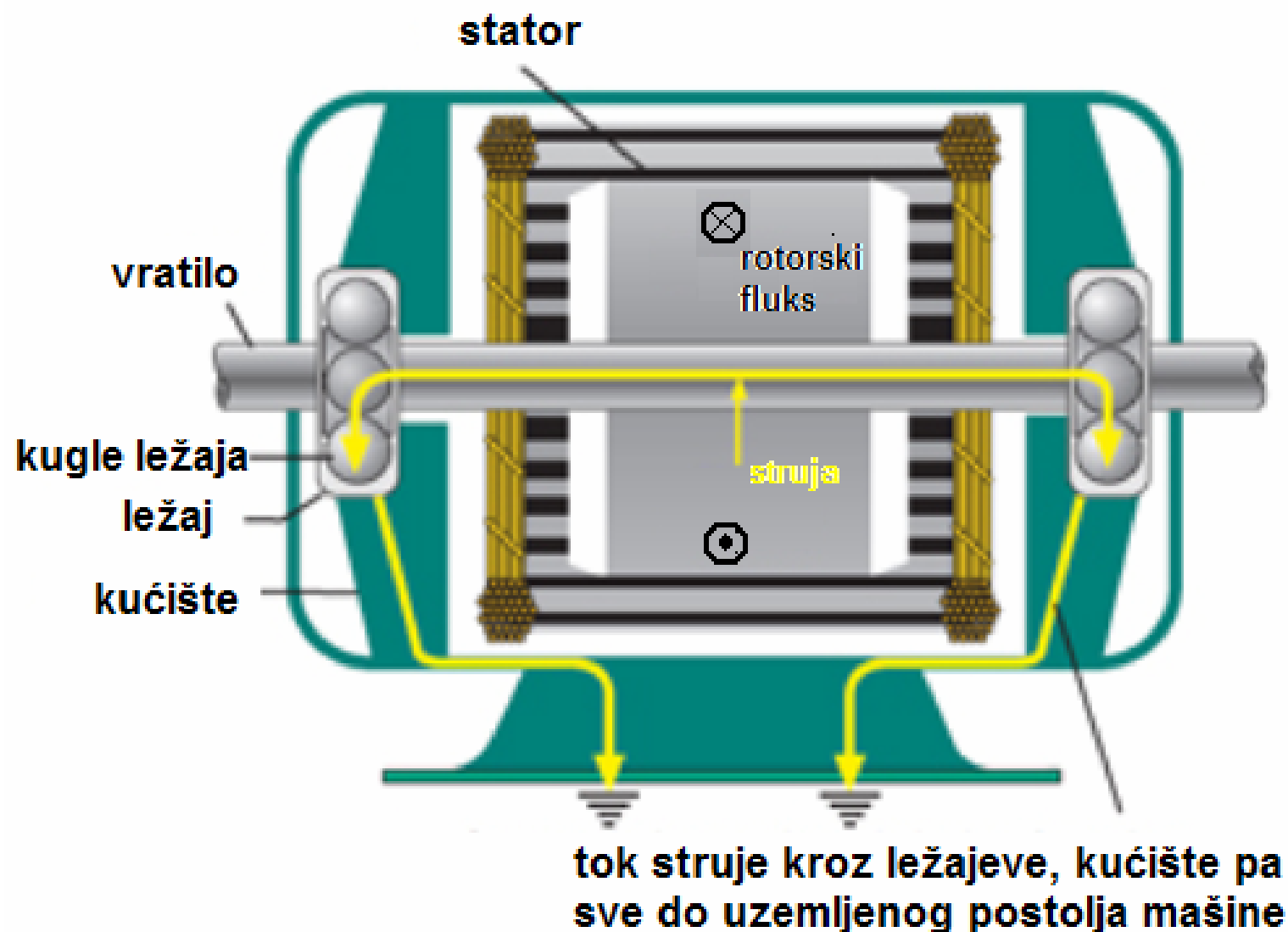
Koji instrument je povoljnije upotrebiti?
Šta kada je učestnost rotora veća od 3Hz?

STRUJA U LEŽAJEVIMA I OSOVINI KRATKOSPOJENIH ROTORA



Dve komponente struje koje su polsedice vremenski promenljivih flukseva (statora i rotora) koje obuhvataju osovinu rotora. Statorska komponenta ima učestanost 50Hz, dok je rotorska komponenta značajno manje učestanosti (1-2Hz). Ovo omogućava da se relativno lako detektuje niskofrekventna komponenta, OBZIROM DA KOMPONENTA 50Hz NE MOŽE DA DOVEDE DO OSCILOVANJA INSTRUMENTA!!!!

KOMPONENTA STRUJE U OSOVINI MOTORA KOJA JE POSLEDICA ROTORSKOG FLUKSA KOJI OBUHVATA OSOVINU (VRATILO)



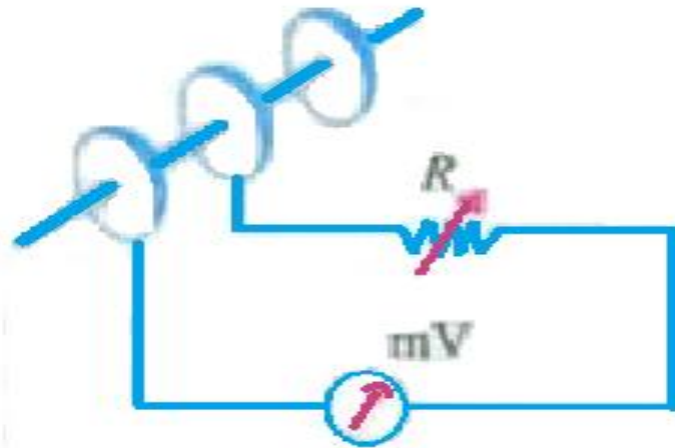
Kako detektovati ovu struju, odnosno razliku potencijala duž vratila mašine?

MERENJE KLIZANJA POMOĆU MILIVOLTMETRA I ČETKICA

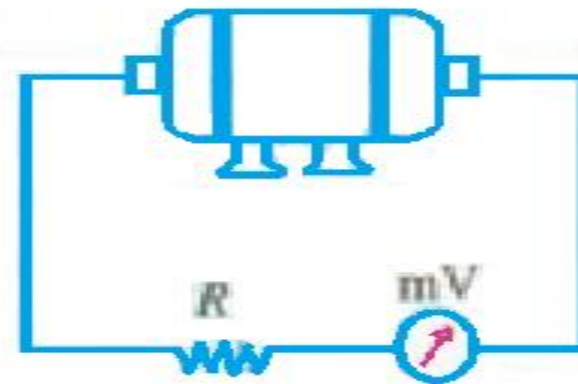
- Milivoltmetar se priključi na preko dve četkice na krajeve vratila ako su krajevi vratila pristupačni (nije baš uvek slučaj)
- Milivoltmetar je sa pokretnim kalemom
- Klizanje se računa kao u prethodnom slučaju
- Suština metoda: činjenica je da jedan deo rotorskog fluksa prolazi i kroz vratilo i indukuje u njemu EMS i vrtložne struje rotorske učestanosti



MERENJE KLIZANJA KORIŠĆENJEM MILIVOLTMETRA



merenje sa milivoltmetrom (mV)
na kliznim prstenovima



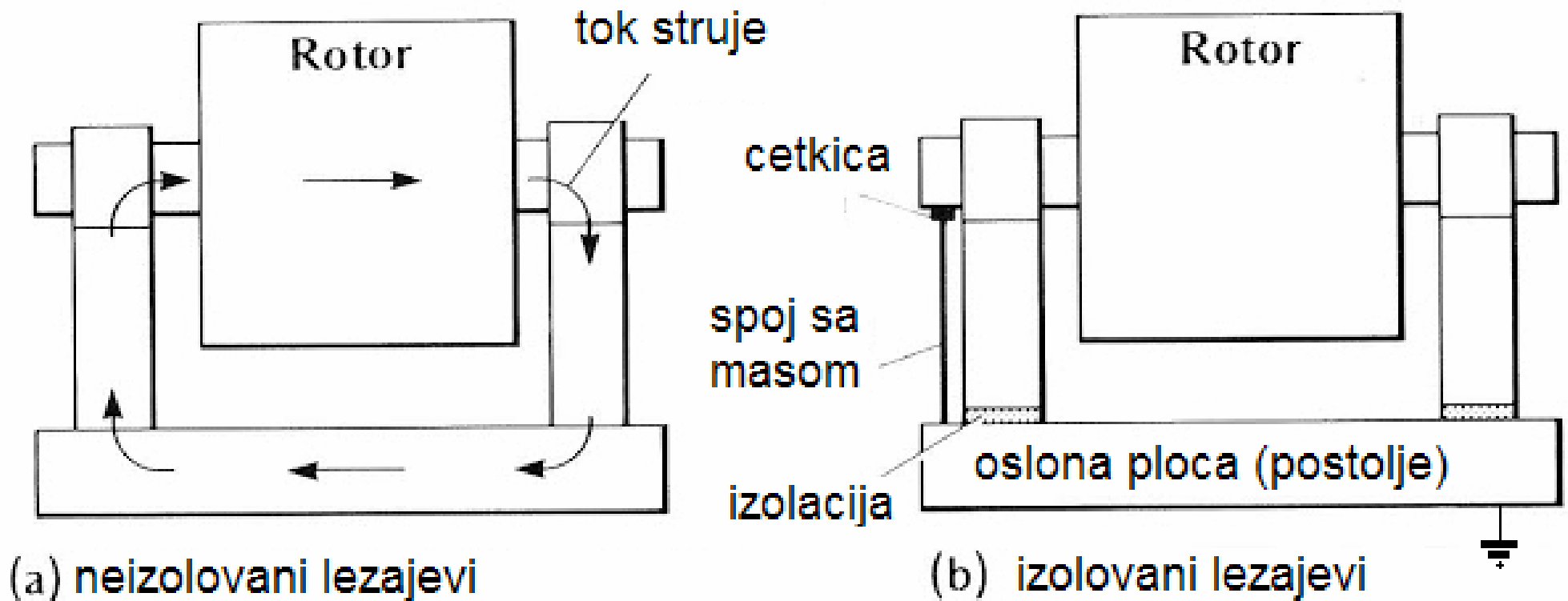
merenje milivoltmetrom (mV)
na krajevima vratila

(vratilo igra ulogu kliznog prstena!!!)

Kada je ova metoda neprimenljiva ?

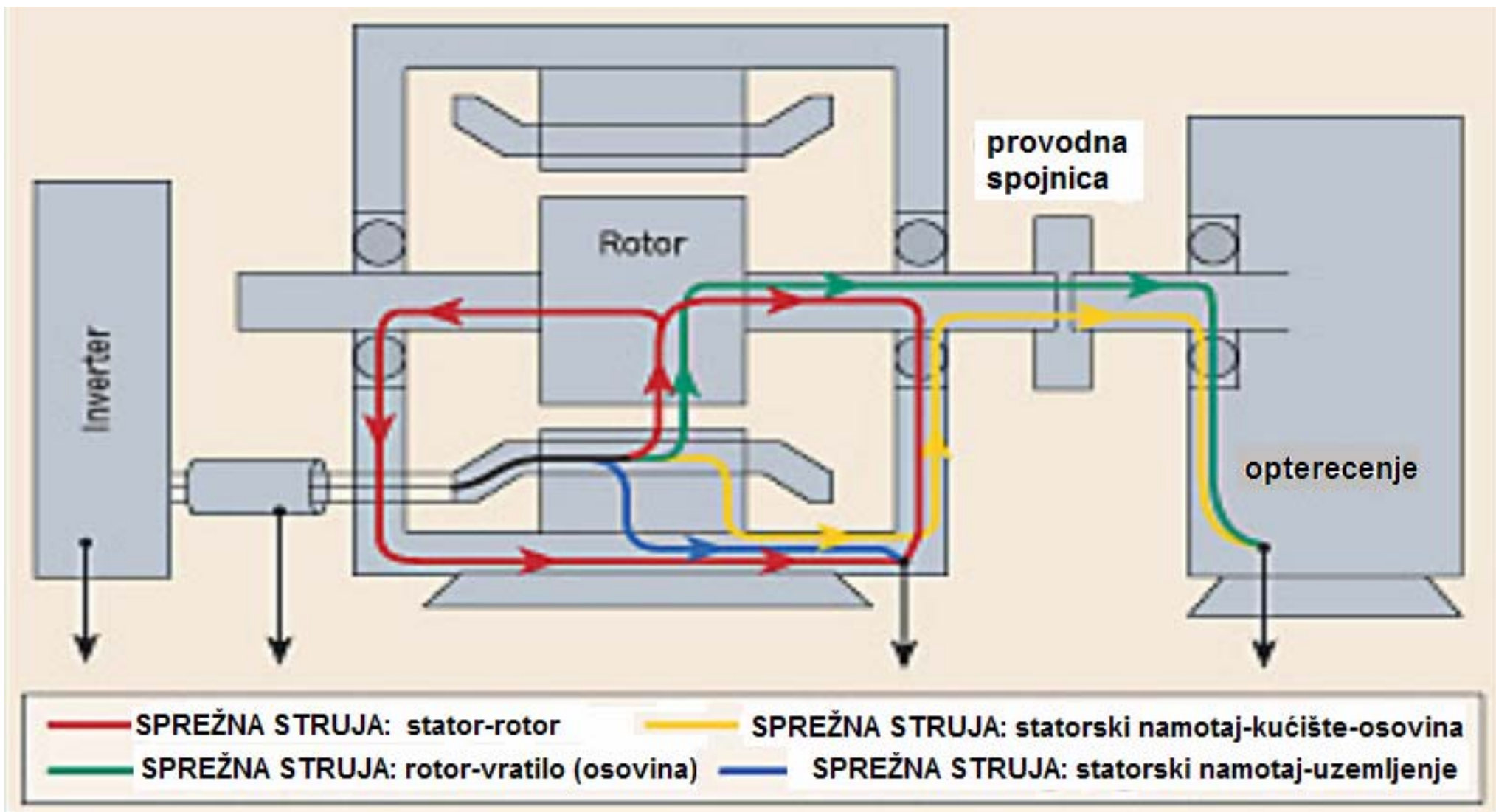
1. Kada vratilo nije na oba kraja pristupačno
2. ?
3. ?

KADA SU LEŽAJEVI IZOLOVANI!!!



U slučaju izolovanih ležajeva nema strujnog toka kroz vratilo, ležajeve i postolje.
U ovom slučaju je nemoguće primeniti prethodnu metodu

SLUČAJ NAPAJANJA MOTORA IZ INVERTORA (četiri karakteristične sprežne struje)

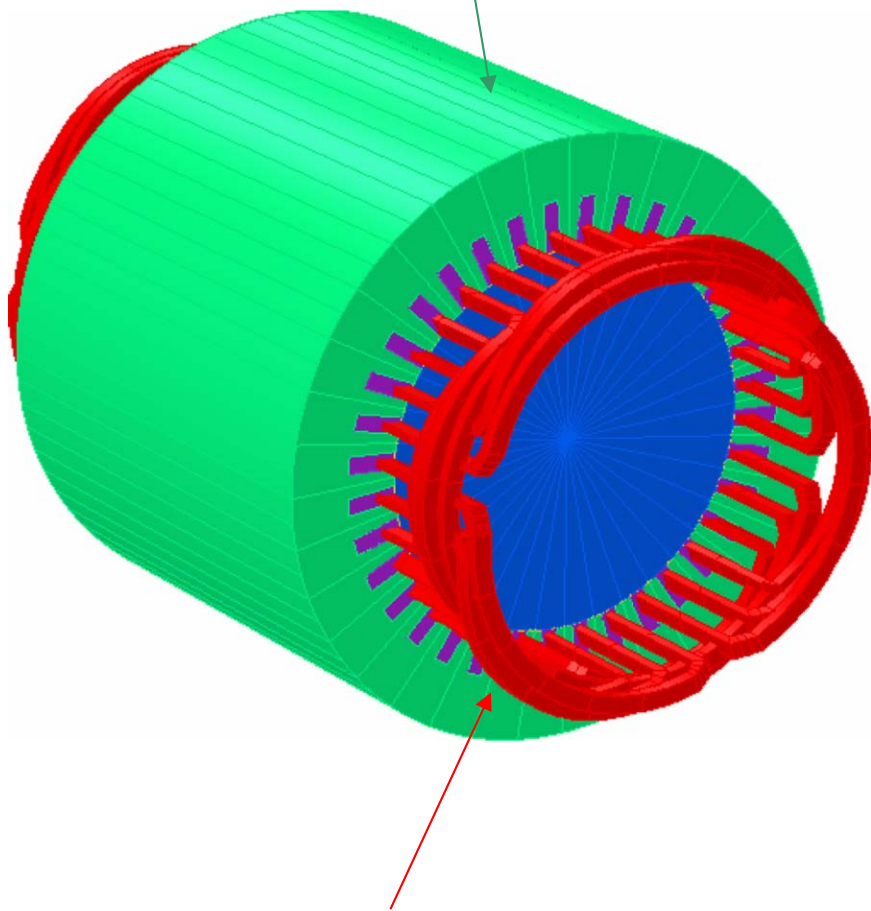


U slučaju naponskih ili strujnih invertora, “common-mode voltage” (CMV) sadrži velike strmine ivica (promena napona) u vremenu. Ima se jako veliki “ dV/dt ” tako da je frekventni sadržaj u MHz opsegu.

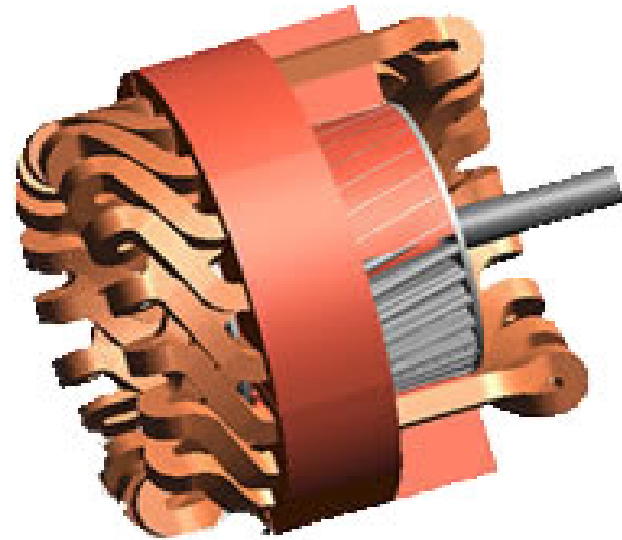
“Common mode” struje (I) su ostvarene kapacitivnom spregom napona CMV, pošto je $I = C \times dV/dt$, gde je “ C ” kapacitivnost pojedinih kola među kojima postoji sprega.

statorsko jezgro

krajevi statorskog
namotaja



statorski namotaj



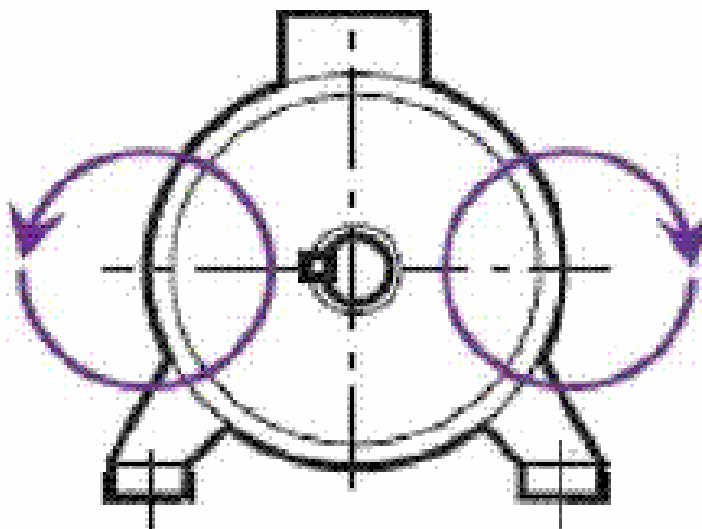
EFEKAT KRAJEVA STATORSKOG NAMOTAJA

- krajevi namotaja su parazitni elementi koji ne doprinose korisnom fluksu
- oni su neminovnost obzirom da je namotaj mašine sačinjen od petlji (bilo da je omčasti ili valoviti)
- ovi krajevi proizvode rasipni fluks koji se zatvara kroz okolni vazduh
- rasipni fluks je ustvari posledica rasipne induktivnosti
- njegova učestanost je 50Hz

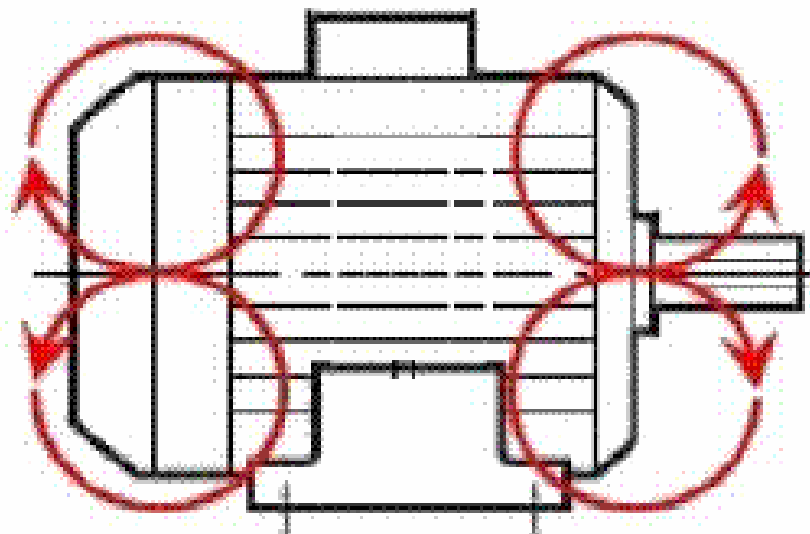
ŠTA JE SA EFEKTOM KRAJEVA ZA ROTOR-
ROTORSKIM RASIPNIM FLUKSOM?

UTICAJ ROTORSKOG RASUTOG FLIKSA

Radijalno rasuto polje

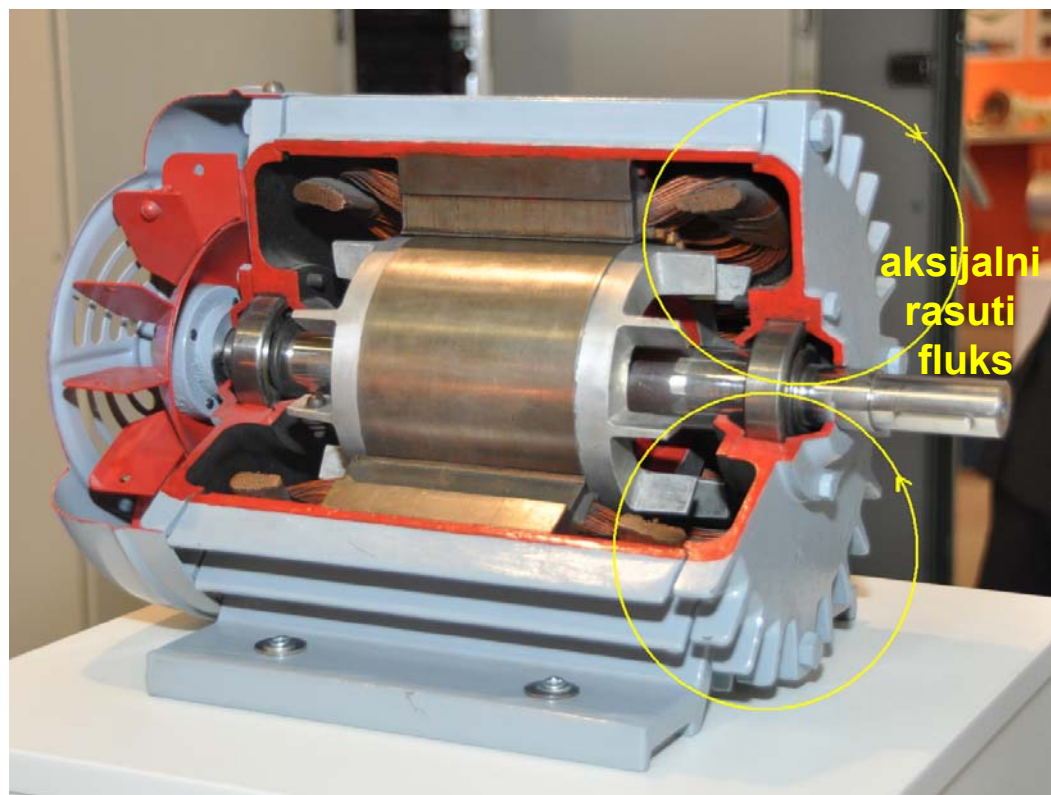


Aksijalno rasuto polje



Pored statorskog fluksa u prostoru oko motora postoji i rotorski fluks. Kao i u slučaju statorskog rasipnog fluksa, rotorski rasipni fluks ima dve komponente **RADIJALNU** i **AKSIJALNU**. To ustvari znači da postoje dve komponente i rasutog polja rotora. Treba napomenuti da je učestanost ovog polja veoma mala i da se ona lako detektuje sa instrumentom sa kretnim kalemom. Komponente 50Hz se detektuju specijalnim magnetnim senzorima koji imaju veći propusni opseg (min 10kHz).

EFEKAT AKSIJALNE KOMPONENTE ROTORSKOG RASIPNOG FLUKSA

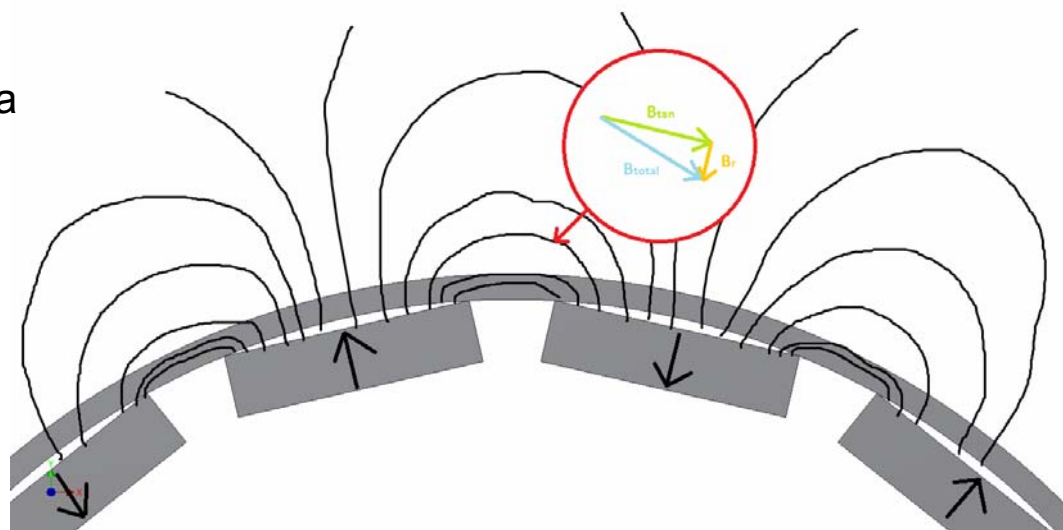


- Veoma je interesantna aksijalna Komponenta rasipnog fluksa rotora
- U ovom slučaju efekat krajeva je vezan za osovinu rotora kroz koju se zatvara rotorski rasipni fluks
- Za razliku od statora njegova učestanost je značajno manja i iznosi ($f_r=1-2\text{Hz}$)
- vremenska konstanta $T=0.5\text{s}-1\text{s}$
- vreme za detekciju pojave je prihvatljivo

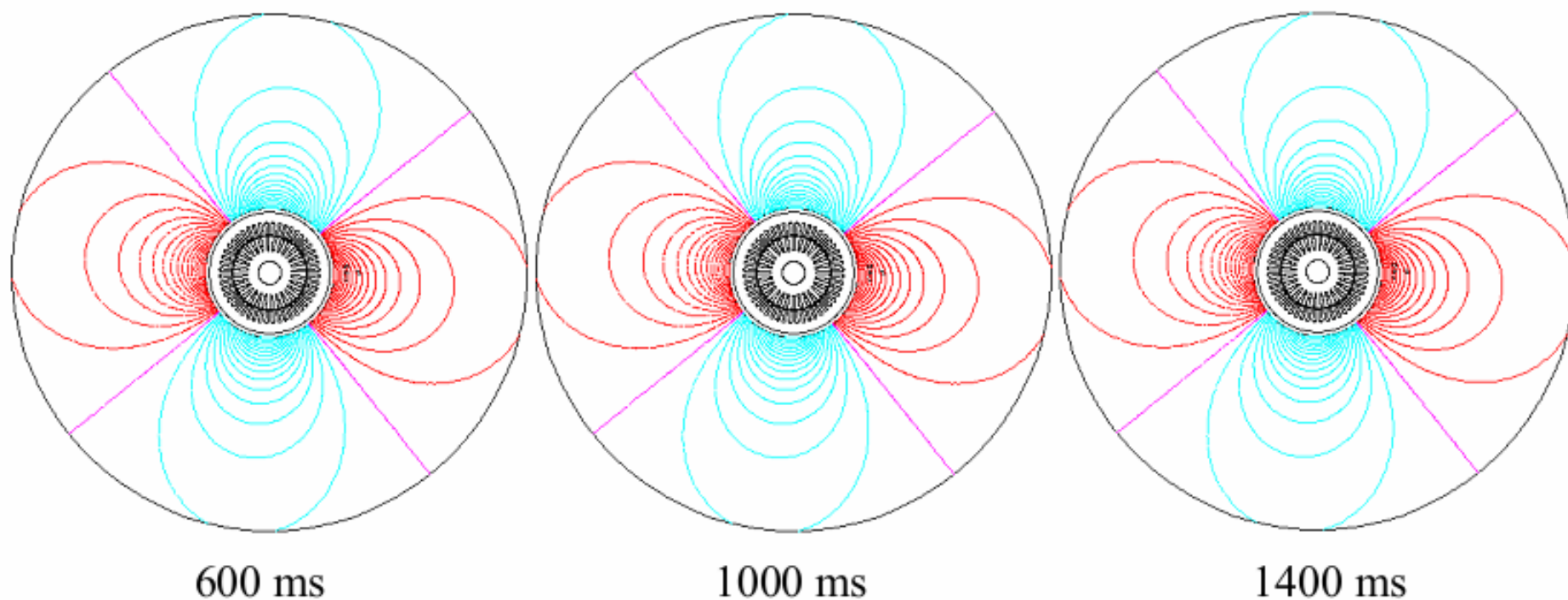
Rasipni fluks se svojim delom (žuti trag) zatvara i kroz okolni vazduh

Obzirom da mu je učestanost značajno manja od statorske, postoji mogućnost da se on relativno lako detektuje!!!

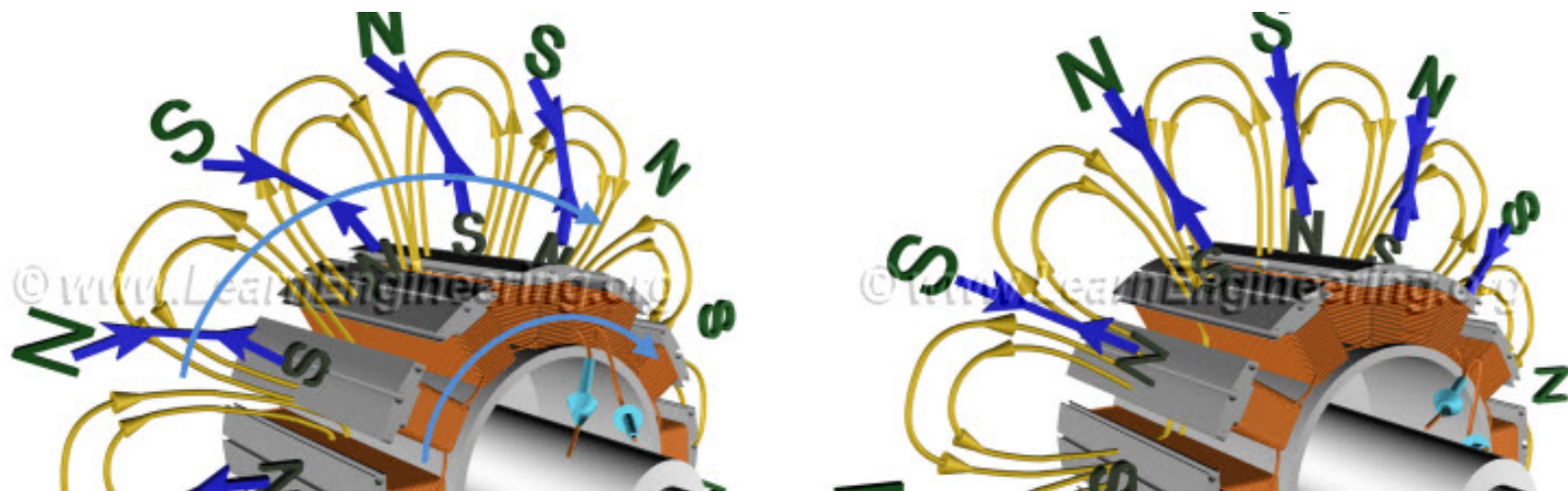
detekcija fluksa



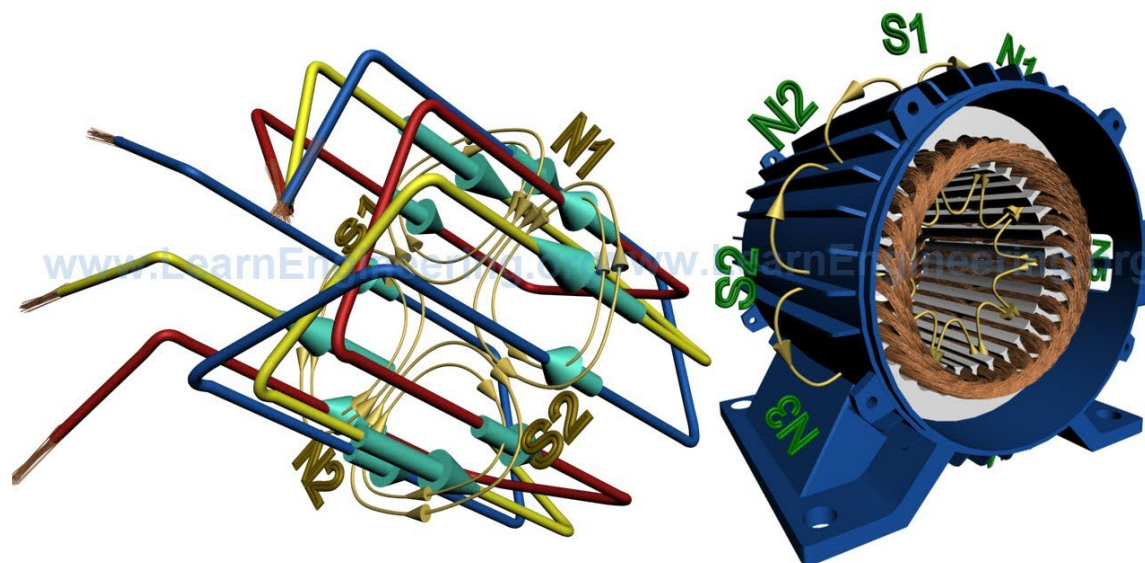
LINIJE MAGNETNOG POLJA INDUKCIONOG MOTORA



Linije magnetnog polja ispravnog motora dobijene za dvostruku period rotorskih struja od 0.8s



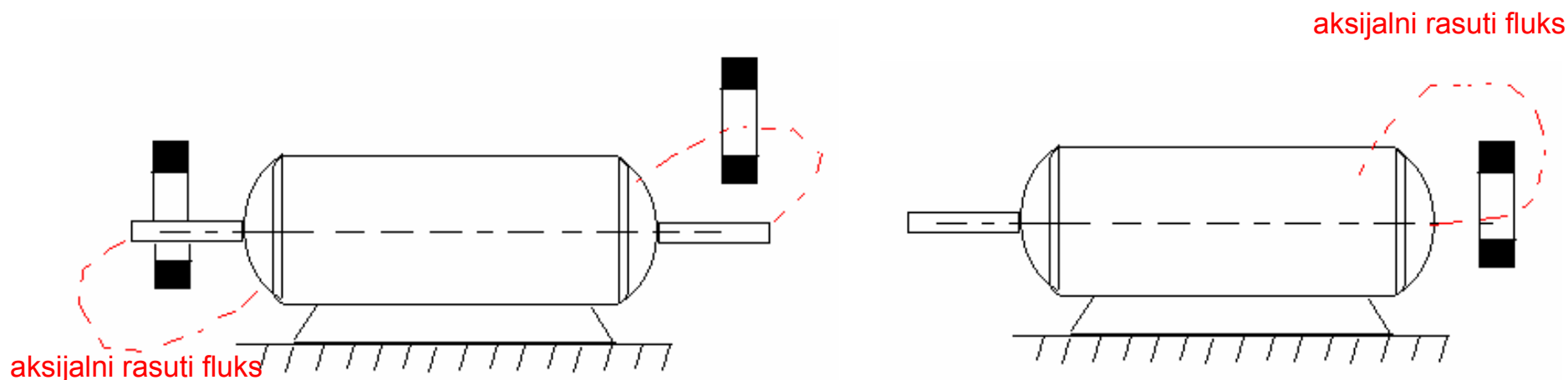
MAGNETNO POLJE U OKOLINI STATORA



MAGNETNO POLJE U OKOLINI KUĆIŠTA ASINHRONE MAŠINE

MERENJE KLIZANJA POMOĆU MILIVOLTMETRA I KALEMA

- U indukcionom kalemu sa ili bez jezgra od limova stavljenog u blizinu vratila javlja se usled rasutog aksijalnog fluksa rotora, elektromotorna sila (EMS) rotorske učestanosti koja se može meriti pomoću milivoltmetra sa kretnim kalemom



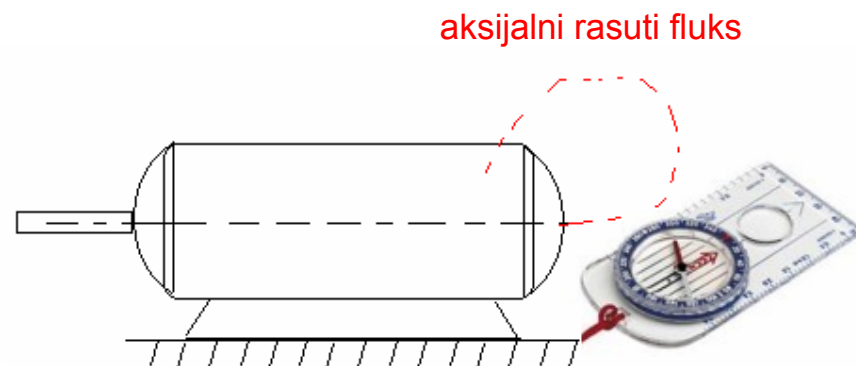
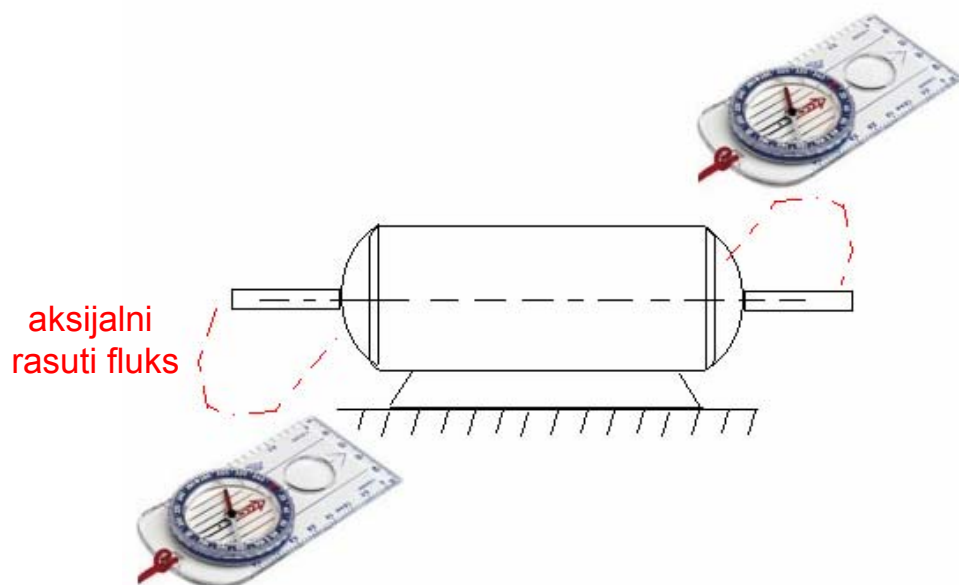
U prostoru van motora postoji i komponenta fluksa statorske učestanosti (50Hz) ali on ne može da dovede do oscilovanja instrumenta!!!!

Nema pravila gde postaviti indukcion kalem!! Pravilo je: probati i ostaviti u onom položaju u kome kazaljka instrumenta najbolje skreće

Vrlo često se umesto kaleme koristi magnetna igla (magnetni kompas)!!!!

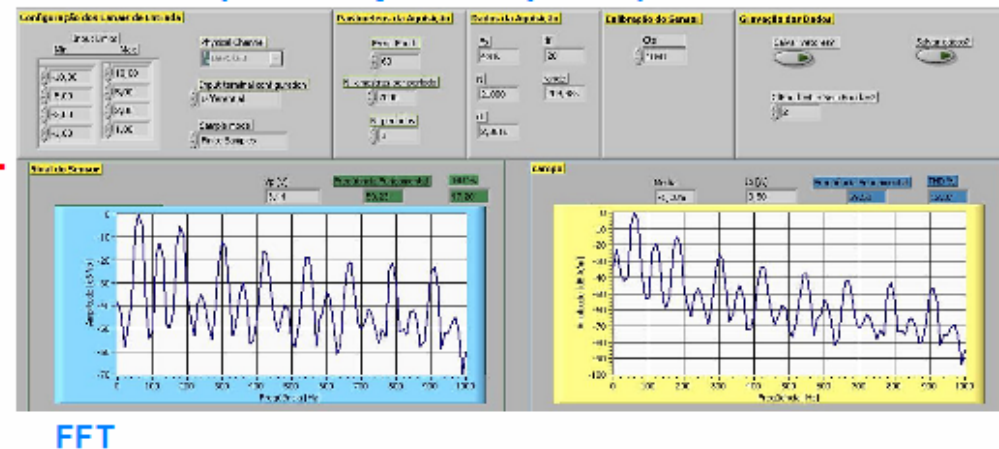
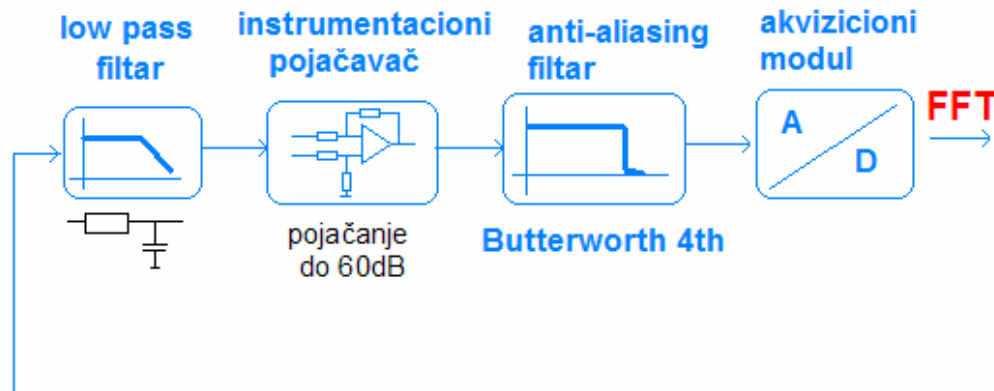
MERENJE KLIZANJA POMOĆU MAGNETNE IGLE

- Igla kompasa postavljenog u blizinu vratila odnosno bočnih veza mašine skreće tako da su upadljiva oscilovanja niske učestanosti.
- U nekim slučajevima se može ostvariti i trajno obrtanje magnetne igle brzinom klizanja



MERNO-AKVIZICIONO KOLO sa FFT za DOBIJANJE SPEKTRA RASIPNOG MAGNETNOG FLUKSA ASINHRONE MAŠINE

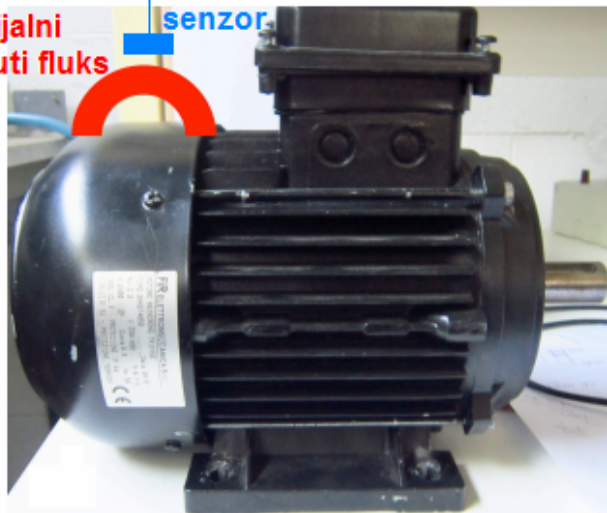
Lab VIEW (računanje FFT i prikaz)



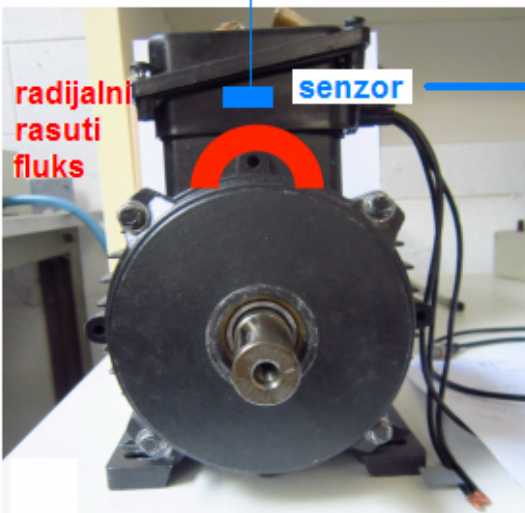
induktivnost senzora $L \sim 10\text{mH}$

aksijalni rasuti fluks

senzor



DETEKCIJA AKSIJALNOG RASUTOG FLUKSA

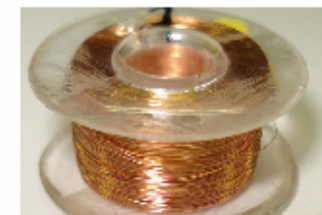


radijalni rasuti fluks

senzor

DETEKCIJA RADIJALNOG RASUTOG FLUKSA

indukcioni namotaj koji se namešta u najpovoljniji položaj tzv. SEARCH COIL

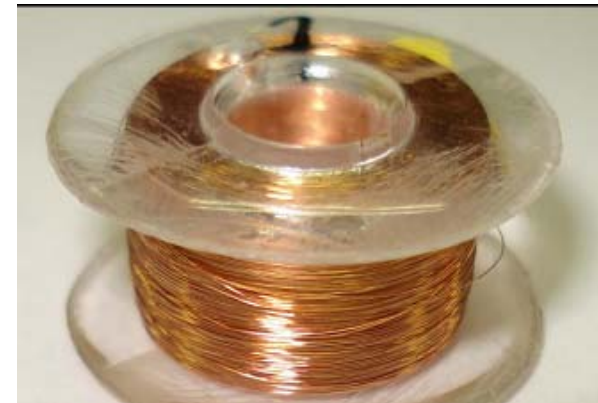


Značajne informacije o mašini se mogu dobiti iz rasipnog polja (fluksa) mašine, radijalnog ili aksijalnog!!
Jedna od veličina je i klizanje!!

INDUKCIONI NAMOTAJ (engl. search coil)

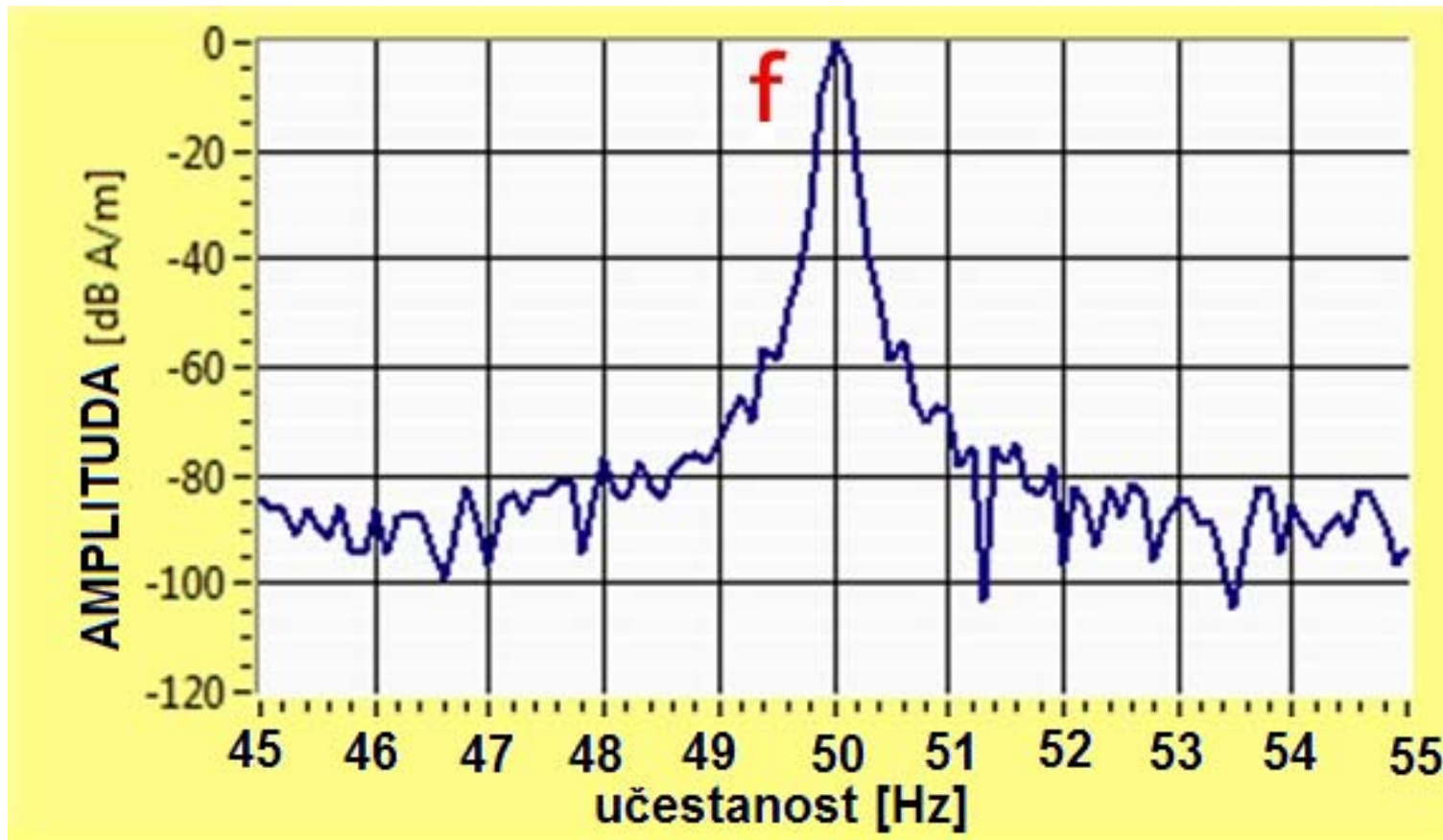
Ovaj namotaj se pomera i traži se najpovoljniji položaj gde bi se najbolje detektovao rasipni fluks motora (aksijalni ili radijalni). Stoga se ovaj namotaj naziva pretražni ili tzv. SEARCH COIL. To je ustvari senzor magnetnog polja koji se sastoji od veoma velikog broja namotaja (tipično 1000-1500) tanke žice na plastičnom kalemu, srednja površine preseka A_B . Eksterno magnetno polje $H(t)$ se dobija iz relacije:

$$H(t) = \frac{1}{NA_B\mu_0} \int_T v(t) dt$$



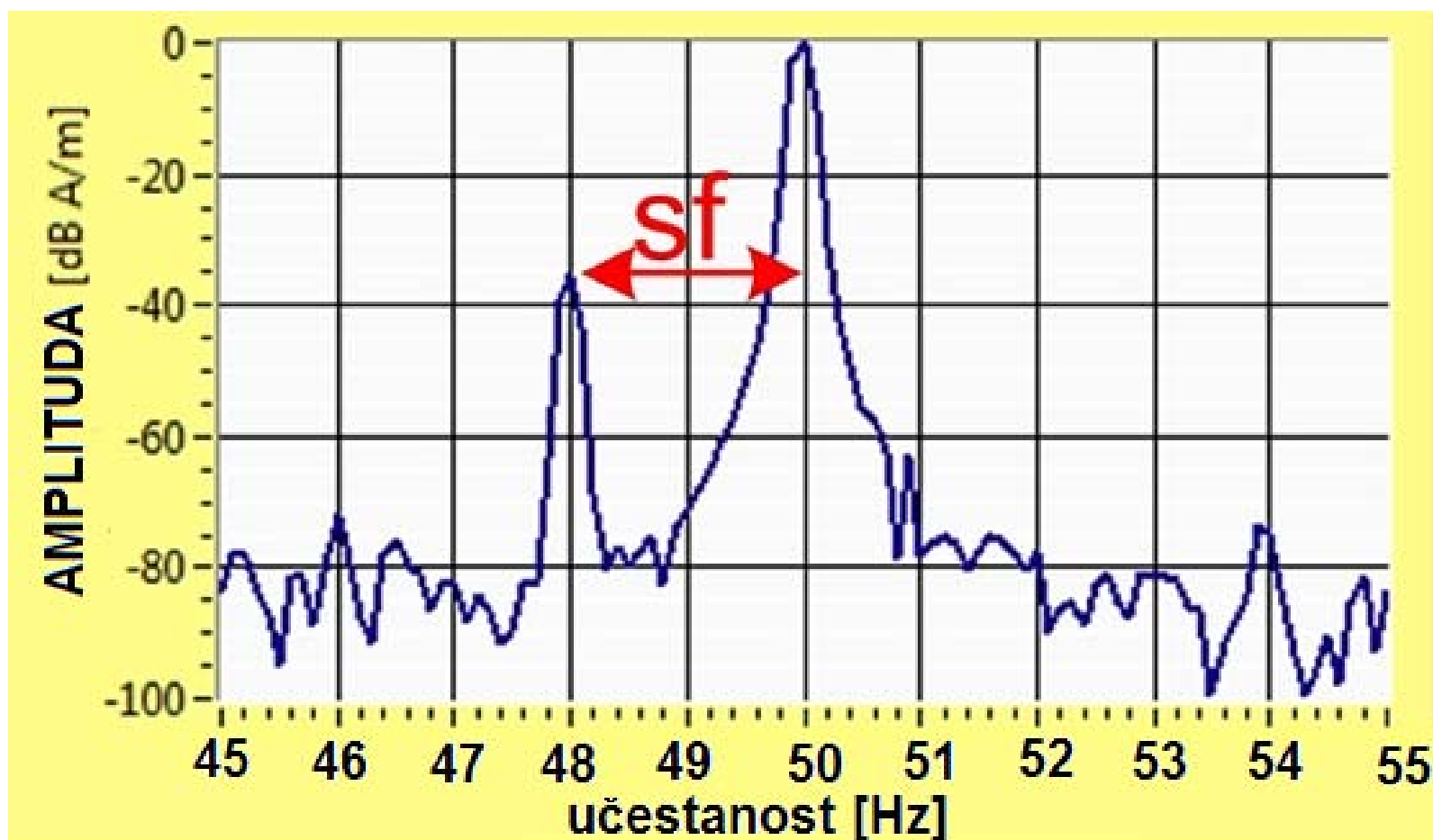
- $v(t)$ je indukovani napon na krajevima kalema, N je broj namotaja, μ_0 je magnetna permeabilnost vazduha
- Pri prethodnim uslovima i vrednostima induktivnost senzora se kreće od 10-15mH.
- Pojačanje senzora $NA_B\mu_0$ je kalibrisano dugačkim solenoidom proizvodeći poznato i prilično tačno magnetno polje

Analiza rasipnog magnetnog polja rotora posredstvom FFT: motor u praznom hodu



Spektralna raspodela magnetnog polja asinhronog motora koji radi neopterećen (prazan hod) za slučaj normalnog i simetričnog rotora. U frekventnom opsegu od interesa (45-55Hz) nema drugih komponenti harmonika osim osnovne čija je učestanost 50Hz.

Analiza rasipnog magnetnog polja rotora posredstvom FFT: motor opterećen



Kada je na osovini priključeno mehaničko opterećenje (nominalni uslovi) u spektru se pored komponente 50Hz, pojavljuje komponenta učestanosti $(1-s)f$ koja je posledica rasipnog fluksa usled rotorskih struja. Kao što je rečeno u spektru se pojavljuju obe komponente. **Jasno je sa snimka da je učestanost klizanja 2Hz, a to drugim rečima znači da je samo klizanje jednako: $50-48/50=0.04$, odnosno 4%.**

MERENJE KLIZANJA PO STROBOSKOPSKOJ METODI

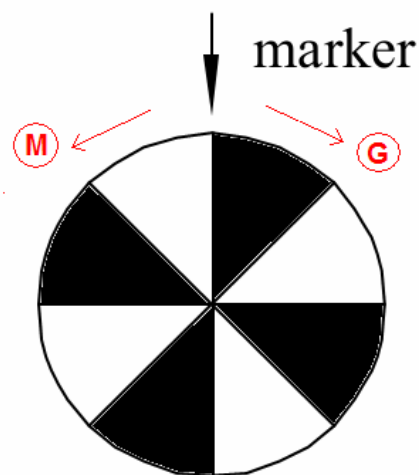
- Ovu metodu ne treba mešati sa merenjem brzine pomoću stroboskopa
- **Pribor za merenje:** lampa priključena na statorsku mrežu koja daje impulsnu svetlost dvostruke statorske učestanosti (perioda osvetljavanja $1/(2f_s)$), stroboskopski krug na vratilu
- Lampa treba da bude sa malom inercijom
- Stroboskopski krug sa onoliko crnih i belih polja (segmenata) koliki je broj polova ($2p=m$) asinhronone mašine
- **PRI OVIM USLOVIMA AKO SE ROTOR VRTI SINHRONOM BRZINOM JEDAN CRNI ISEČAK ĆE DOĆI NA MESTO SLEDEĆEG ZA VREME KOJE ODGOVARA JENOM m-tom DELU OBRTA:**

Za sinhronu brzinu $n_s=f_s/p$ (ob/s) trajanje $1/m$ obrta (izraženo u sekundama) je:

$$1/(m \cdot n_s) = p/(f_s \cdot m) = 1/(2f_s) = 1/100 \text{ s}$$

odnosno jednako vremenu između dva osvetljaja stroboskopskog kruga

Posmatrač dakle stiže utisak da stroboskopski krug stoji ako je brzina sinhrona. Ako bi brzina bila nešto manja krug bi se prividno obrtao unazad (M) , a ukoliko bi bila nešto veća, unapred (G).



$$\begin{matrix} m=4 \\ p=2 \end{matrix}$$

M-motorni režim
G-generatorski režim

Merenjem broja isečaka M iste boje koji za vreme t prođu pored utvrđenog markera meri se ustvari klizanje:

$$n_s - n = \frac{M}{m t} \quad [\text{ob/s}]$$

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{M p}{f_s t m} = \frac{M}{2 f_s t}$$

Ako je $f_s = 50 \text{ Hz}$

$s\% = M / t$

- Opisanim postupkom se mogu meriti klizanja najviše 2-3% (motori velikih snaga)
- Kod motora manjih snaga (nominalna klizanja su veća) ovaj postupak se ne može primeniti!!!
- U ovim slučajevima je moguće upotrebiti lampu koja ima jedan osvetljaj u periodi i stroboskopski krug sa $m=p$ segmenata (crnih i belih) tako da će klizanje u tom slučaju iznositi:

$$s\% = 2M / t$$

Na ovaj način se opseg proširuje na 4-6%, obzirom na mogućnost brojanja 2-3 isečka u sekundi

Veoma interesantna metoda merenja klizanja bazirana na metodi merenja odnosa statorsche i rotorske učestanosti (*Andrew Baghurst, CalTest, Port Elliot, South Australia EMSA Workshop, Zurich 2012*)

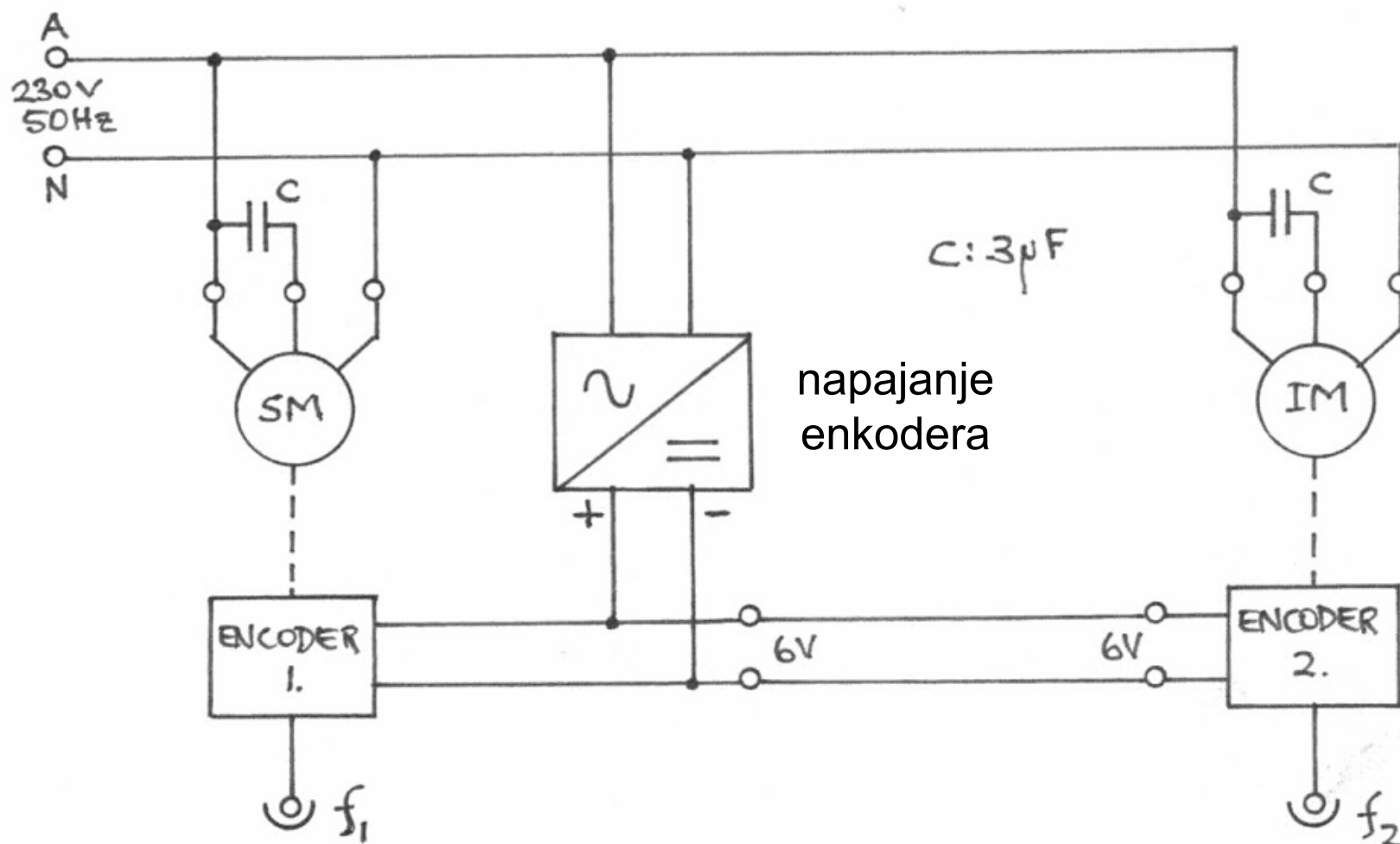
METODA MERENJA KLIZANJA BAZIRANA NA MERENJU ODNOSA UČESTANOSTI

Ključna komponenta:

4 polni sinhroni motor
sinhronizovan sa mrežom

* određuje referentnu vrednost

Metoda koristi jedan sinhroni motor
i jedan asinhroni motor, kao i dva enkodera



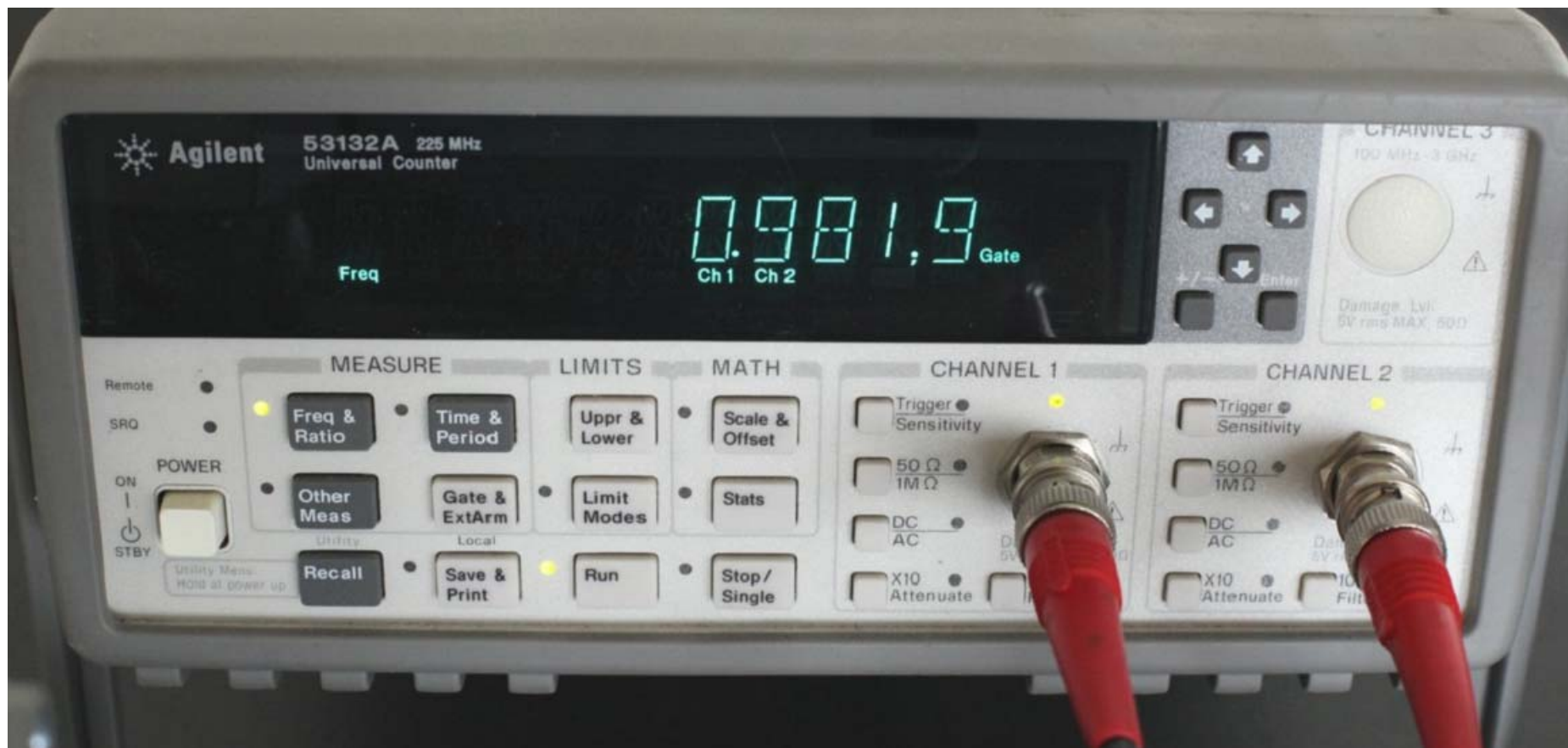
REFERENTNI GENERATOR FREKVENCije f_1 je ustvari SINHRONI MOTOR



KOMPLETAN MERNI SISTEM



DVOKANALNI MERAČ KOJI PRIKAZUJE ODNOS UČESTANOSTI $k = f_1/f_2$



Klizanje se izračunava kao : $s = 1 - k$, $s = 1 - 0.9819 = 0.0191 = 1.91\%$

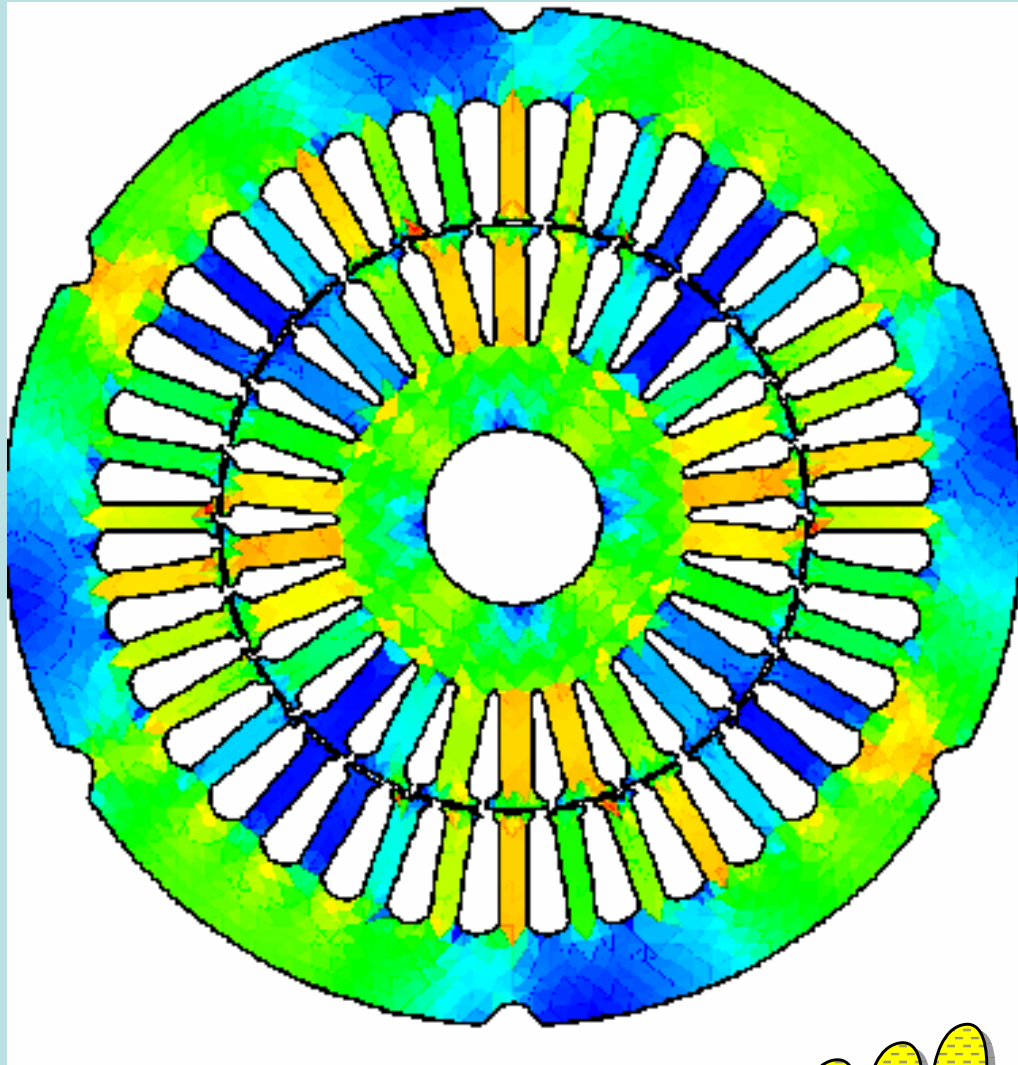
ZADACI ZA AUDITORNE VEŽBE:

1. Momenat četvoropolnog ($2p=4$) asinhronog motora u praznom hodu iznosi 1% od momenta pri nominalnom opterećenju. Ako je nominalno klizanje 2%, potrebno je odrediti:
 - (a) Klizanje i brzinu u praznom hodu
 - (b) Vreme potrebno da stroboskopski krug prividno napravi jedan obrt pri nominalnom opterećenju i u praznom hodu
2. Za merenje klizanja asinhronog motora sa namotanim rotorom se koristi voltmetar sa (a) kretnim kalemom i (b) sa mekim gvožđem. Pri merenju je u intervalu od 3s izmeren broj skretanja u slučajevima pod (a) 3 skretanja i (b) 6 skretanja. Kolika je vrednost izmerenog klizanja u %.
3. Asinhroni četvoropolni motor se napaja iz frekventnog regulatora. Moment opterećenja je konstantan i iznosi 50% od nominalnog momenta. Pri učestanosti od 50Hz je izmereno 4 skretanja za 3 s, instrumentom sa mekim gvožđem. Odrediti klizanje u ovom slučaju. Ukoliko se frekventnim regulatorom podesi učestanost od 31.25Hz, koliko se napravi skretanja mernog instrumenta za isti interval vremena.
4. Dvopolni trofazni asinhroni motor sprege Y se napaja naponom 380V, 50Hz. Ekvivalentna otpornost rotora po fazi je 0.11Ω . Razvijeni momenat je 30Nm. Odrediti brzinu obrtanja i klizanje motora.

REFERENTNA LITERATURA:

- Miloš Petrović, ***Ispitivanje električnih mašina***, Naučna knjiga, Beograd 1988.
Stray Load Losses in Induction Machines
- H.Kofler, ***A Review of experimental measuring Methods and a critical Performance Evaluation*** , Institut für Elektrische Maschinen und Antriebstechnik, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Technische Universität Graz Kopernikusgasse 24 – , 8010 Graz (Austria)
- IEEE Std 112, IEEE ***Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators***, 2004
- Andrew Baghurst, CalTest, Port Elliot, South Australia , ***Measurement of Induction Machine Slip***, EMSA Workshop, Zurich 2012.
- M. Rigoni, N. Sadowski*, N. J. Batistela, J.P.A.Bastos, ***Detection and Analysis of Rotor Faults in Induction Motors by the Measurement of the Stray Magnetic Flux***
Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications,
Vol. 11, No. 1, June 2012

H
V
A
L
A
N
A
P
A
Ń
N
J
U
!



PITANJA ???

Beograd, Decembar 2015