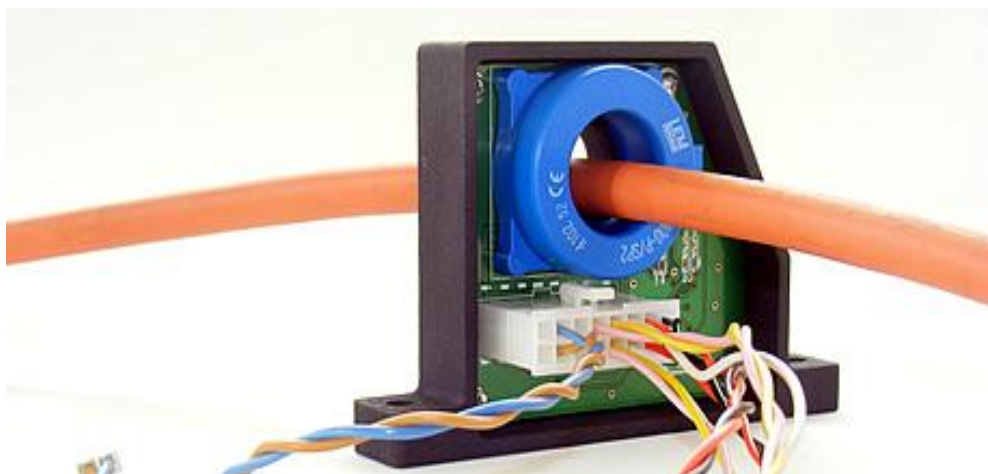




Visoka škola elektrotehike i računarstva
strukovnih studija- Beograd, 2018/2019
Master studije ELIN

Projektovanje
Elektro
Energetskih
Pretvarača

TEHNIKE I METODE MERENJA STRUJE I NAPONA SA ASPEKTA PROJEKTOVANJA ELEKTROENERGETSKIH PRETVARAČA



Predmetni profesor: Dr Željko Despotović, dipl.el.inž

UVOD

- Merenje napona i struje imaju veliki značaj u monitoringu i dijagnostici električnih mašina i transformatora, ali i u regulisanim elektromotornim pogonima
- Takođe ova merenja predstavljaju osnov za merenje snage (aktivne, reaktivne i prividne) električnih mašina
- Ova merenja se pored monitoringa i ispitivanja električnih mašina koriste i radi ostvarivanja nekoliko veoma bitnih funkcija: zaštita, upravljanje, regulacija snage i sl.
- Veoma bitno je imati visoke performanse strujnih i naponskih merenja, odnosno mernih uređaja i senzora, kako bi se ostvarile prethodno pomenute funkcije
- Koji su to najbitniji parametri koje merni sistem ili merni uređaj mora imati, a koje utiču na povećanje njegovih performansi?

NAJZNAČAJNIJI PARAMETRI MERNIH UREĐAJA

- Tačnost
- Cena
- Opseg struje ili napona (poželjno je da bude što veći)
- Izolacija od energetskeg kola
- Linearnost
- Stabilnost (naročito temperaturna)
- Otpornost na tranzijente (dv/dt)
- Veliku brzinu odziva
- Kompatibilnost sa ostatkom kola u koje se ugrađuju

TIPOVI MERNIH INSTRUMENATA

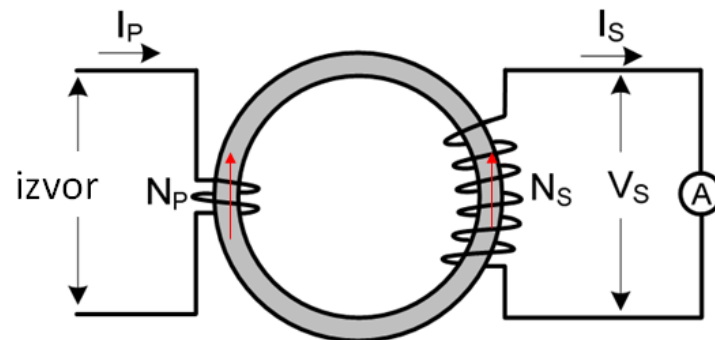
- Za merenje struje i napona se koriste, prema principu rada, mehanički i elektronski merni instrumenti, a prema načinu prikazivanja analogni i digitalni instrumenti.
- Danas su primeni uglavnom elektronski, digitalni instrumenti, mada u laboratorijskim primenama prevlađuju mehanički, analogni instrumenti.
- Za merenje jednosmernih veličina obično se koriste mehanički instrumenti sa "kretnim kalemom", čije je pokazivanje proporcionalno sa srednjom vrednošću merene veličine, a skala im je praktično linearna.
- Za merenje naizmeničnih veličina obično koriste mehanički instrumenti sa "mekim gvožđem", čije je pokazivanje proporcionalno sa efektivnom vrednošću merene veličine, a skala im je u osnovi nelinearna.
- Instrumenti sa kretnim kalemom imaju preko deset puta manju potrošnju i obično veću tačnost, u odnosu na instrumente sa mekim gvožđem.

MERNI TRANSFORMATORI

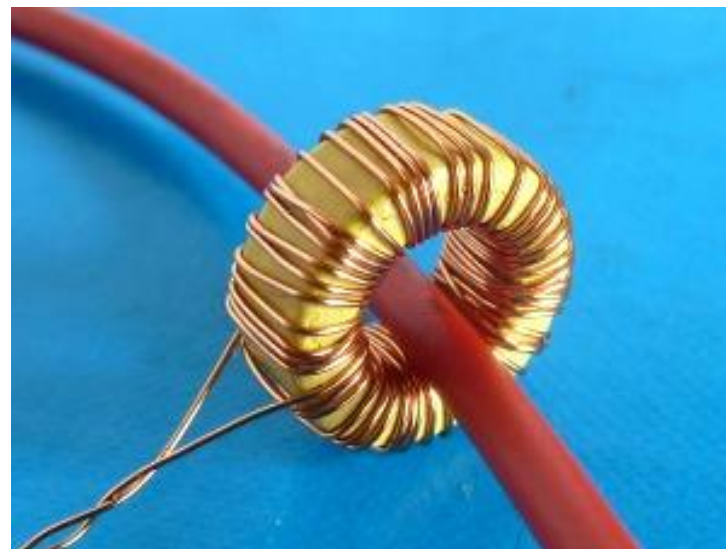
- U ovom predavanju neće biti posebno reči o merenjima relativno malih struja i napona, koje se mogu izvesti standardnim instrumentima (ampermetrima i voltmetrima) neposredno uključenim umerno strujno kolo.
- Ova merenja se obično izvode u laboratorijskim uslovima ili eventualno u slučajevima ispitivanja električnih mašina
- Pri većim strujama i naponima (kakve se imaju u monitoringu) direktna merenja struje i napona, postaje nepraktično i teško izvodljivo, pa se tada upotrebljavaju merni šantovi ili merni transformatori.
- **Merni transformatori** smanjuju merene struje i napone na vrednosti koje su podesne za merenje standardnim instrumentima: na nominalne struje od 1A ili 5A i nominalne napone od 100V, 200V, $100\sqrt{3}$ V i $200\sqrt{3}$ V.
- Pored ovoga ovi merni transformatori služe za galvansku izolaciju mernih instrumenata od visokog napona, kao i lica koja rukuju sa ovim instrumentima, i na ovaj način rukovanje njima postaje bezopasno.

STRUJNI MERNI TRANSFORMATORI

- **Strujni merni transformatori** se upotrebljavaju za merenje struja velikih vrednosti na niskom naponu, koje bi inače bilo teško meriti nekom direktnom metodom, kao i za merenje struja relativno malih vrednosti koje se imaju na visokom naponu (primena u relejnoj zaštiti).
- Odnos primarne i sekundarne struje (*konstanta strujnog transformatora K_n*) približno je obrnuto srazmeran odnosu broja primarnih i sekundarnih navojaka.
- Primarni namotaji strujnog transformatora sastoji se od jednog ili nekoliko namotaja relativno velikog poprečnog preseka provodnika, povezanih redno u merno strujno kolo.
- Sekundarni namotaj se sastoji od većeg broja namotaja relativno malog poprečnog preseka provodnika, i priključuje se na merne instrumente sa zanemarljivim unutrašnjim otporom (ampermetri, redni namoti vatmetra, brojila).
- Stoga je radni režim strujnog transformatora je praktično režim kratkog spoja.



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



STANDARDIZOVANE VREDNOSTI PRIMARNIH I SEKUNDARNIH STRUJA

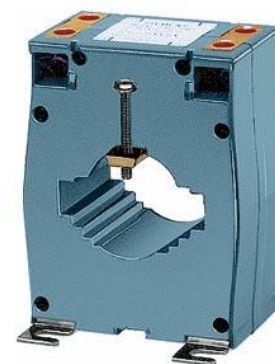
- Nominalna vrednost sekundarne struje je standardizovana i iznosi 5A za strujne transformatore za merenje i 5A ili 1A za strujne transformatore za relejnu zaštitu.
- Nominalna vrednost primarne struje zavisi od mesta primene strujnog transformatora i može da uzima vrednost od 1A do par hiljada ampera.
- Standardizovane vrednosti naznačene primarne struje su 5A, 10A, 15A, 20A, 25A, 30A, 40A, 50A, 60A, 75A i decimalni umnošci navedenih.
- Proizvode se i visokonaponski strujni transformatori čija je vrednost naznačene primarne struje i manja od 5A i to radi odvajanja visokog napona od mernih uređaja.
- **Strujni transformatori se izrađuju za pet klasa tačnosti : 0,2; 0,5; 1; 3 i 10**



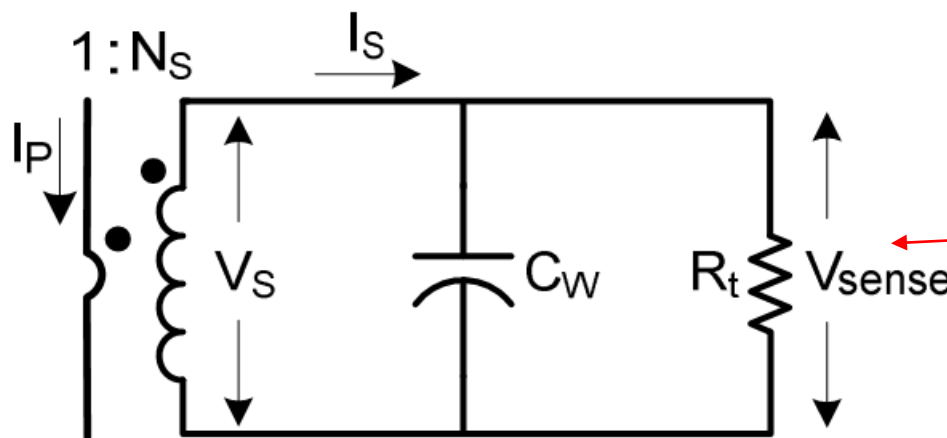
35kV strujni transformator

KONSTRUKCIJE STRUJNIH TRANSFORMATORA

- Strujni transformatori za niski napon su najčešće izvedeni sa izolacijom od epoksidne smole (ponekad i od plastike) i to u vidu tzv. **obuhvatnog transformatora**.
- Sem epoksidne smole sreću se, posebno kod starijih izvedbi, i strujni transformatori sa keramičkom - najčešće porcelanskom - izolacijom.
- Ovi transformatori najčešće nemaju klasičan primarni namotaj već njegovu ulogu vrš provodnik (kakav izolovan kabal il neizolovana šina) koji se provlači kroz san strujni transformator - tj. strjuni transformato ga obuhvata.
- Prednost obuhvatnih strujnih transformatora u odnosu na one sa klasičnim primarnim namotajem jeste jednostavnija montaža i praktično neograničena nazivna dinamička struja.



AKO PRIMAR IMA SAMO JEDAN NAMOTAJ??



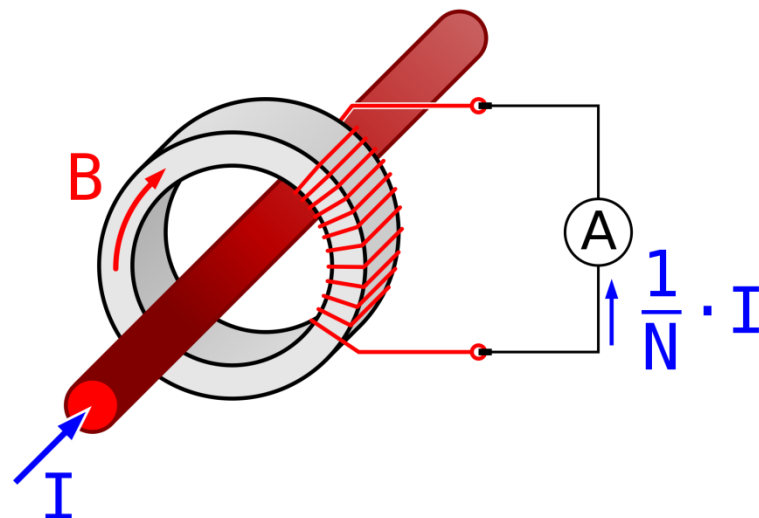
$$\frac{I_S}{I_P} = \frac{1}{N_S}$$

$$V_{sense} = I_S R_t = \frac{I_P}{N_S} R_t$$

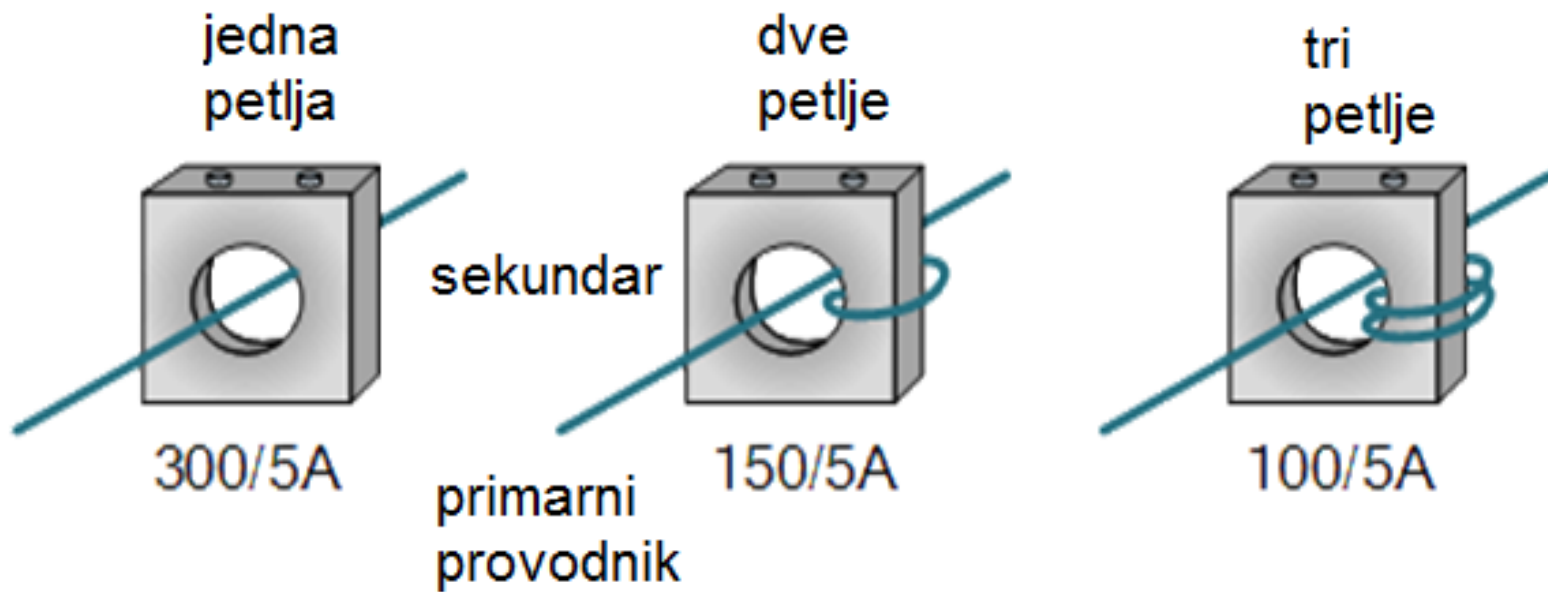
Na primaru imamo samo jedan namotaj
Np=1

Cw- parazitna kapacitivnost namotaja u
sekundaru (obzirom da je Ns veliki,
ova kapacitivnost nije zanemarljiva)

Rt – otpornost koja se namerno stavlja u
sekundar (**sekundar ne sme biti
otvoren tj. u praznom hodu!!!!**)



AKO PRIMAR IMA SAMO JEDAN NAMOTAJ A
TREBA NAM MANJI PRENOSNI ODNOS??



PARAMETRI STRUJNOG TRANSFORMATORA

- nazivni naponski nivo za koji je predviđen
- nazivna frekvencija
- prenosni odnos ili konstanta strujnog transformatora
- nazivna primarna i sekundarna struja
- klasa tačnosti
- prekostrujni broj ili faktor sigurnosti F_s
- nominalna snaga u VA,
- trajna termička struja,
- termička klasa izolacije,
- broj jezgara,
- vrsta osnovne izolacije,
- nazivna kratkotrajno podnosiva termička struja
- nazivna podnosiva dinamička struja.



KLASA TAČNOSTI I GREŠKE STRUJNIH TRANSFORMATORA

- Navedene klase tačnosti (0,2; 0.5; 1; 3 i 10) se odnose na merne transformatore (*drugačija konvencija i obeležavanje važe za transformatore koji se koriste u relejnoj zaštiti*). Greške kod strujnih mernih transformatora se dele na strujne i ugaone.

- Strujna greška predstavlja procentualnu razliku između sekundarne struje pomnožene konstantom strujnog transformatora i primarne struje.

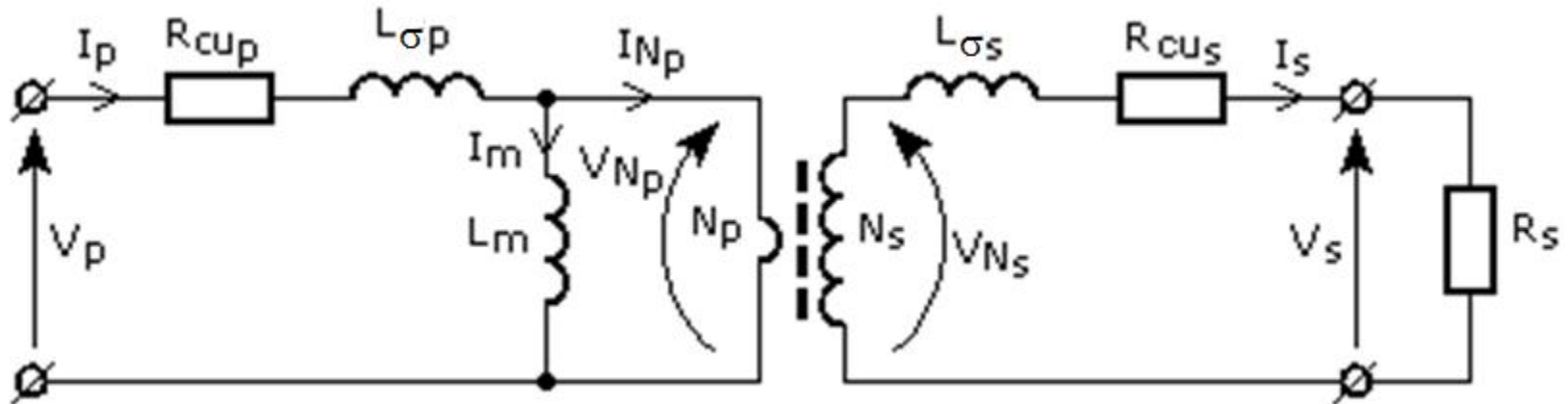
$$p_i [\%] = \frac{K_n I_2 - I_1}{I_1} 100$$

- Po vrednosti ova greška može biti pozitivna i negativna, ali se u principu daje njena apsolutna vrednost.
- Ugaona greška predstavlja razliku faznih uglova primarne i sekundarne struje. *Smatra se da je fazna razlika greška pozitivna ako je vektor sekundarne struje vremenski ispred onog u primarne struje.*
- Klasa tačnosti strujnog transformatora jeste dozvoljena strujna greška pri nominalnoj struji primara.
- *Tako naprimer, kad se kaže da je strujni transformator klase tačnosti 0.5%, to znači da je pri nominalnoj primarnoj struji maksimalno dozvoljena greška od 0.5%.*
- *Ako je pak primarna struja manja od nominalne, ili veća preko 120% nominalne, strujna greška može biti i veća. Tako se npr. za strujni transformator klase tačnosti 0.5 dozvoljava greška od 0.75% ukoliko je struja primara 20% nominalne, i 1% ukoliko je struja primara 10% nominalne.*

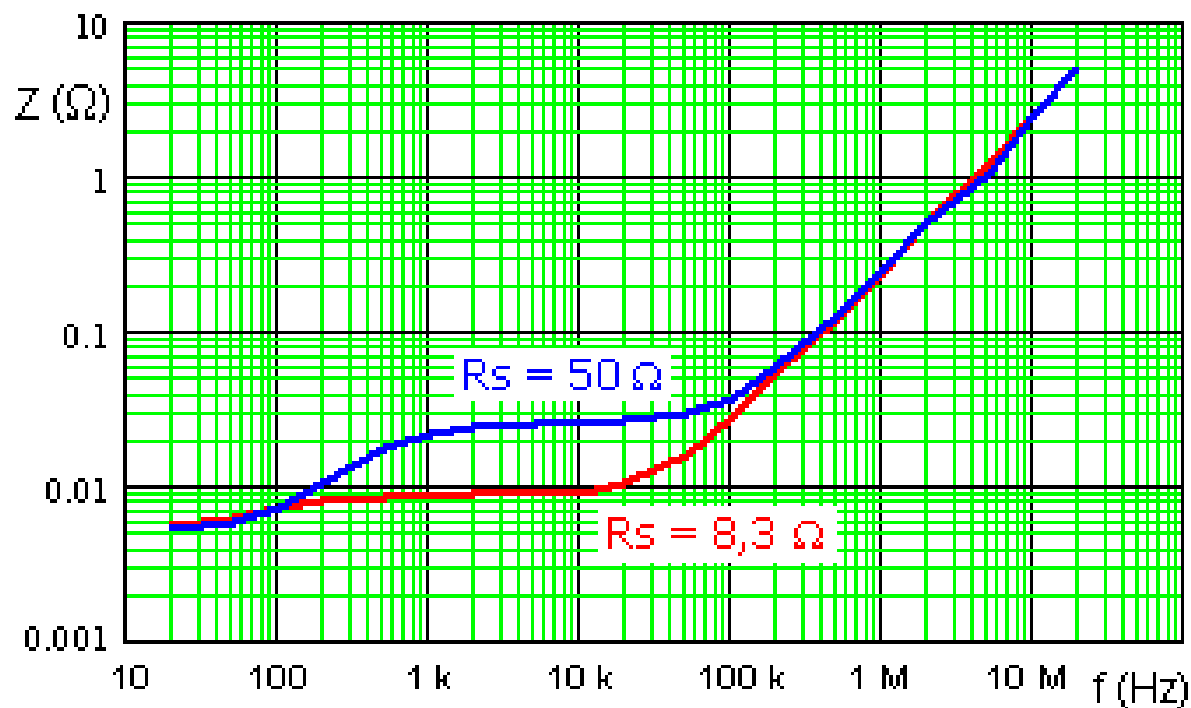
OD ČEGA ZAVISI JOŠ GREŠKA STRUJNIH TRANSFORMATORA?

- Greška strujnog transformatora zavisi i od opterećenja koje stvaraju merni, pokazni instrumenti vezani na sekundaru
- Ukoliko je opterećenje manje od nominalnog (naznačenog na pločici strujnog transformatora), strujna greška može biti i veća od naznačene klase tačnosti.
- Po IEC propisima strujna greška mora biti u granici klase tačnosti za opterećenja na sekundaru od 1/4 do 4/4 nazivne (naznačene) snage strujnog transformatora.
- O ovome treba voditi računa prilikom izbora strujnog transformatora, jer novija digitalna merna i zaštitna oprema ima značajno manju potrošnju i aktivne i reaktivne energije od starije elektromehaničke i elektronske opreme.
- Osim toga tačnost zavisi i od faktora snage opterećenja sekundara i po IEC propisima (ali i VDE) klasa tačnosti važi do $\cos(\phi)=0.8$.

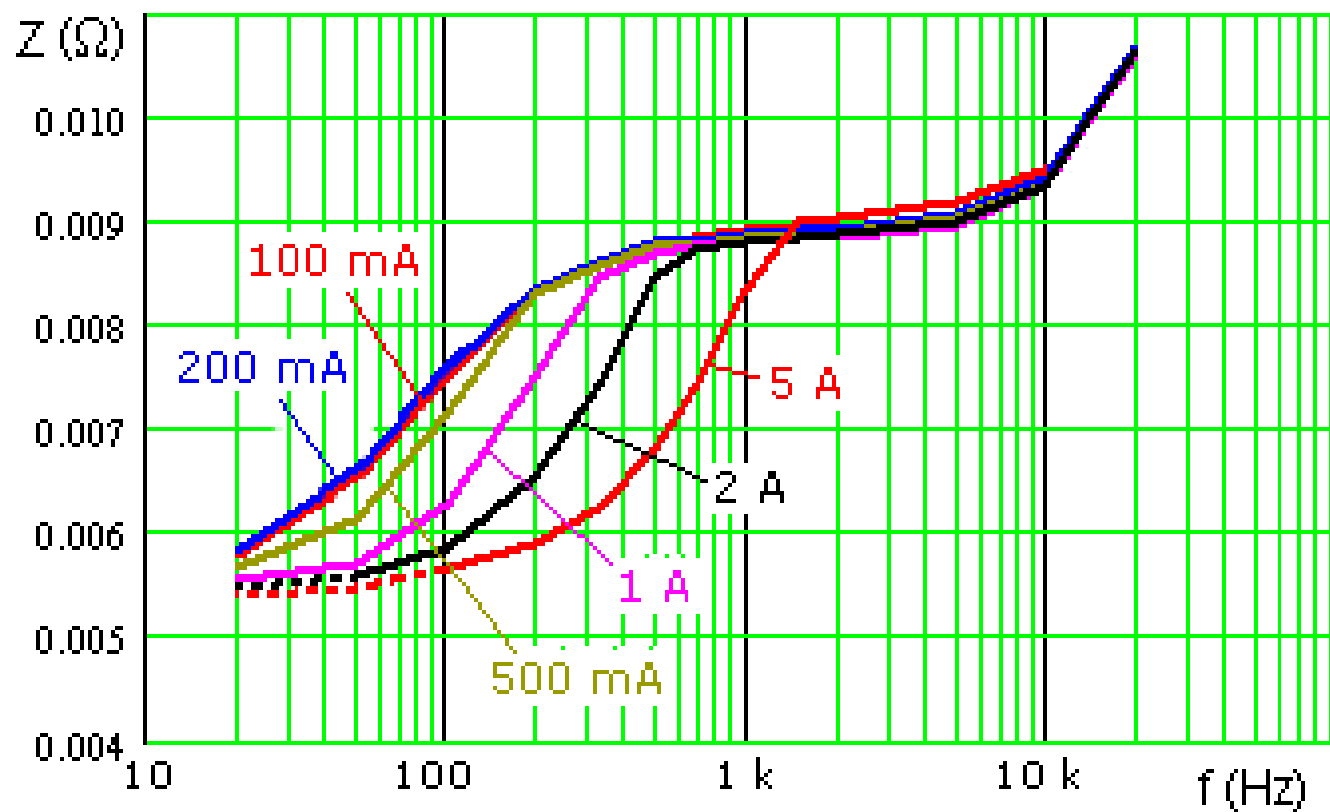
UTICAJ UČESTANOSTI PRIMARNOG SIGNALA NA GREŠKU STRUJNIH TRANSFORMATORA?



- U praktičnim slučajevima strujni transformator ima ograničen propusni opseg, odnosno se ne može upotrebiti pri prenosu signala visokih učestanosti.
- Drugim rečima strujni transformatori ove konstrukcije se mogu koristiti za učestanosti do max 500Hz
- Na višim učerstanostima postaju dominantne rasipne induktivnosti $L_{\sigma p}$ i $L_{\sigma s}$.
- Rasipne induktivnosti su posledica neidealne sprege primarnog i sekundarnog namotaja strujnog transformatora.
- Pošto su ove induktivnosti spregnute na red, one uslovljavaju porast impedanse pri visokim učestanostima
- Ovo dovodi do izobličenja strujnog signala i dati transformator neće tačno preneti informaciju o stvarnoj vrednosti struje.



Frekventna karakteristika impedanse strujnog transformatora Ferroxcube LT10/6/4-3E25 gledano sa strane primara; parametar je otpornost vezana na sekundarnoj strani
Veće izobličenje, odnosno veći porast impedanse, odnosno veća greška se ima pri manjem opterećenju sekundara



Frekventna karakteristika impedanse strujnog transformatora Ferroxcube LT10/6/4-3E25 gledano sa strane primara; parametar je struja na sekundarnoj strani

SNAGA STRUJNOG TRANSFORMATORA

Indukovana elektromotorna sila (EMS) u sekundarnom namotaju :

$$E = 4,44 \cdot N \cdot f \cdot a \cdot B$$

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

- Merni strujni transformatori rade sa niskom vrednošću indukcije B , kako bi se imala što veća tačnost.
- Stoga se povećavanje snage strujnog transformatora postiže povećanjem preseka jezgra a .
- Ovo pogotovo važi za jezgra za zaštitu, koja pri nominalnoj struji moraju imati jako nizak fluks (a time i magnetnu indukciju) da ne bi ušli u zasićenje pri strujama kvara koje mogu biti i do deset puta veće od nominalnih
- Dakle važi pravilo: veća snaga - veće jezgro - teži i veći strujni transformator.
- Snaga niskonaponskih strujnih transformatora je najčešće 5 ,10 ili 15 VA.

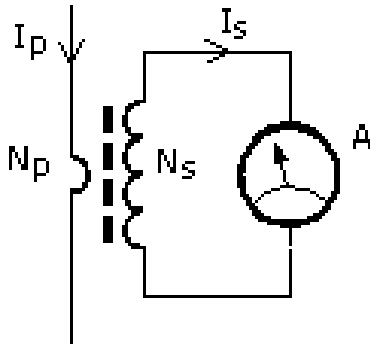
- Prilikom izbora snage strujog transformatora, osim snage uređaja koji se priključuju, treba voditi računa i o dužini poveznih vodova od strujnog transformatora do uređaja koje napaja.
- Ako su ovi vodovi jako dugački treba razmotriti ili povećanje naznačene snage strujnog transformatora ili smanjenje naznačene sekundarne struje sa 5A na 1A.
- Takođe, treba imati u vidu da podopterećen strujni transformator može imati veću strujnu grešku od propisane klasom tačnosti.

SEKUNDARNI NAMOTAJ STRUJNOG TRANSFORMATORA MORA BITI SIGURNO UZEMLJEN!!!

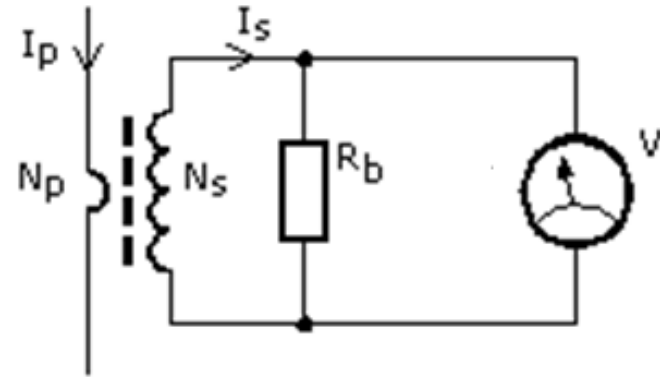
SEKUNDARNI NAMOTAJ NE SME OSTATI OTVOREN!!!

- Radi sigurnosti sekundarni namot mora biti sigurno uzemljen, a radi izbegavanja preteranog zagrevanja ne smemo ga ostaviti otvorenim pri uključenju transformatora ili ga otvarati u toku rada.
- Ukoliko je namot sekundara otvoren, transformator dolazi u režim praznog hoda. Tada sva primarna struja magnetiše jezgro strujnog transformatora, pošto ne postoje sekundarni ampernavoji koji bi držali ravnotežu primarnim ampernavojima. To dovodi do ulaska strujnog transformatora duboko u zasićenje, i do maksimalne vrednosti fluksa. Vremenska karakteristika fluksa stoga ima gotovo kvadratni oblik.
- Pri ovome indukcija u gvožđu jezgra poraste mnogo puta u odnosu na njenu vrednost pri naznačenoj struji (do 1,4...1.8T umesto 0,08...0,1T); u skladu s tim rastu i gubici u gvožđu te pri dužem radu neizbežno dolazi do zagrevanja jezgra, gubljenja magnetnih karakteristika i do kvara izolacije sekundarnog namota.
- Glavnu opasnost predstavlja napon na priključcima otvorenog sekundarnog namota koji je veoma izobličen i sa izraženom vršnom vrednošću kratkog trajanja, što se objašnjava veoma jakim zasićenjem magnetskog kola.
- **Naponski pikovi na sekundaru dostižu nekoliko hiljada volti, što predstavlja veliku opasnost za ljude koji rukuju ovim transformatorima.**
- **Iz navedenog je jasno koliko je važan zahtev o stalnom kratkom spoju sekundarnog namota strujnog transformatora direktno ili preko instrumenta!!!!**

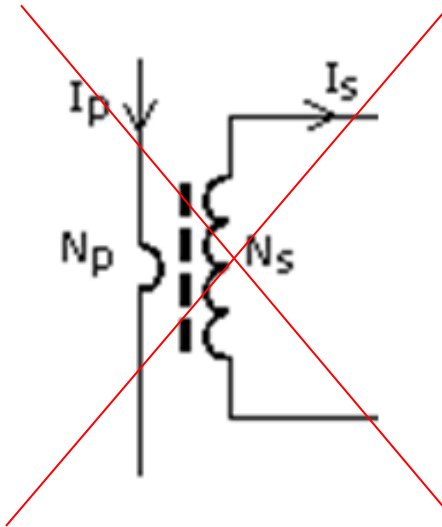
NAČINI SPAJANJA SEKUNDARA MERNOG STRUJNOG TRANSFORMATORA



Sekundar strujnog transformatora je „zatvoren“ sa ampermetrom koji ima veoma malu impedansu



Sekundar strujnog transformatora je „zatvoren“ sa blader otpornikom R_b , i merenje struje se ustvari ostvaruje voltmetrom: $V = R_b \times I_s$



FAKTOR SIGURNOSTI STRUJNIH TRANSFORMATORA

- Jedan od bitnih parametara strujnog transformatora je faktor sigurnosti koji pokazuje ponašanje strujnog mijernog transformatora u području iznad nazivne struje.
- Strujni merni transformator je tako projektovan da može trajno da radi sa 20% većom strujom od naznačene. Daljim porastom primarne struje strujni transformator ulazi u zasićenje, tako da mu počinje rasti greška merenja.
- Potrebno je napomenuti da se ne može sprečiti da dođe do porasta primarne struje iznad 120% nominalne vrednosti.
- Preopterećenja i kratki spojevi su u mreži nepredvidivi događaji koji se ne mogu sprečiti. Kvalitet zaštite određuje kako brzo će doći do isključenja ovih događaja u mreži.
- Na neki način je potrebno zaštititi uređaje vezane za sekundar, čija je naznačena struja najčešće 5A. S obzirom da, kako je već rečeno, sekundar ne sme ostati otvoren nije dozvoljena zaštita topivim osiguračima.
- Mehanizam zaštite je iskorišćenje prirodne osobine jezgra da pri povećanju struje magnetizacije iznad određene vrednosti karakteristika magnećenja dolazi do kolena tj. ulazi u zasićenje. Na taj način raste greška strujnog transformatora, što je dobro jer je sekundarna struja tada manja nego što bi bila u slučaju da je jezgra magnetski linearna.
- **Faktor sigurnosti ili prekostrujni broj strujnog transformatora predstavlja relativnu vrednost primarne struje u odnosu na naznačenu na pločici pri kojoj strujna greška prelazi 10%.**
- Treba napomenuti da se ovaj faktor određuje za nominalno opterećen strujni transformator kao i da se ovaj faktor određuje samo za merne transformatore

NAPONSKI MERNI TRANSFORMATORI

- Od naponskih transformatora se zahteva da transformišu merene napone u stalnom odnosu i gotovo bez faznog pomeraja.
- Naznačeni odnos transformacije k_n naponskog mernog transformatora definisan je odnosom njegovog naznačenog primarnog napona U_{1n} i naznačenog sekundarnog napona U_{2n} :

$$k_n = \frac{U_{1n}}{U_{2n}}$$

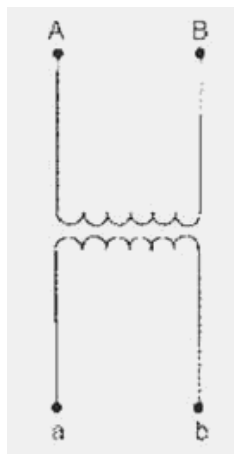
- Standardni naznačeni primarni naponi mernih transformatora jednaki su standardnim naponima električnih mreža.
- Naznačeni primarni napon dvopolnog izolovanog naponskog transformatora jednak je primarnom međufaznom (linijskom) naponu mreže (npr. 35kV), a naznačeni napon jednopolno izolovanog naponskog transformatora jednak je faznom naponu mreže (npr. 35/√3 kV).
- U prvom slučaju standardni naznačeni sekundarni napon je 100V ili, ređe, 200V za prostrane sekundarne strujne krugove.
- U drugom slučaju transformator je standardni naznačeni sekundarni napon iznosi 100 √3V ili 200 √3V .
- Treba napomenuti da odnos transformacije nije sasvim jednak broju navojaka u primarnom i sekundarnom namotu, nego je uvek nešto veći kako bi se smanjile greške zbog padova napona u naponskom transformatoru.

KONSTRUKCIJA NAPONSKIH MERNIH TRANSFORMATORA

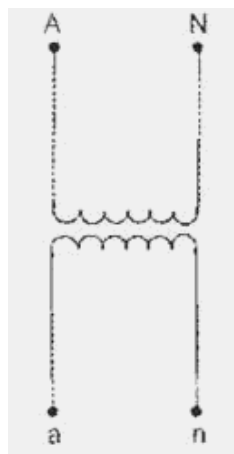
- Namotaji mernih transformatora najčešće su od bakarne žice izvučene od elektrolitskog bakra kome je čistoća najmanje 99.9%.
- Bakarne žice okruglog preseka su izolovane lakom na bazi sintetičkih smola.
- Osim lakiranih žica upotrebljavaju se žice sa jednim slojem prediva od svile; ovakva izolacija se koristi kad se mora postići mala kapacitivnost namotaja da bi se mogao upotrebiti za visoke frekvencije.
- Prema vrsti upotrebljene izolacije između namotaja, razlikuju se:
 - suvi (do 145 kV)
 - malouljni za sve napone
 - uljni
 - sa gasom SF₆
- Prema izvođenju razlikuju se dva osnovna tipa naponskih transformatora:
 - dvopolno izolovani naponski transformatori
 - jednopolno izolovani naponski transformatori



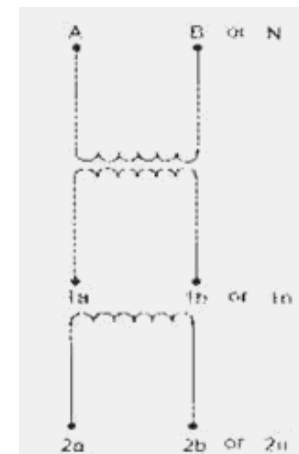
RAZLIKA IZMEĐU DVOPOLNO I JEDNOPOLNOIZOLOVANIH NAPONSKIH MERNIH TRANSFORMATORA



Dvopolno izolovani jednofazni naponski merni transformator sa jednim sekundarnim namotajem



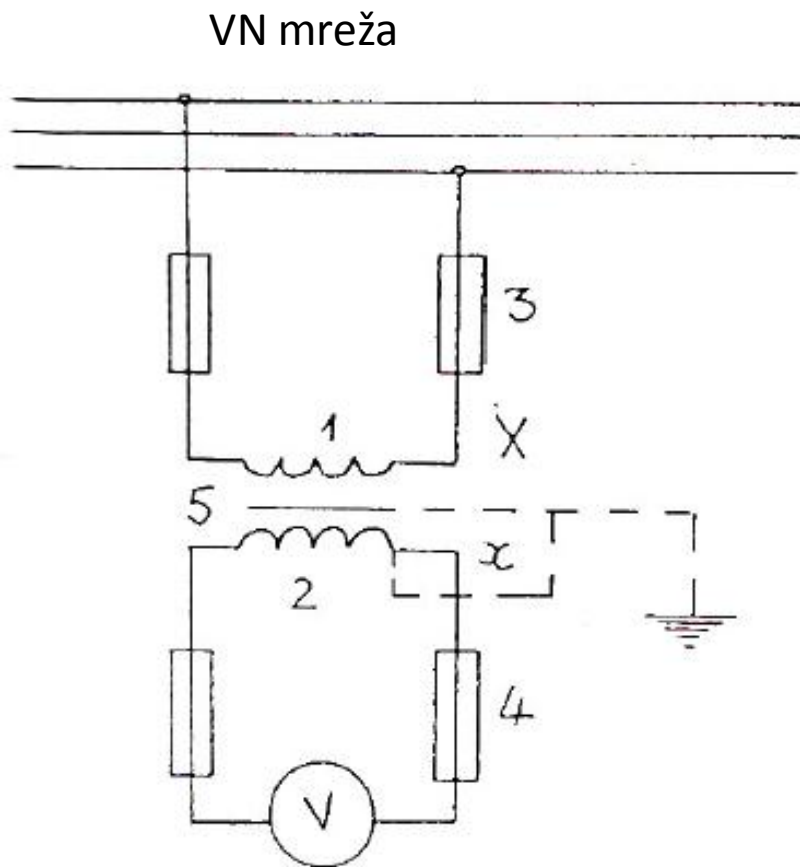
Jednopolno izolovani jednofazni naponski merni transformator sa jednim sekundarnim namotajem



Jednofazni naponski merni transformator sa dva Sekundarna namotaja

- Razlika između ova dva naponska merna transformatora je to što dvopolno izolovani naponski transformator ima dva visokonaponska priključka koja su izolovana od suda transformatora, a jednopolno izolovani naponski transformatori imaju jedan visokonaponski priključak, dok se drugi kraj uzemljuje.
- Za srednje napone, do 38 kV upotrebljavaju se jednopolni ili dvopolni izolovani suvi (izolator je epoksidna smola) ili malouljni naponski merni transformatori.
- Za visoke napone od 110 kV i više naponski transformatori se izrađuju isključivo kao jednopolno izolovani, jer je za ove napone znatno jeftinije upotrebiti tri jednopolno izolovana nego dva dvopolno izolovana transformatora.

UPOTREBA OSIGURAČA KOD MERNOG NAPONSKOG TRANSFORMATORA



- Primarni namotaj (1) je spojen na VN mrežupreko osigurača (3).
- Na sekundarni namotaj (2) se priključuju merni instrumenti ili zaštitnireleji.
- I u sekundarnom kolu su postavljeni osigurači (4) koji služe za zaštitu naponskog transformatora od kratkog spoja.
- Prilikom kratkog spoja u sekundaru, zbog relativno velike impedanse koju ima transformator, strujau primarnom krugu bi bila mala (reda nekoliko ampera) pa osigurači (3) nebi odreagovali.

NAPONSKA GREŠKA I FAZNA GREŠKA

$$p_u [\%] = \frac{k_n U_2 - U_1}{U_1} 100$$

- Fazna greška δu je fazna razlika (stav) između vektora primarnog i sekundarnog napona.
- Smer vektora bira se tako da idealnom transformatoru fazna razlika bude jednaka nuli.
- Smatra se da je fazna greška pozitivna ako je vektor sekundarnog napona vremenski ispred vektora primarnog napona.
- Padovi napona u transformatoru, a time i njegova naponska i fazna greška, zavise od opterećenja priključenog na sekundarne stezaljke.
- S obzirom na opterećenje koje se priključuje na njihovu sekundarnu stranu, upotrebljavaju se naponski transformatori za merenje i za zaštitu.
- Od prvih se zahteva veća tačnost, ali samo na uskom naponskom području. Kod drugih se zahteva manja tačnost, ali je potrebno da ona bude održana na znatno širem naponskom području.

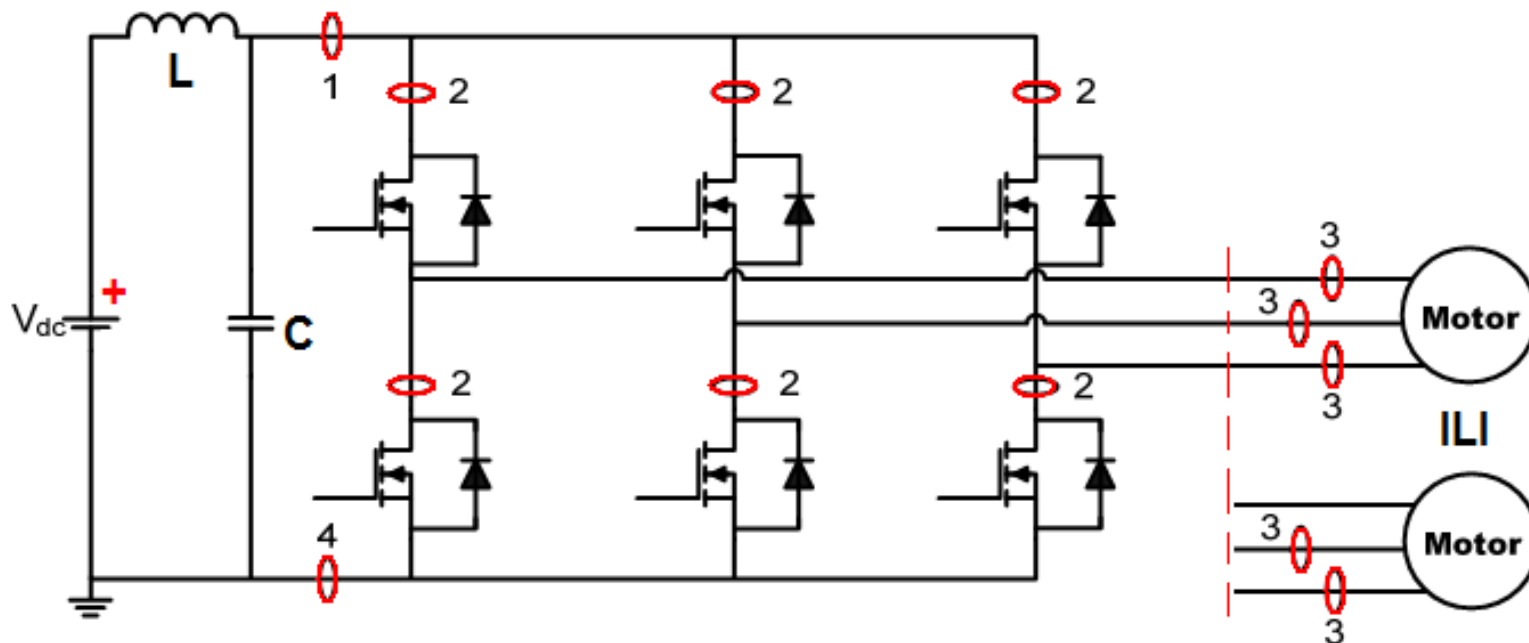
MERENJE STRUJE I NAPONA NA VISOKIM UČESTANOSTIMA

- Korišćenje mernih strujnih i naponskih transformatorima pri visokim učestanostima nailazi na prepreku usled karaktera njihovog propusnog opsega
- Pri višim učestanostima dolaze do izražaja rasipne induktivnosti, odnosno reaktanse koje dovode do izobličenja mernih signala
- Da bi se tačno izmerili tranzijentni efekti, harmonici ili prelazne pojave u struji ili naponu neophodno je imati merenja u širokom propusnom opsegu na primer : DC-200kHz ili čak do DC-200MHz
- U ovom slučaju strujni i naponski merni transformatori postaju neupotrebljivi
- Tako na primer da bi mogli doneti zaključke o stanju i eventualnim nedostacima u ležajevima električnih mašina neohodno je meriti struju praznog hoda. Ovo merenje zahteva tačno određivanje harmonika struje i upotrebu sofisticiranih senzora koji imaju široki propusni opseg
- Takođe, obzirom da se savremeni regulisani elektromotorni pogoni ne mogu zamisliti bez upotrebe pretvarača, proučavanje tehnika i metoda merenja struje i napona pri tranzijentima kao i viskom učestanostima, dobija na sve većem značaju.

MERENJE TRENUTNE VREDNOSTI STRUJE

- Merenje struje elektromotora kako u kolima regulisanih pogona, tako i u kolima sistema energetske pretvarača je neobično značajno sa više stanovišta (kontrola i regulacija, obezbeđenje funkcija zaštite, monitoringa, kvaliteta električne energije, spektralne analize, merenja harmonijskog sadržaja i sl...)
- Postoji nekoliko tehnika za merenje struje i one će biti detaljno obrađene u ovom delu predavanja
- Ovo merenje je nešto komplikovanije od naponskih merenja
- Treba obezbediti merenje AC i DC komponenti, uz napomenu da je zahtevani propusni opseg merenja DC-200MHz (ovo nije baš lako ostvariti!!!)

Moguće merne pozicije struje u energetsom pretvaraču i elektromotoru (regulisani elektromotorni pogon)



U energetske pretvaračima (invertorima) za pogon trofaznih motora (asinhronih, sinhronih, brushless) je takođe moguće meriti struju na više mesta, odnosno pozicija. Pozicija (1) obezbeđuje merenje struje u DC među kolu i kao takva veoma je pogodna za zaštitu od kratkih spojeva kako u invertoru tako i na opterećenju invertora (motoru). Pozicija (2) obezbeđuje merenje struje prekidača u invertoru i kao takva je pogodna za njihovu zaštitu. Pozicija (3) meri struju opterećenja (motora) i kao takva je pogodna u strujnoj i brzinskoj regulaciji motora. **Zašto u brzinskoj!!!** Ako je opterećenje simetrično može se meriti struja u samo dve faze. **Zašto!!** Pozicija (4) omogućava merenje struje DC međukola ali i polaritet za zaštitu poluprovodničkih elemenata.

MERNE STRUJNE TEHNIKE

U OVOM DELU PREDAVANJA ĆE BITI OBRAĐENE
MERNE STRUJNE TEHNIKE BAZIRANE NA:

1. MERENJU POMOĆU OTPORNOSTI

2. ELEKTROMAGNETNIM MERENJIMA

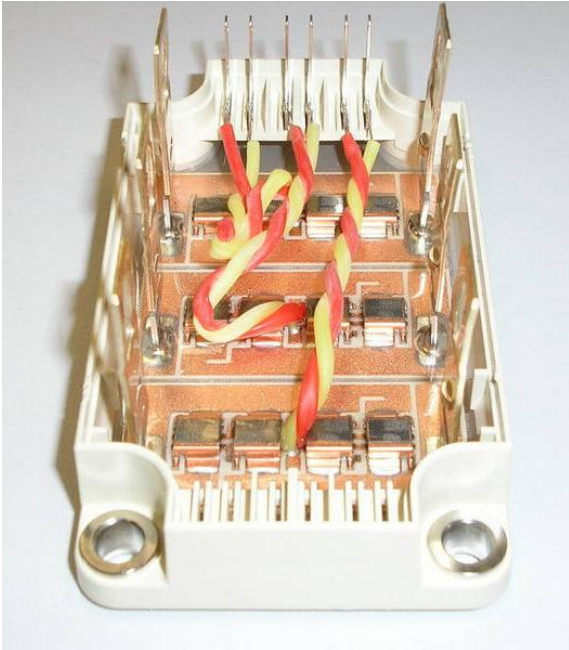
- korišćenje vazdušnih tehnika (kalem Rogowskog)
- korišćenje Holovih senzora (sa i bez povratne sprege)
- korišćenje magnetno-otpornih senzora
- korišćenje fiber optičkih senzora

ŠANT ili ŠENT, KALIBRISANI OTPORNIK

- Disipacija $P_{\gamma} = R \cdot I^2$
- Ne pruža galvansku izolaciju
- Temperaturna promenljivost
- Niska cena

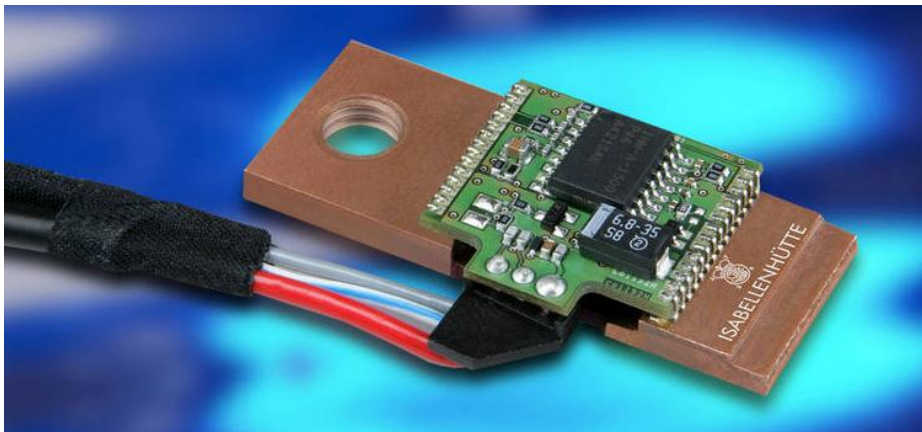


PRIMENA



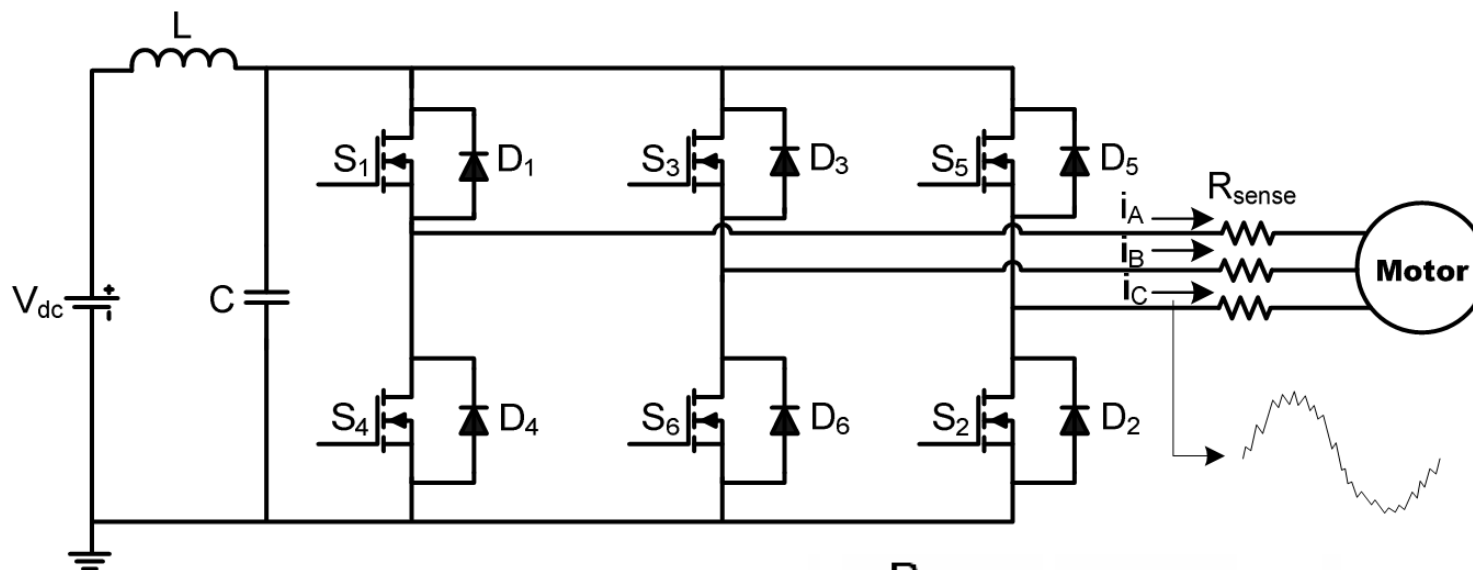
Unutar poluprovodničkih modula
(frekventni pretvarači)

Kao zasebni
merni
pretvarači

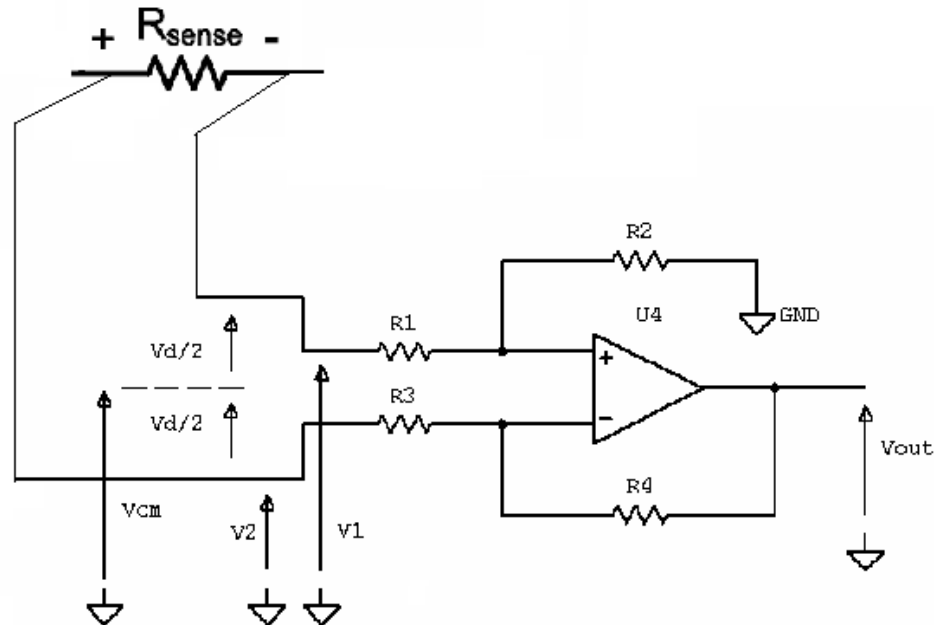


Kao moduli za ugradnju u
energetske pretvarače

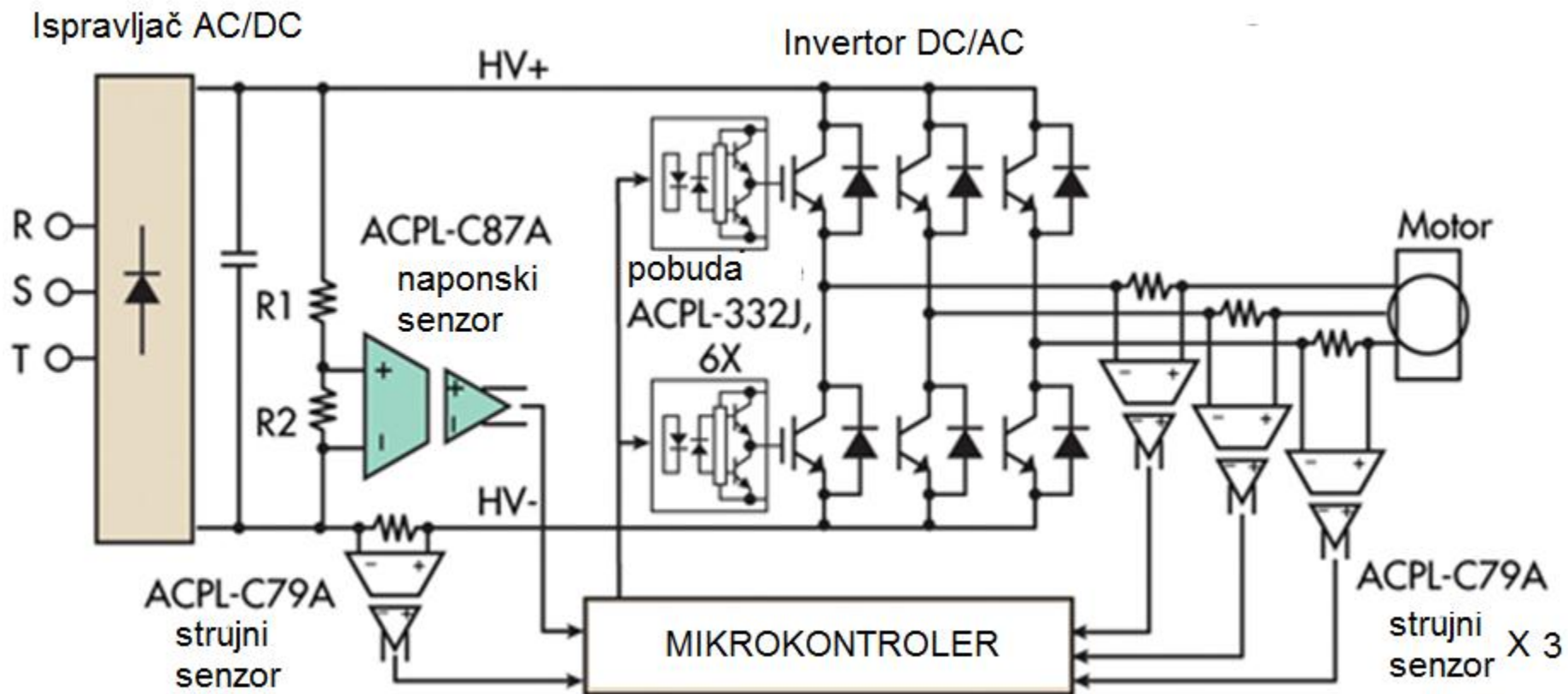
OTPORNO MERENJE STRUJE U SVAKOJ OD FAZA MOTORA



Merenje struje motora dodavanjem mernih otpornika u svaku fazu motora (moguće je koristiti samo merenje u dve faze. Problem kod ovog merenja su pored disipacije na otpornicima i tzv. *comon-mode* signali koji potiču od veoma strmih ivica napona na otpornicima (dv/dt efekat). Rešenje je korišćenje optički izolovanih operacionih pojačavača.

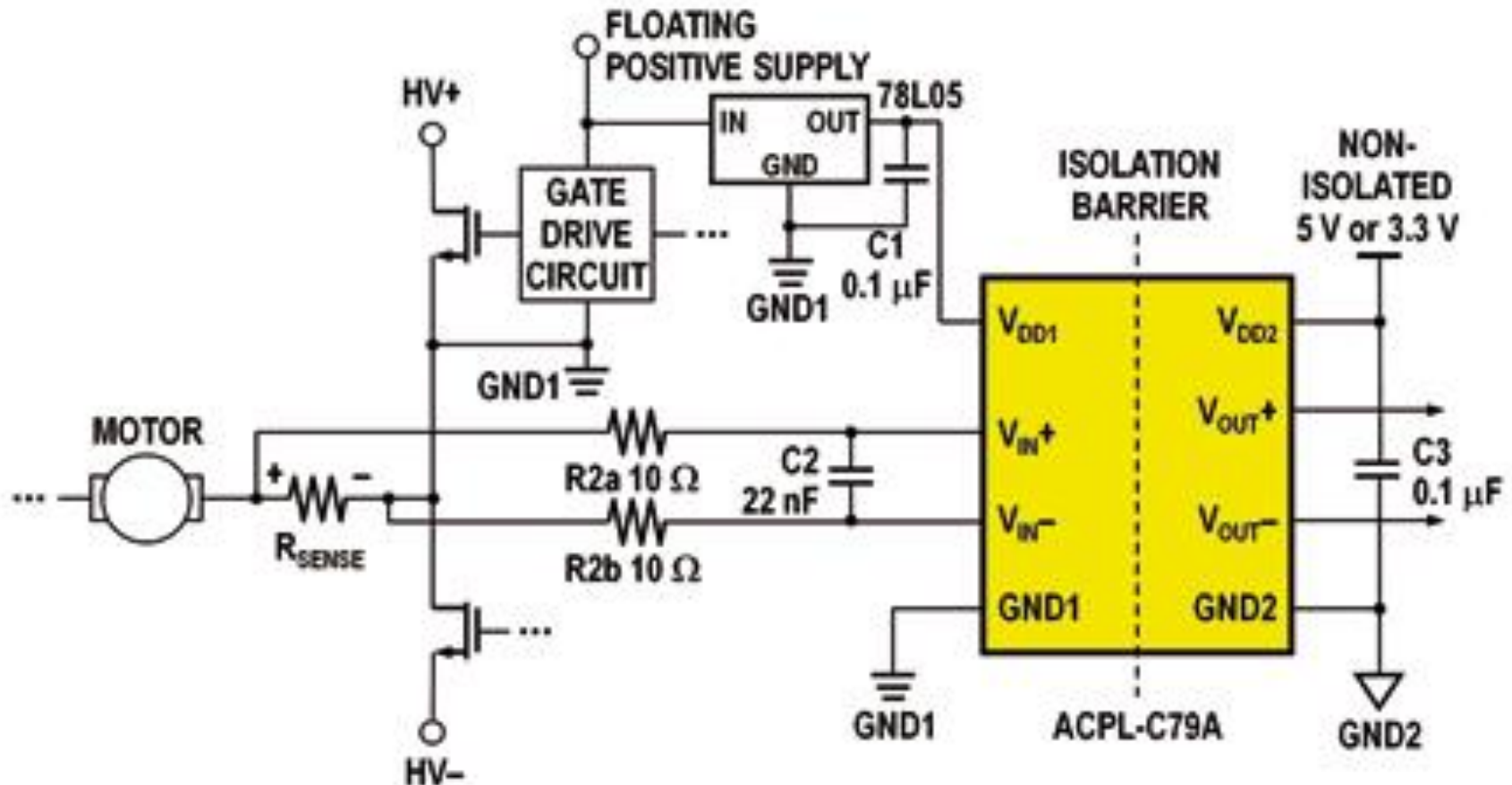


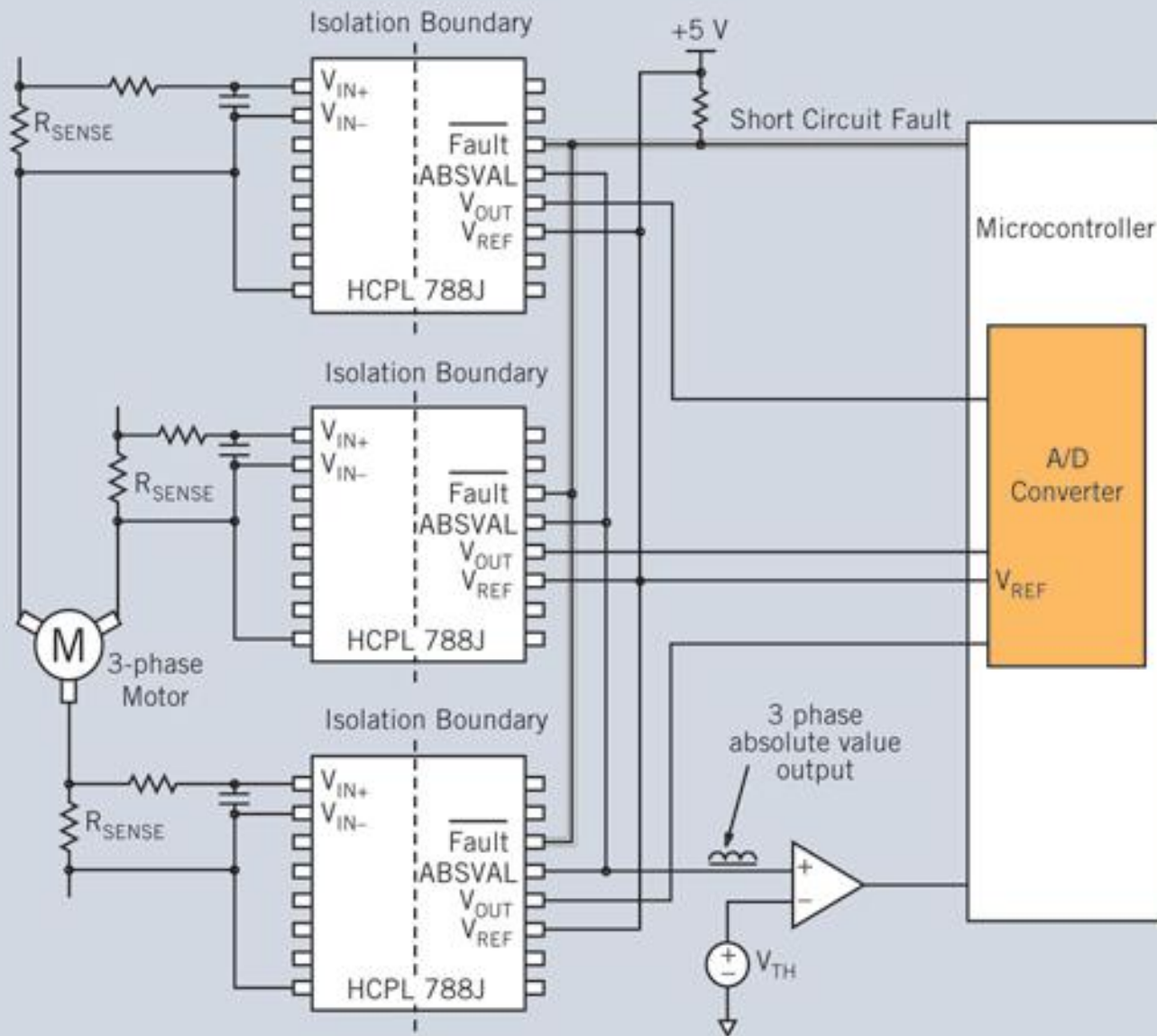
OPTOIZOLOVANO MERENJE STRUJE U REGULISANOM POGONU AC MOTORA



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

KONKRETAN PRIMER OPTOIZOLOVANOG MERENJA STRUJE U KOMBINACIJI SA STRUJNIM ŠANTOM





MERNI SISTEM STRUJA TROFAZNOG AC MOTORA SA OPTOIZOLOVANIM SENZORIMA HCPL 788J

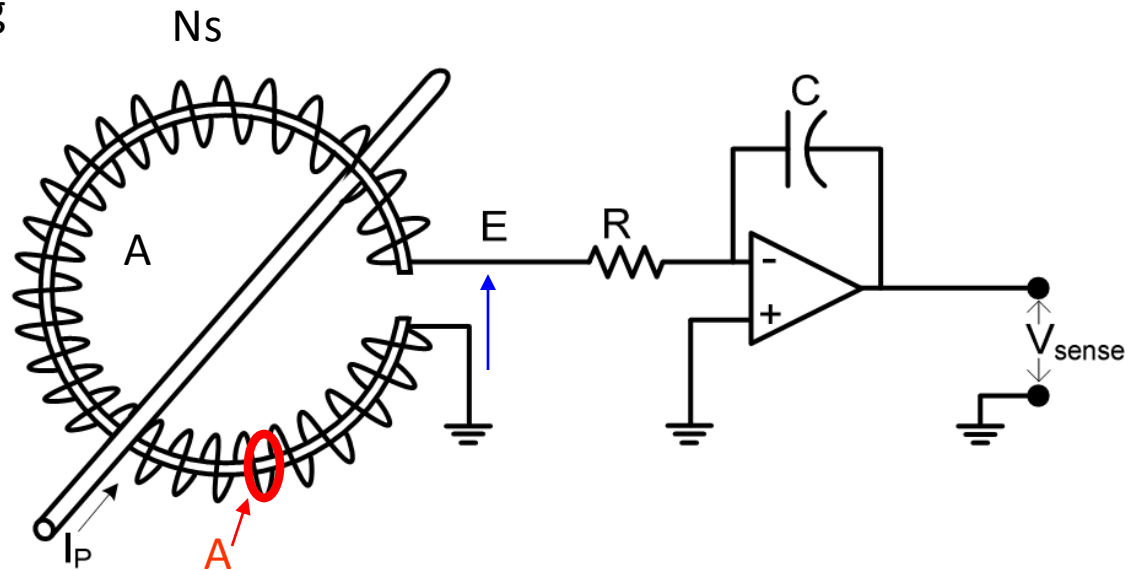
MERNA TEHNIKA BAZIRANA NA VAZDUŠNOM STRUJNOM TRANSFORMATORU- KALEM ROGOWSKOG

KORIŠĆENJE KALEMA ROGOVSKOG

Induktivnost vazdušnog kalema je:

$$M = \frac{\mu_o AN_s}{l}$$

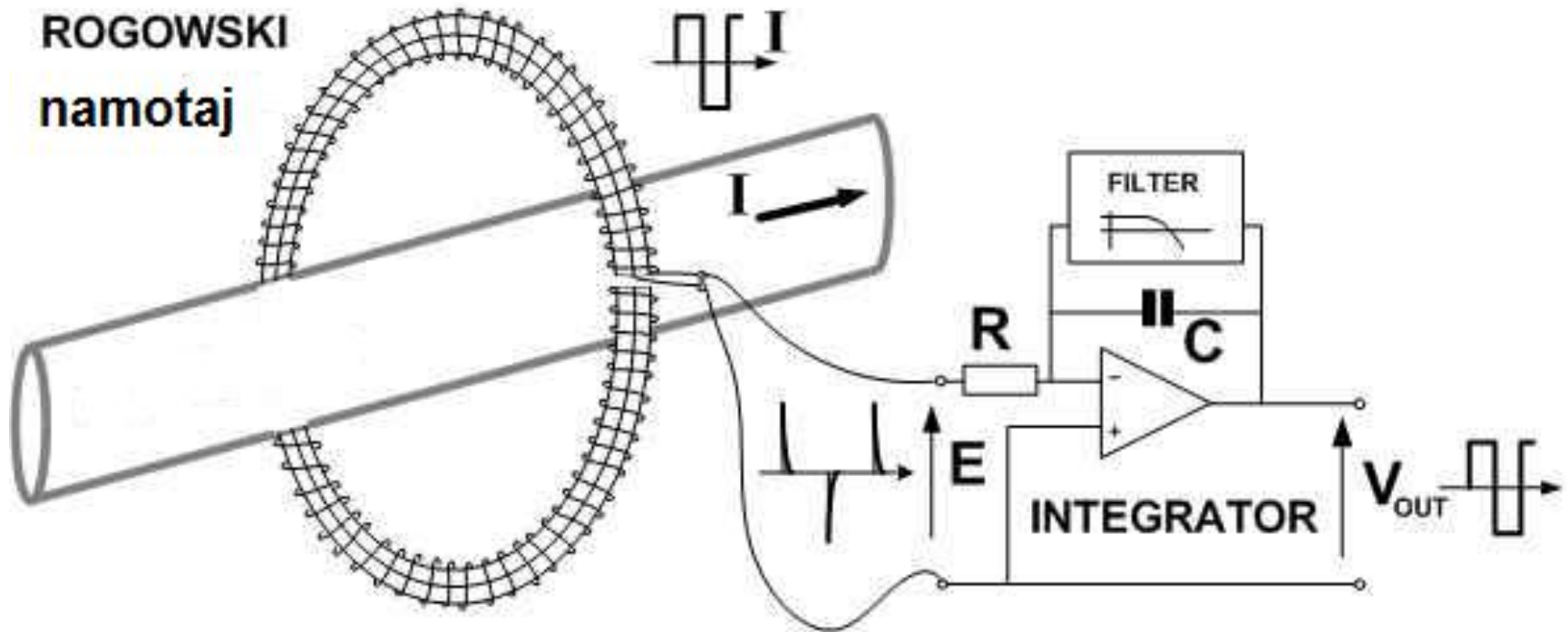
$$E = M \frac{dI_P}{dt}$$



$$V_{sense} = \frac{1}{RC} \int E dt = \frac{1}{RC} \frac{\mu_o AN_s}{l} I_P$$

INTEGRACIJOM NAPONA NA KRAJEVIMA KALEMA SE DOBIJA NAPON KOJI JE PROPORCIONALAN STRUJI PRIMARNOG VODA

PRIMER KADA JE PRIMARNA STRUJA PRAVOUGAONA (VRLO ČEST SLUČAJ U ENERGETSKOJ ELEKTRONICI)

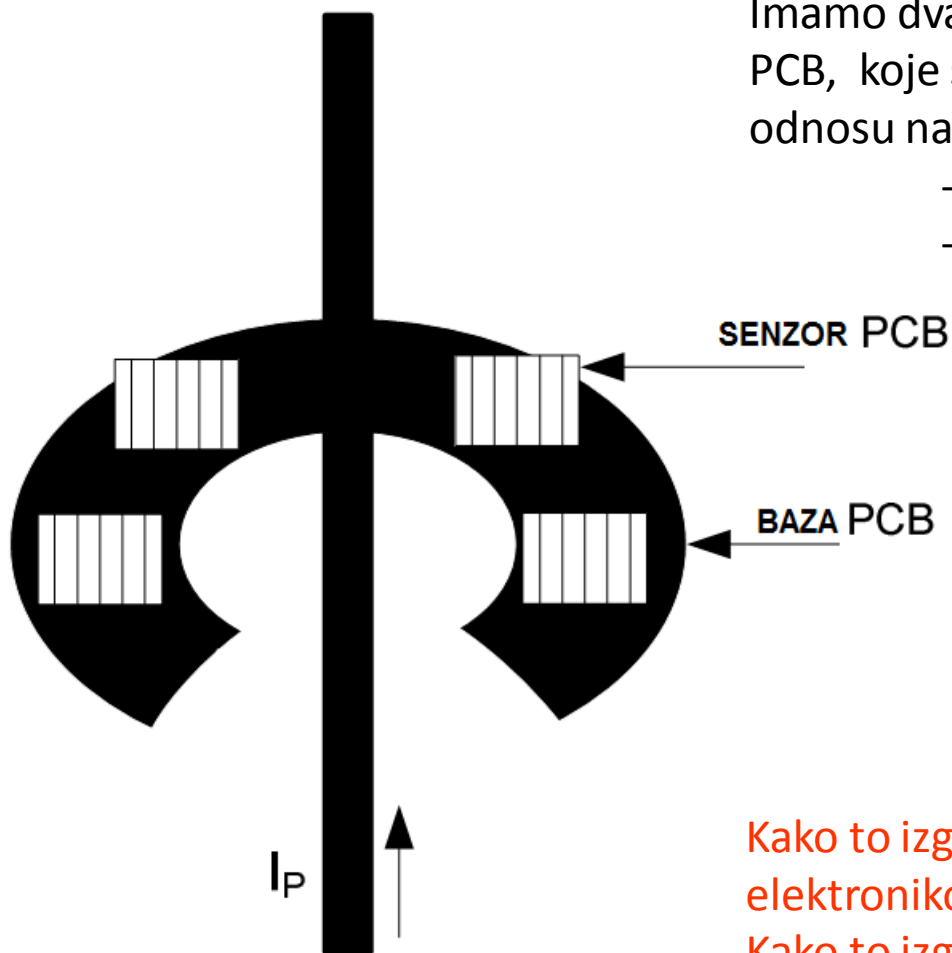


Merenje diferencira originalnu struju (to je ustvari napon E). Da bi dobili originalnu struju I moramo ustvari da integralimo napon E . Tako je izlazni napon integratora $V_{out} \sim I$

KORIŠĆENJE PLANARNIH KALEMOVA ROGOVSKOG

Imamo dva štampana hibrida tj. štampane ploče PCB, koje se postavljaju normalno jedna u odnosu na drugu:

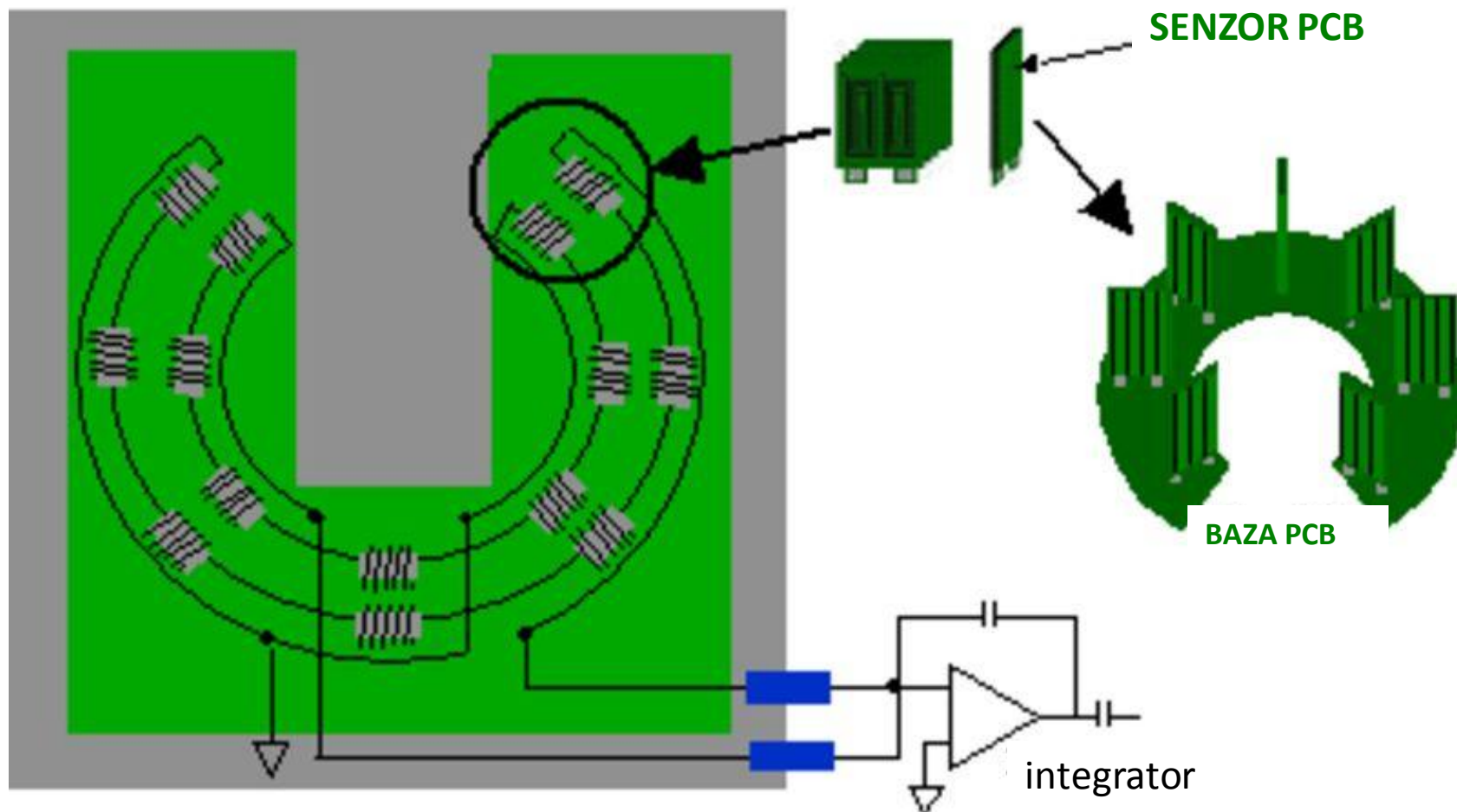
- senzorska PCB
- bazna PCB



Bazna PCB ima otvor na sredini i kroz njega prolazi struja koje se meri tj. I_P .
Magnetno polje ove struje “prožima” normalno postavljenu senzorsku PCB.

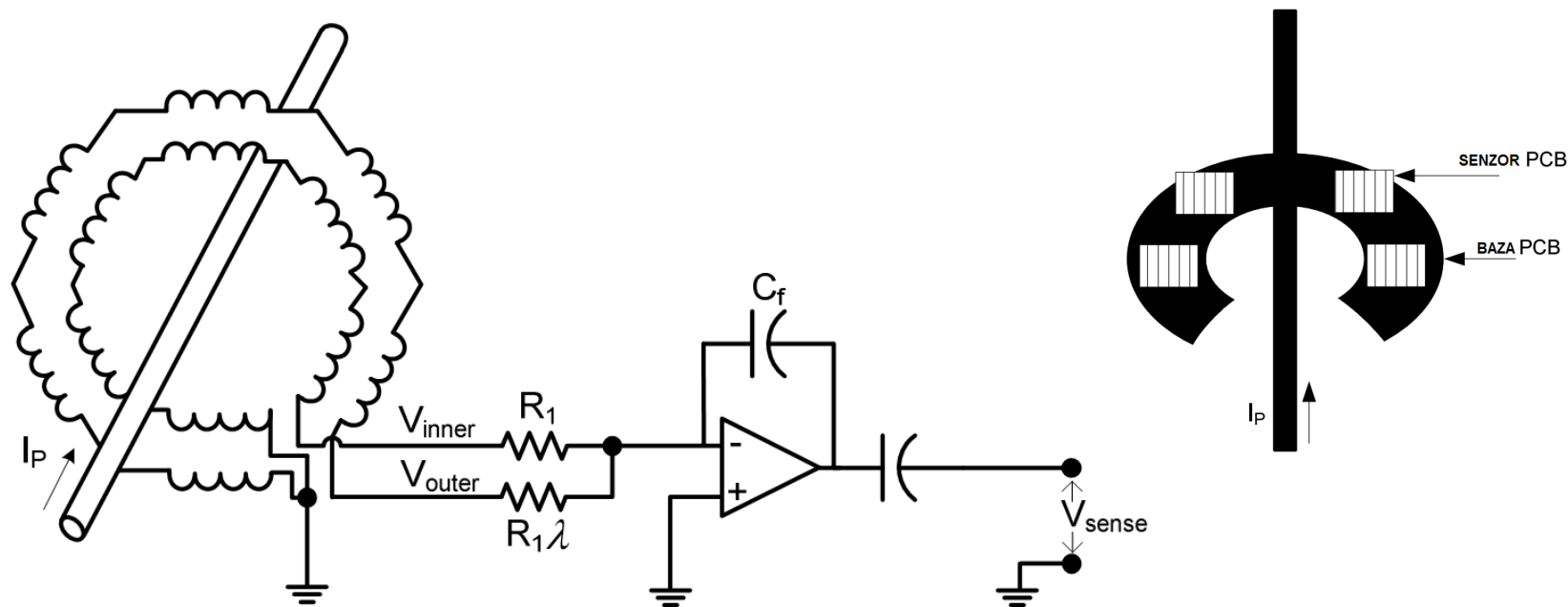
Kako to izgleda u kombinaciji sa pojačavačkom elektronikom?
Kako to izgleda u 3D?

KAKO TO IZGLEDA U 3D ??



Ustvari imamo dva planarna kalema Rogowskog koji su predstavljeni sa dve petlje. Signali sa sveke od petlji se dovode u sabiračko kolo na ulazu integratora.

PLANARNI KALEMOVI ROGVSKOG DATI U DVE KONCENTRIČNE PETLJE



Bitno je uočiti indukovane napone u spoljašnjoj i unutrašnjoj petlji

$$V_{sense} = V_{inner} - \frac{V_{outer}}{\lambda} = V_{inner} \left(1 - \frac{V_{outer}}{V_{inner} \lambda} \right)$$

$$\lambda = (V_{outer}/V_{inner}) \rightarrow V_{sense}=0$$

Propusni opseg 10kHz-100kHz

$$(\lambda/2) = (V_{outer}/V_{inner}) \quad \text{Uobičajeno se koristi}$$

IZGLED KALEMA ROGOWSKOG (zatvoren)



OTVOREN KALEM

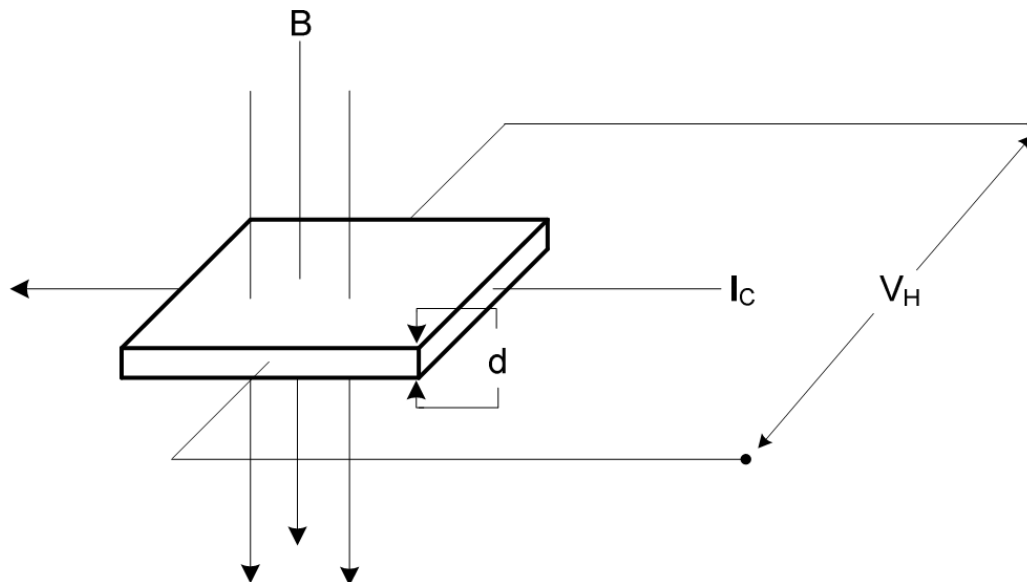
sa modulom TRANSMITERA (merne elektronike)



STRUJNE TEHNIKE BAZIRANE NA HOLOVOM EFEKTU

Holov efekat?

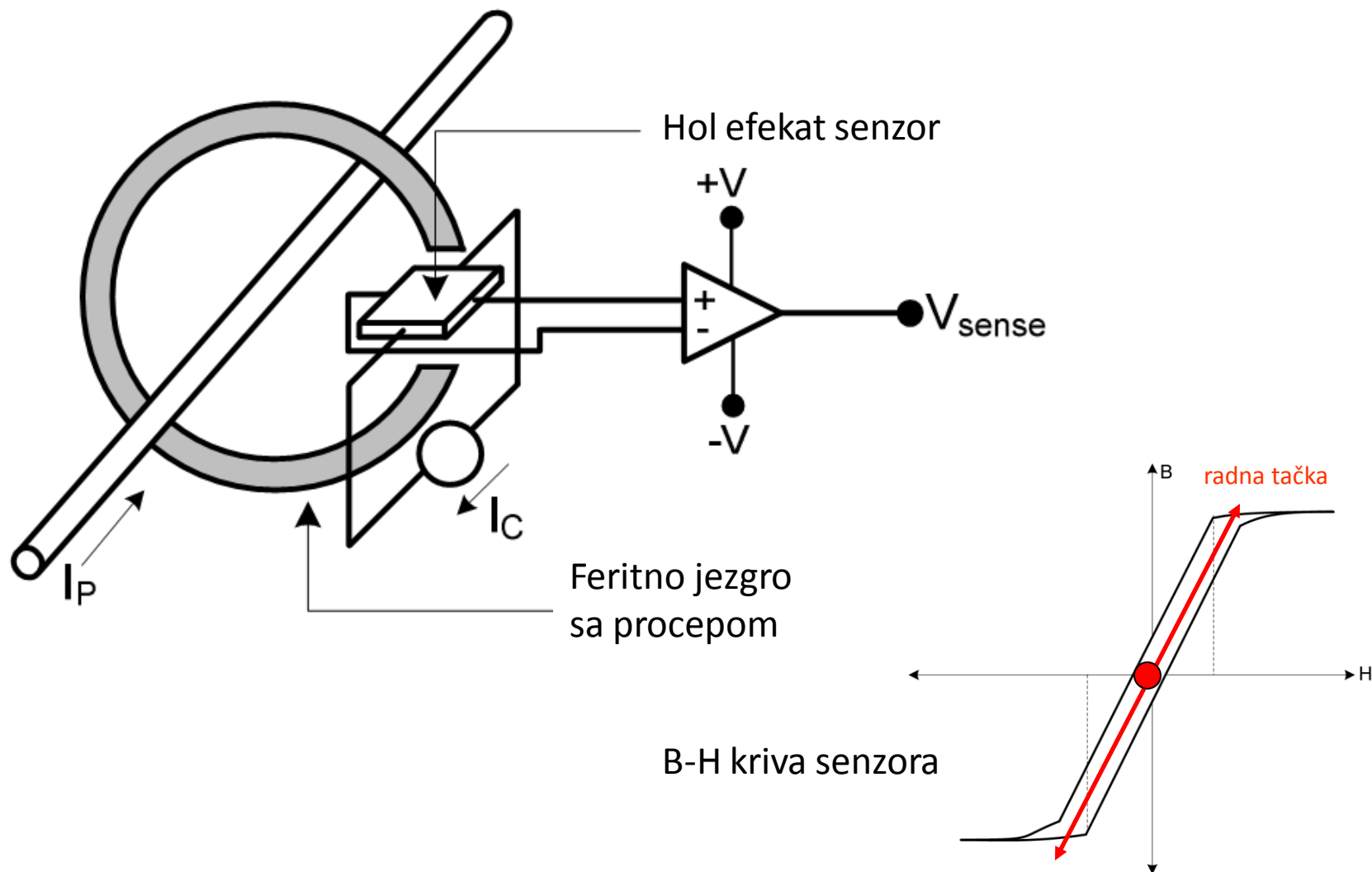
Hall effect?



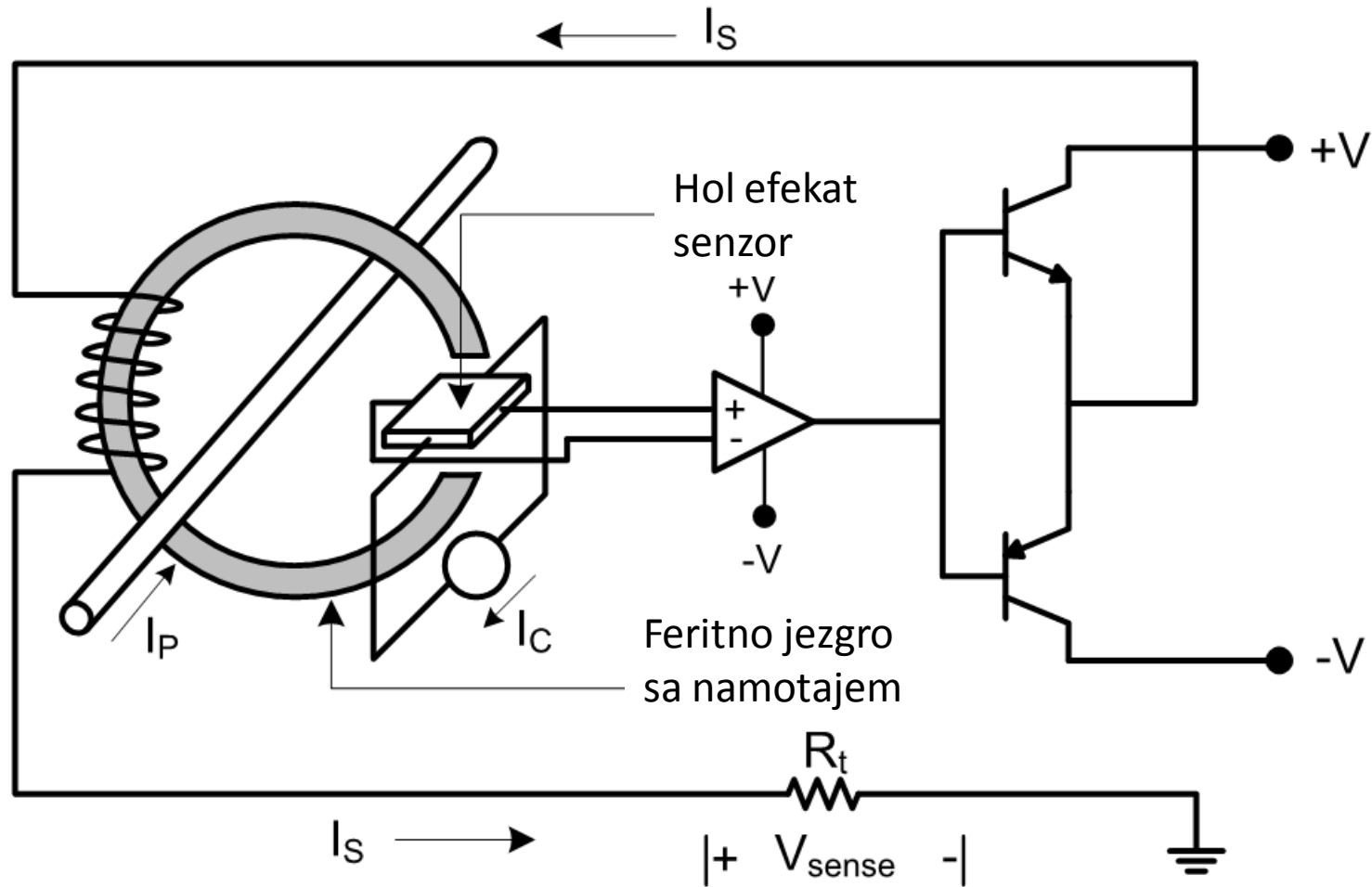
Holov napon

$$V_H = \frac{K}{d} B I_C + V_{OH} \rightarrow \text{Offset napon koji postoji i kada nema eksternog polja}$$

MERENJE STRUJE SA HOL EFEKAT SENZOROM (u otvorenoj povratnoj sprezi)



MERENJE STRUJE SA HOL EFEKAT SENZOROM (u zatvorenoj povratnoj sprezi)

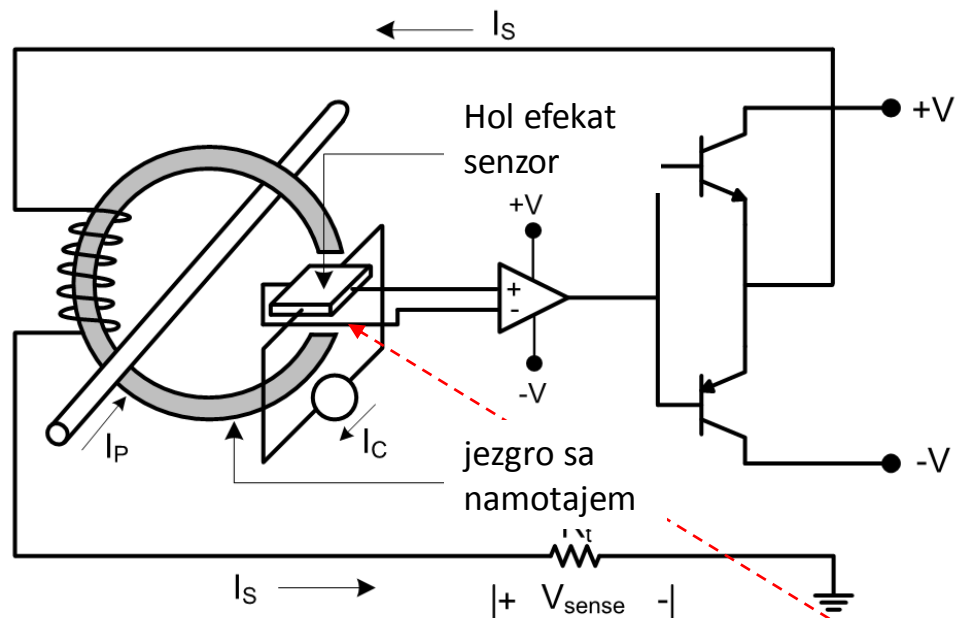


$$N_P I_P = N_S I_S$$

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

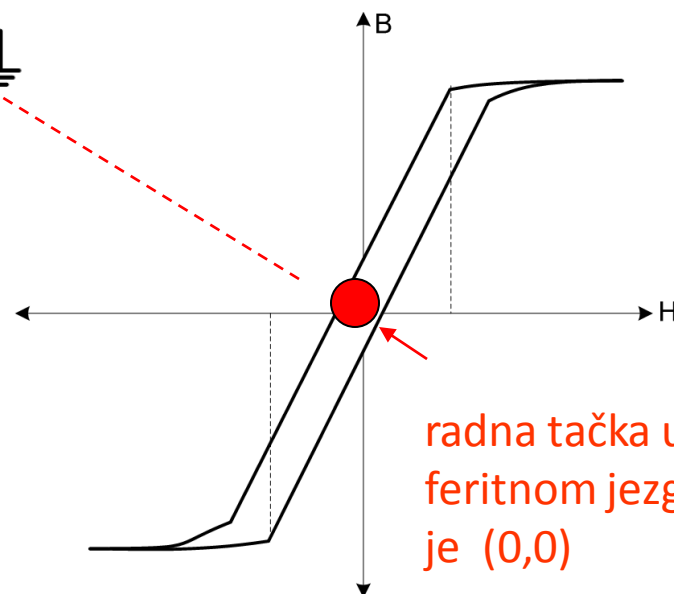
GDE SE NALAZI RADNA TAČKA??

RADNA TAČKA U FERITNOM JEZGRU PRI KOMPENZOVANOM FLUKSU

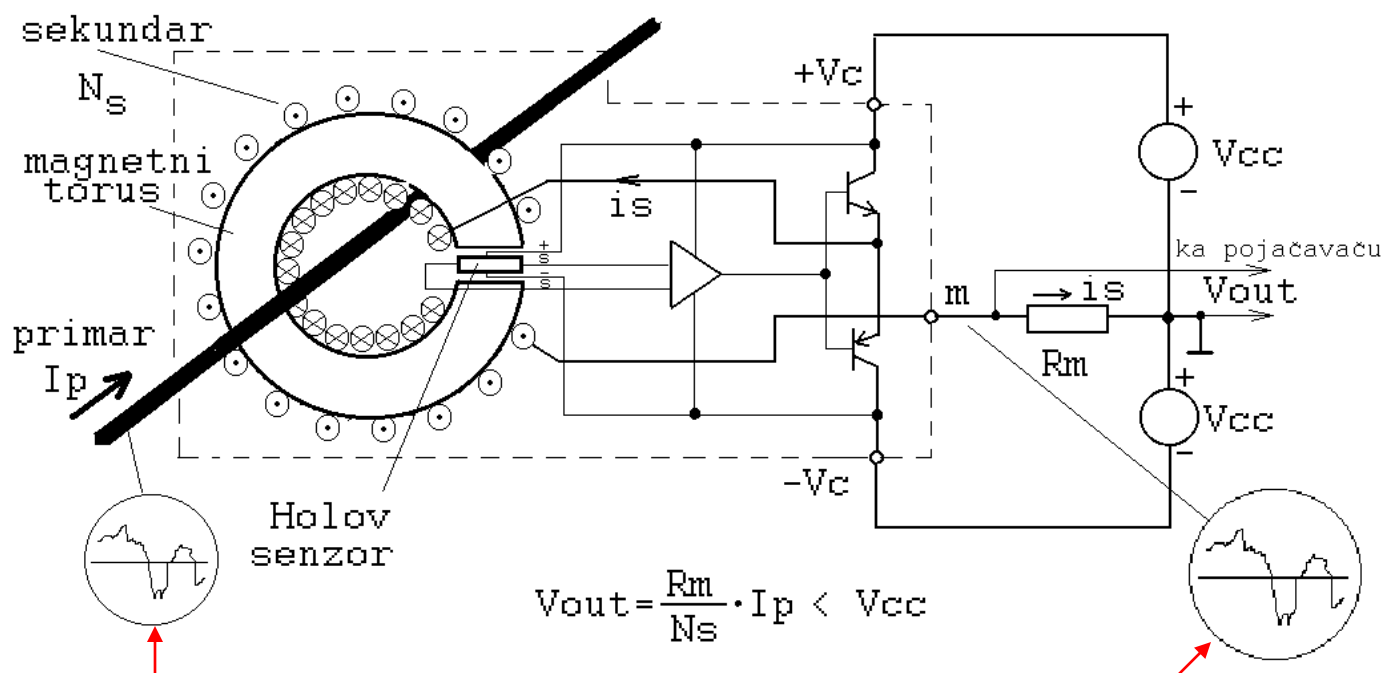


$$N_P I_P = N_S I_S$$

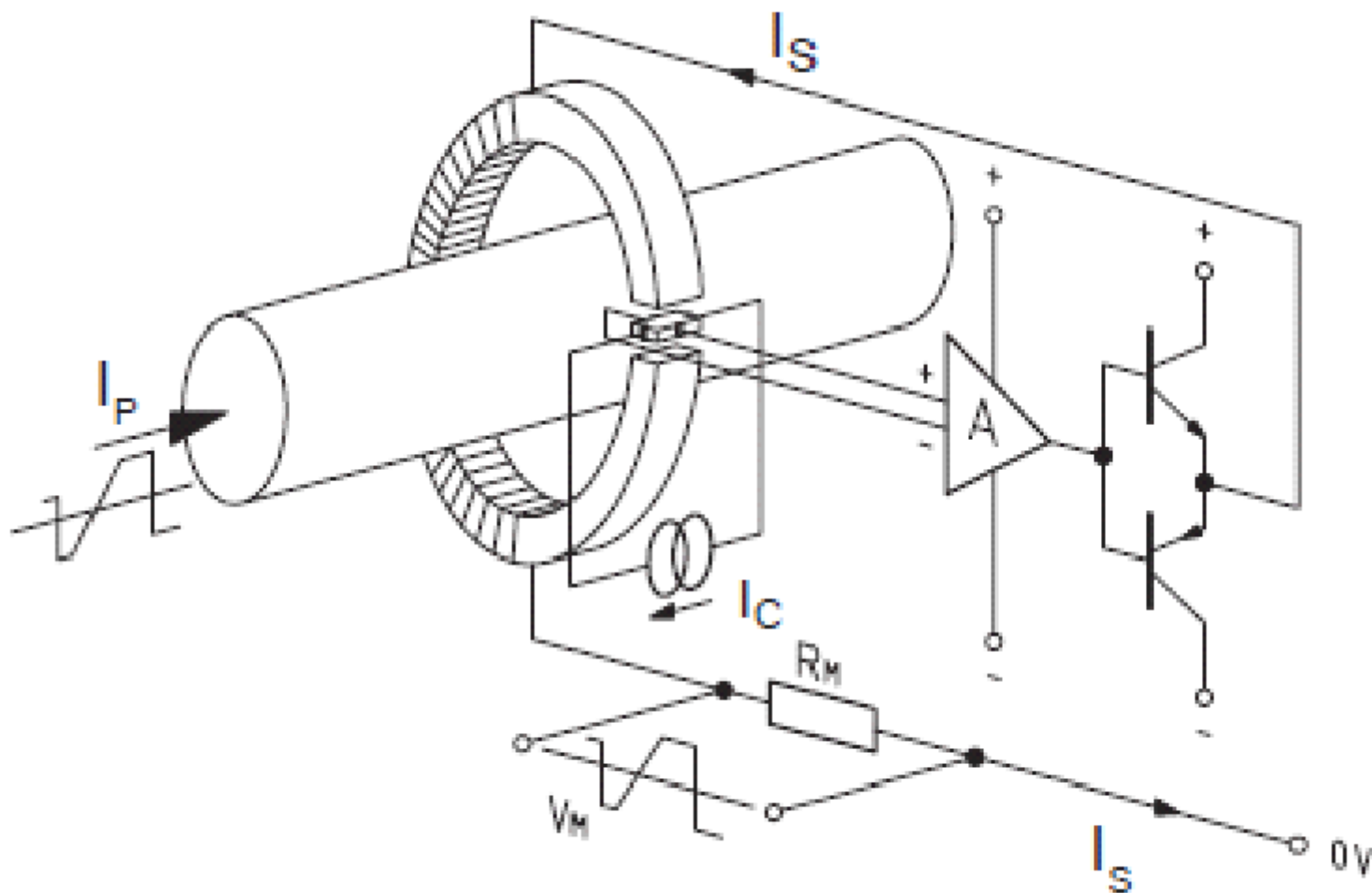
Magnetni fluks u procepu
kompenzovan tj $B=0$, $H=0$



MERENJE TRENUTNE VREDNOSTI STRUJE-LEM senzor



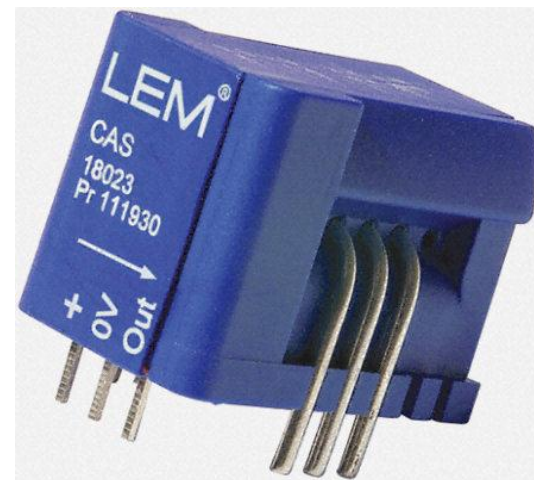
Precizno merenje trenutne vrednosti struje u širokom frekventnom opsegu (merenje veoma brzih pojava na nivou 100-200ns se ostvaruje strujnim LEM modulima). Glavni deo davača predstavlja Holov senzor koji se stavlja u procep torusa kroz koji se provlači provodnik čija se struja meri. Senzor se napaja sa eksternim naponom (tipično $\pm 12\text{VDC}$), a na izlazu daje napon koji je proporcionalan indukciji u procepu odnosno vrednosti primarne struje. Signal sa senzora se pojačava i vodi na izlazni tranzistorski stepen (naponski sleditelj) koji se pobuđuje u ritmu napona na senzoru. Izlazni tranzistori ustvari napajaju namotaj na torusu tako da kompenzuju struju primara te je magnetno polje u vazдушnom procepu jednako nuli. Na otporniku se meri ova kompenzujuća struja koja je preslikana struja primara u odnosu. Prednost ovog davača sa povratnom spregom je što nema problema vezanih za zasićenje magnetnog materijala torusa i što je propusni opseg davača od DC do par stotina MHz (tipično do 200MHz). **Proticanjem kompenzacione struje kroz merni otpornik dobija se željeni napon na izlazu davača.**



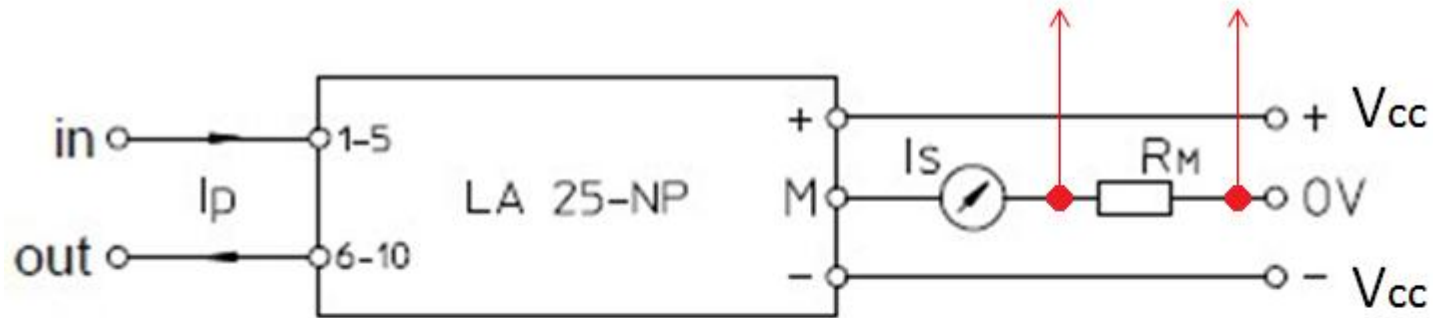
3D prikaz merenja struje sa strujnim LEM modulom sa povratnom spregom

Napon V_M je proporcionalan primarnoj struji, a njegov talasni oblik je neizobličen (propusni opseg LEM strujnog davača DC-200MHz).

IZGLEDI POJEDNIH STRUJNIH LEM MODULA

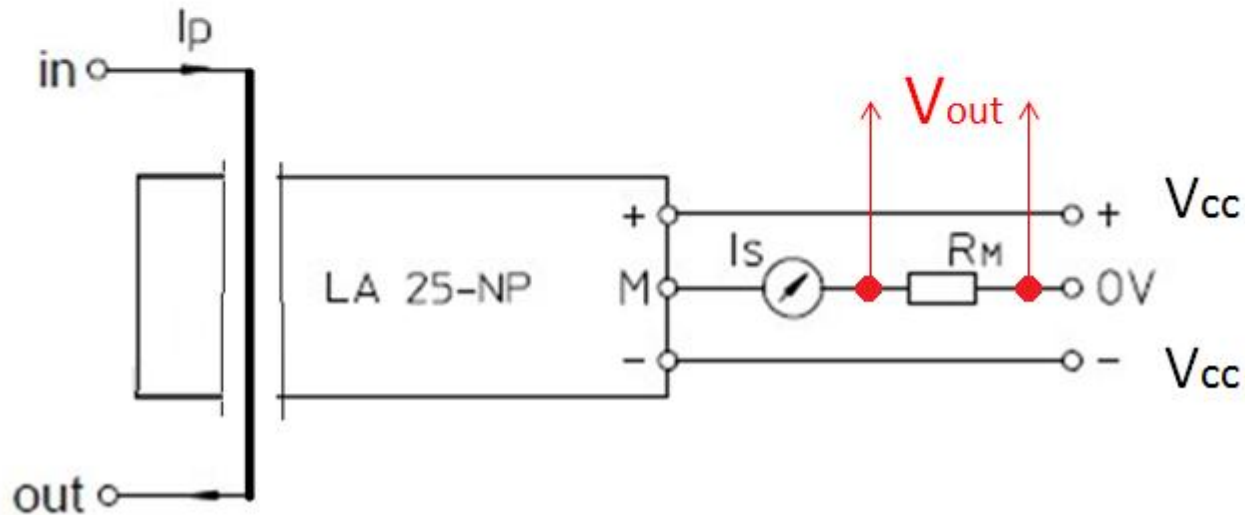


KAKO SE VEZUJE STRUJNI LEM?

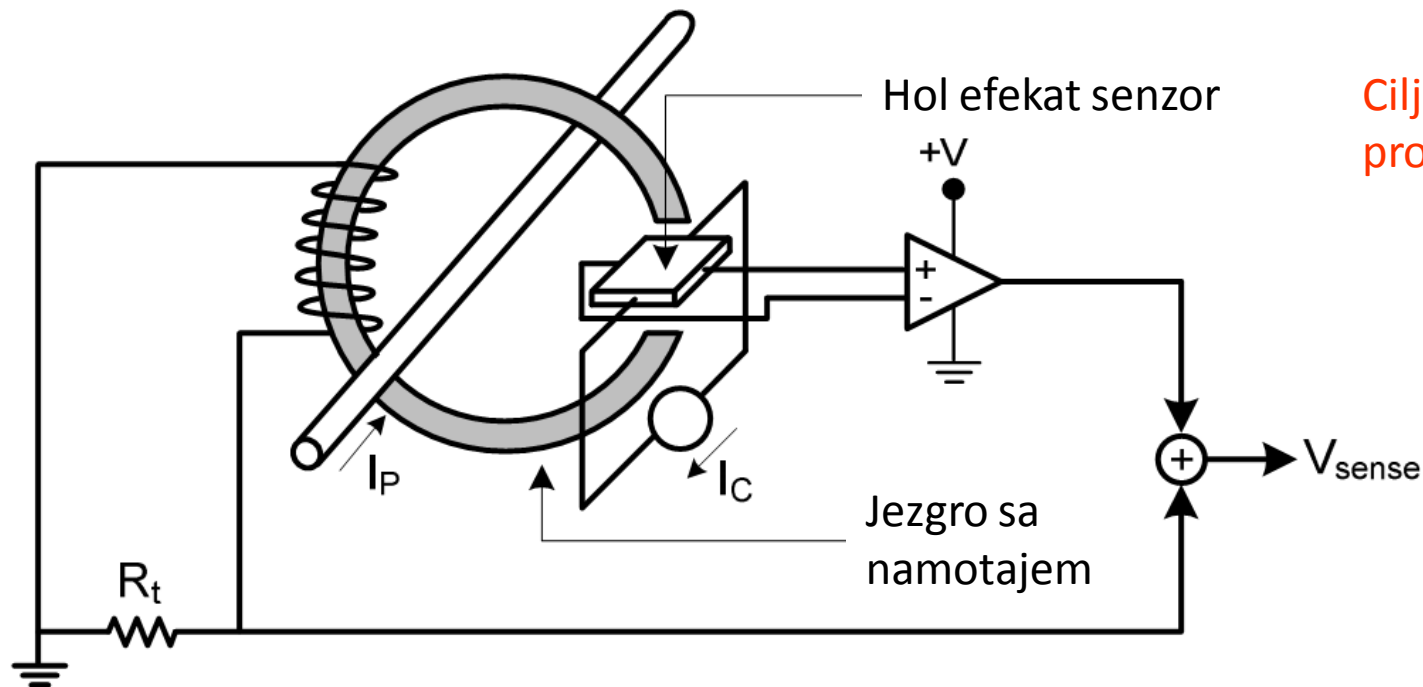


ili

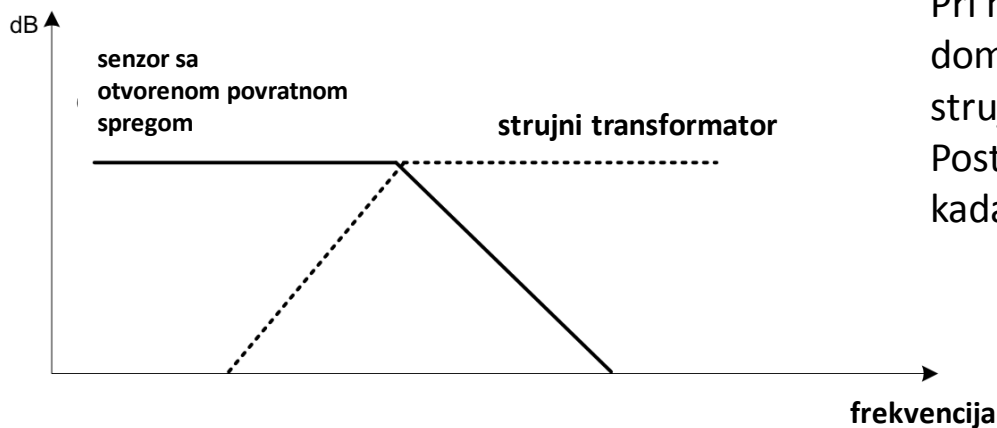
$$V_{out} = (I_p / N) \times R_M \leq V_{cc}$$



KOMBINACIJA HOLOVOG SENZORA U OTVORENOJ POVRATNOJ SPREZI I OBIČNOG STRUJNOG TRANSFORMATORA



Cilj: povećati
propusni opseg

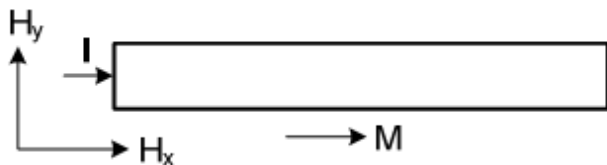


Pri nižim učestanostima
dominira senzor a pri višim
strujni transformator!!!
Postoji i oblast preklapanja
kada rade oba

MAGNETNO-REZISTIVNI STRUJNI SENZORI

- Svi provodni materijali su na nekinačin magnetno rezistivni, odnosno magneto-otporni
- Naročito se to odnosi na leguru gvožđa i nikla PERMALLOYS (Fe-Ni), ali i na druge feromagnetne materijale
- Magnetni otpornik je elemenat sa dva kraja koji menja svoju otpornost u zavisnosti od primenjenog magnetnog polja
- Kako izgleda ta promena?

PROMENA OTPORNOSTI U ZAVISNOSTI OD PRIMENJENOG POLJA



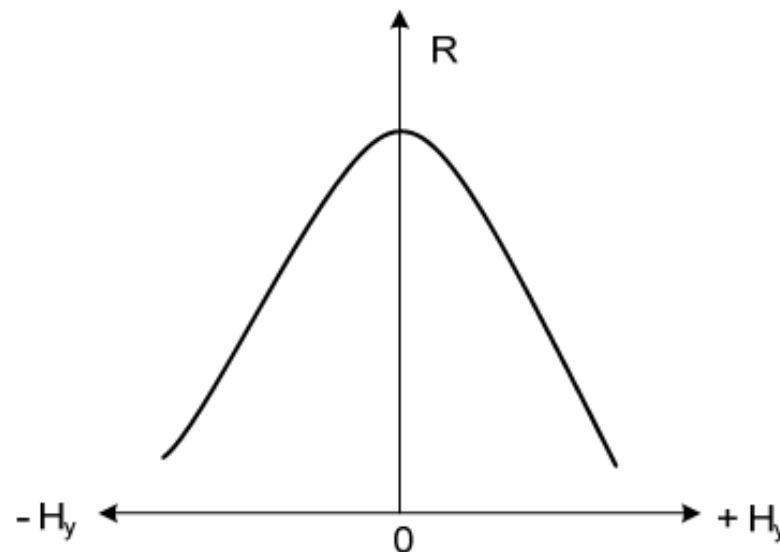
M je rezultatna magnetizacija koja potiče od H_x i H_y .

Primenjeno magnetno polje H_y (H_x je eksterno ili interno magnetno polje) "prožima" magneto-otporni materijal

Ovi materijali su značajno osetljiviji od Holovih senzora.

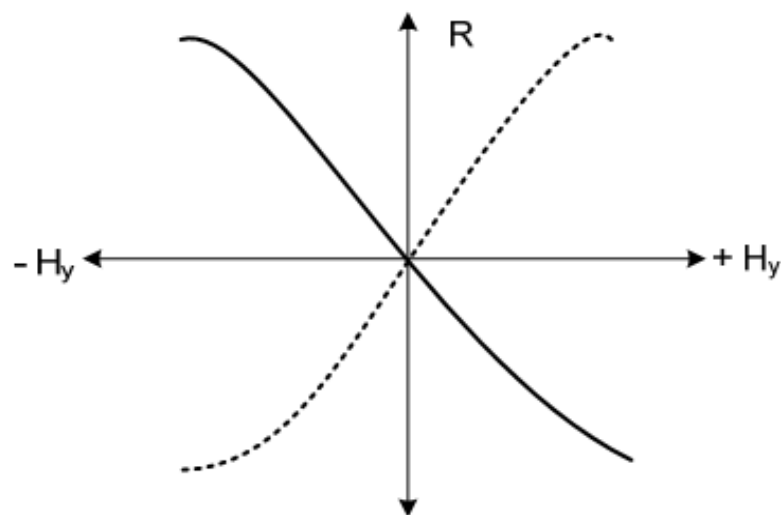
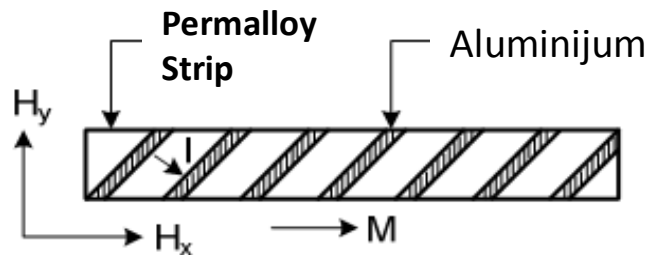
H_y je spregnuto sa materijalom i menja njegovu otpornost koja se meri na osnovu struje I koja protiče kroz njega.

Osetljivost senzora se kontroliše sa H_x



Promena otpornosti materijala u zavisnosti od Y- komponente polja

KADA SU STRUJA I I MAGNETIZACIJA M PARALELNE OTPORNOST MATERIJALA JE NAJVEĆA!!! KADA SU ONE POD UGLOM OD 90° , TADA JE ONA NAJMANJA!!!

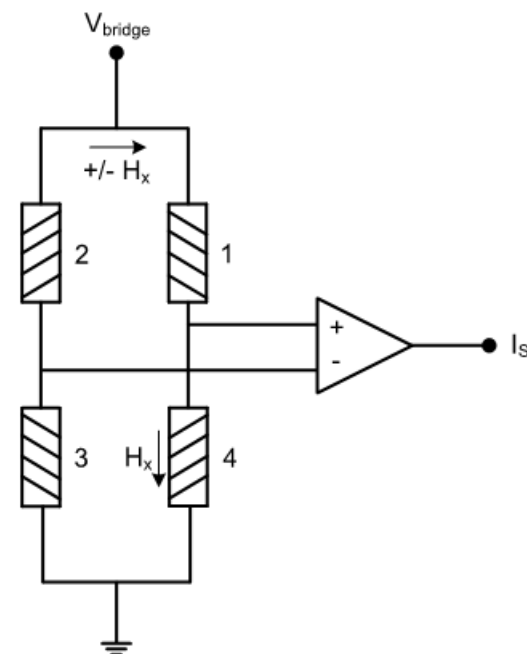


Da bi se detektovala promena smera polja (rešenje u prethodno opisanom slučaju to ne može) primenjuje se tzv. BRBERPOLE konstrukcija sa aluminijumom (Al).

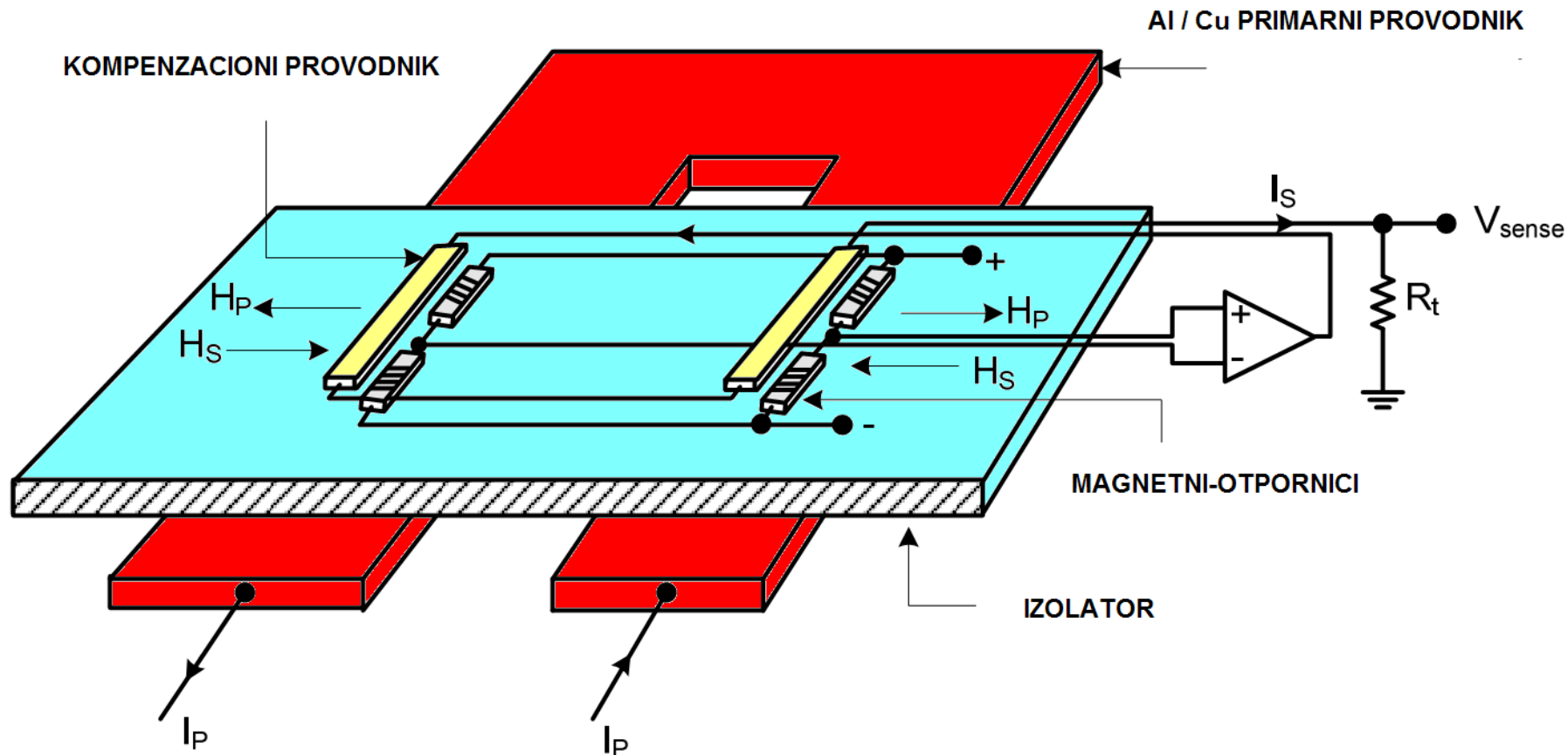
Promena otpornosti za oba smera polja je data na slici desno.

Pri merenju se primenjuje most sa kojeg se uzima signal kao na slici.

Magnetni otpornici 1 i 3 su sa zakrenutom Al trakom od $+45^\circ$, dok je kod 2 i 4 taj ugao -45° .



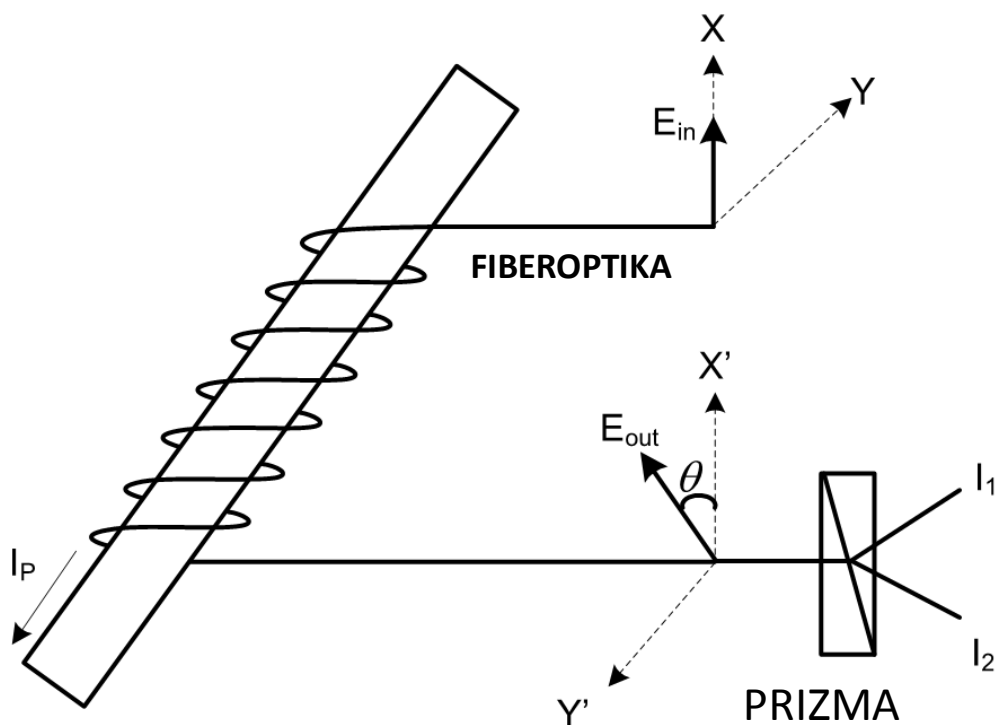
TIPIČAN INDUSTRIJSKI MAGNETO-OTPORNI DAVAČ STRUJE



Izlaz Vitstonovog mosta se vodi na ulaz OP pojačavača koji generiše kompenzacionu struju I_S . Struja I_S protiče kroz aluminijumske provodnike i stvara magnetno polje koje kompenzuje magnetno polje primarne struje I_P . Izlazni napon mosta je oko nulte vrednosti. Stoga je nelinearnost senzora minimizirana. Struja I_S se meri na otporu R_t i napon na njemu je proporcionalan struji I_P . Ovakav senzor može da meri sa galvanskom izolacijom, AC ili DC primarnu struju I_P . Propusni opseg ove tehnike je do 100kHz.

FIBEROPTIČKI STRUJNI SENZORI

Bazirani su na Faradejevom efektu: *kada se polarizovana monohromatska svetlost prostire paralelno magnetnom polju SMER POLARIZACIJE ROTIRA kao na slici.*



Polarizacioni ugao je proporcionalan magnetnom polju optičkog puta

Ugaona rotacija je :

$$\theta = VBl$$

V- Vredetova konstanta (karakteristika materijala)
B-gustina magnetnog fluksa (indukcija)
l- dužina fiberoptičkog strujnog senzora izloženog magnetnom polju

Polarizacioni ugao zavisi i od talasne dužine svetlosti i od fiber materijala

MERENJE NAPONA

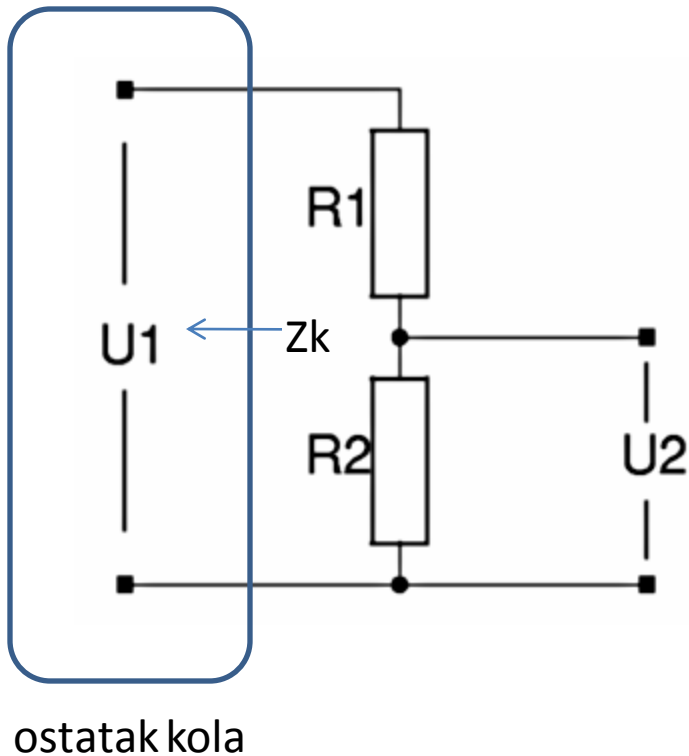
- Merenje napona u kolima monitoringa električnih mašina i u regulisanim elektromotornim pogonima ne predstavlja neki naročiti problem
- Obično se kao senzor koristi razdelnik napona čija je impedansa (otpori u njemu) mnogo veća od impedanse ostatka kola u koji se postavlja
- Problem se javlja ako želimo merenje napona sa galvanskom izolacijom, što se naročito traži pri merenjima na visokim naponima ($>1\text{kV}$)
- Savremeni senzori za merenje visokih napona su bazirani na naponskim LEM modulima

RAZDELNICI NAPONA

- Merenje jednosmernog i naizmeničnog napona
- Nema galvanskog odvajanja
- Mogu biti otpornički i kapacitivni
- Otpornički unose manje fazno kašnjenje
- Kapacitivni stvaraju manje gubitke
- Treba imati u vidu ulaznu impedansu mernog pretvarača



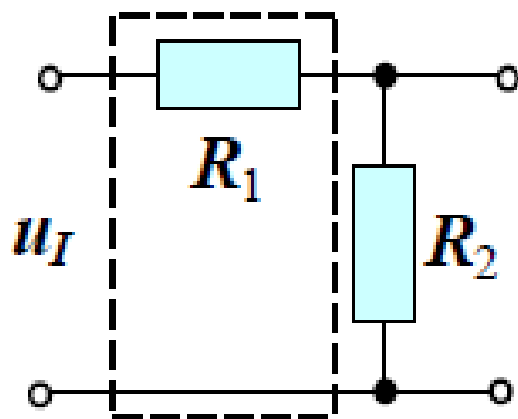
PRENOSNI ODNOS RAZDELNIKA NAPONA?



- $U_2 = U_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$
- R_1, R_2 moraju biti mnogo veći od impedanse ostatka kola
- Samo u tom slučaju struja razdelnika je beznačajna i samim tim merenje je tačnije

KAKO SE DALJE OBRAĐUJE
IZMERENI NAPON U_2 ?

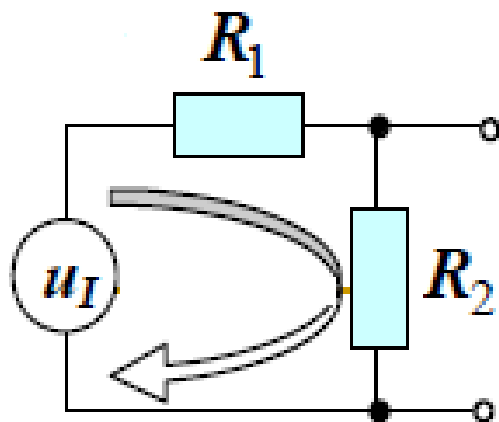
RAZDELNIK JE USTVARI PASIVNA **MREŽA SA DVA PRISTUPA KOD KOJE JE SNAGA NA IZLAZU MANJA OD SNAGE NA ULAZU** I ZA KOJU JE ODNOS TRENUTNIH VREDNOSTI NAPONA (STRUJA) NA IZLAZU I ULAZU STALAN.



Veličine otpora R_1 i R_2 zavise od željene vrednosti napona u_O

$$u_O = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_I$$

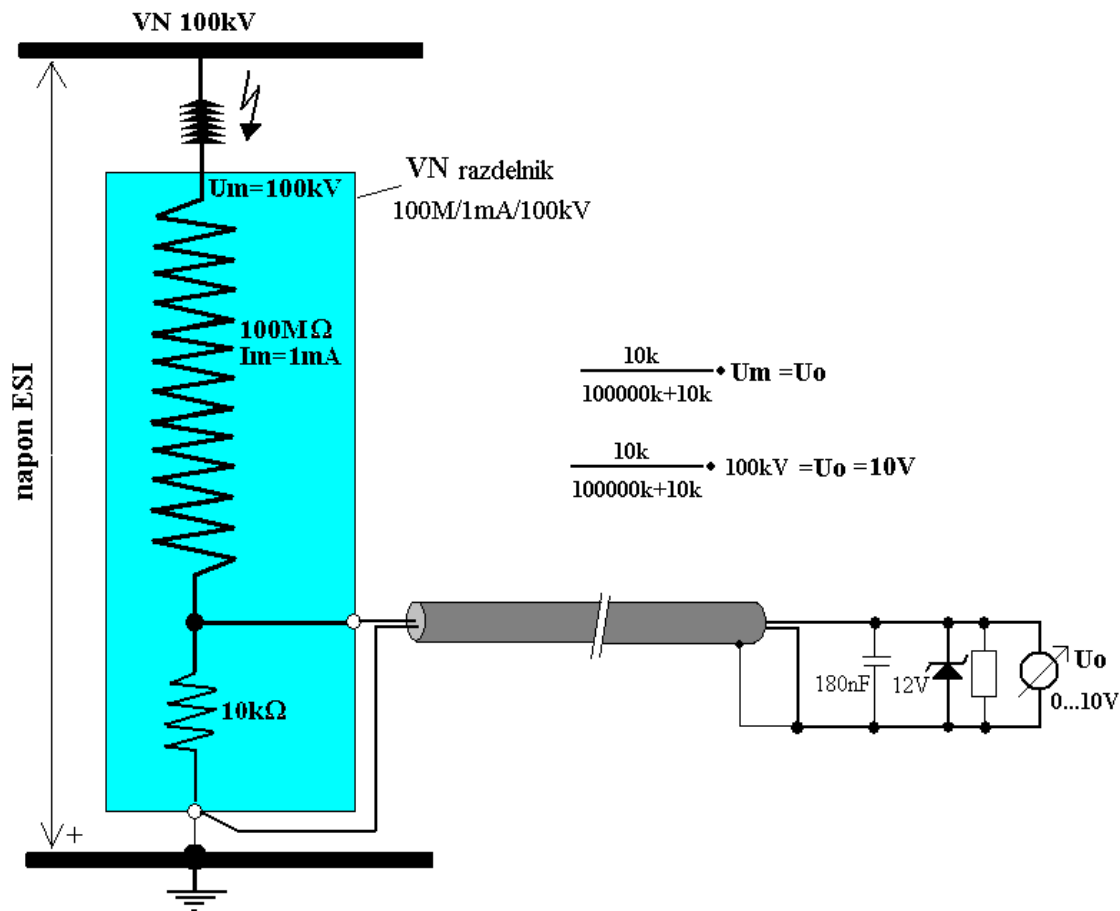
STRUJA
RAZDELNIKA



$$i = \frac{u_I}{R_1 + R_2}$$

$$u_O = R_2 i$$

Konvencionalno VN merenje



Standardno se problem merjenja visokog napona rešava **VN otporniškimi razdelnikom**, pri čemu je razdelnik sestavljen od dva otpornika kao što prikazuje slika. Gornji kraj VN otpornika je vezan preko VN izolatora na VN kraj (standardno 35kV, 100kV ...). Standardna vrednost ovog otpornika je $100\text{M}\Omega$, a nominalna struja 1mA . Otpornik koji je postavljen ka uzemljenom kraju elektroda ESI je značajno manje vrednosti i sa njega se vrši merenje napona na ESI prema odnosu razdelnika. Sa otpornika $10\text{k}\Omega$ se vodi naponski signal oklopljenim ("širmovanim") kablom do mernog instrumenta ili do ulaska u digitalni kontroler.

KAKO TO IZGLEDA U STVARNOSTI??



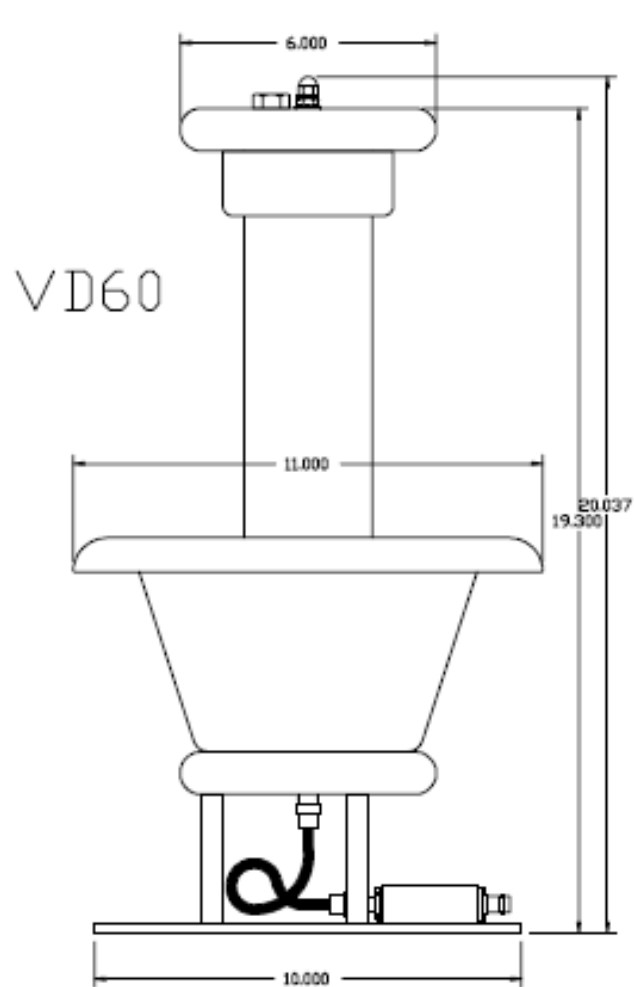
VN razdelnik



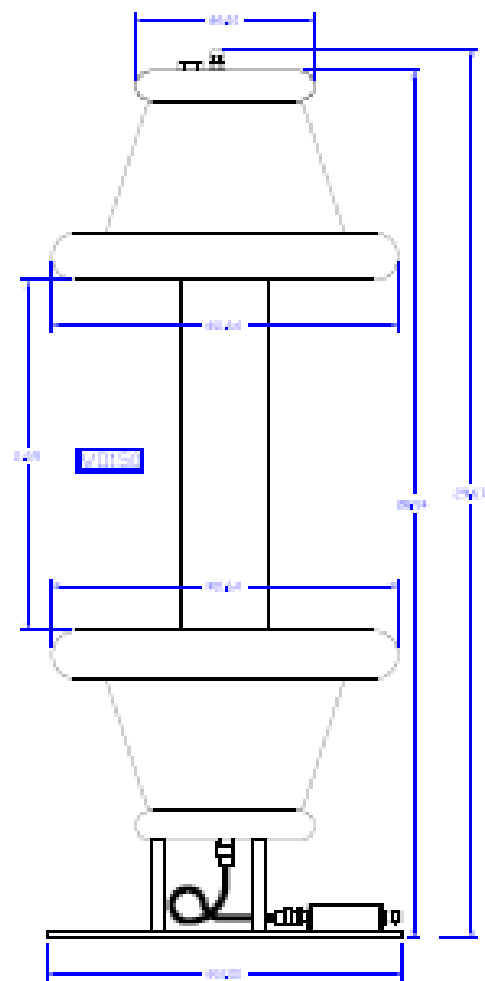
Transmitter

Uglavnom su prenosni odnosi razdelnika 1:1000 ili 1:2000 i u tom slučaju se koristi odgovarajući transmitter koji normalizuje signal visokog napona ESI na nivo 0-10V.

Svi ovi sistemi se odlikuju značajnim dimenzijama, a stoga i cenom. Pored ovoga oni zahtevaju specijalne uslove za montažu zbog svog specifičnog oblika



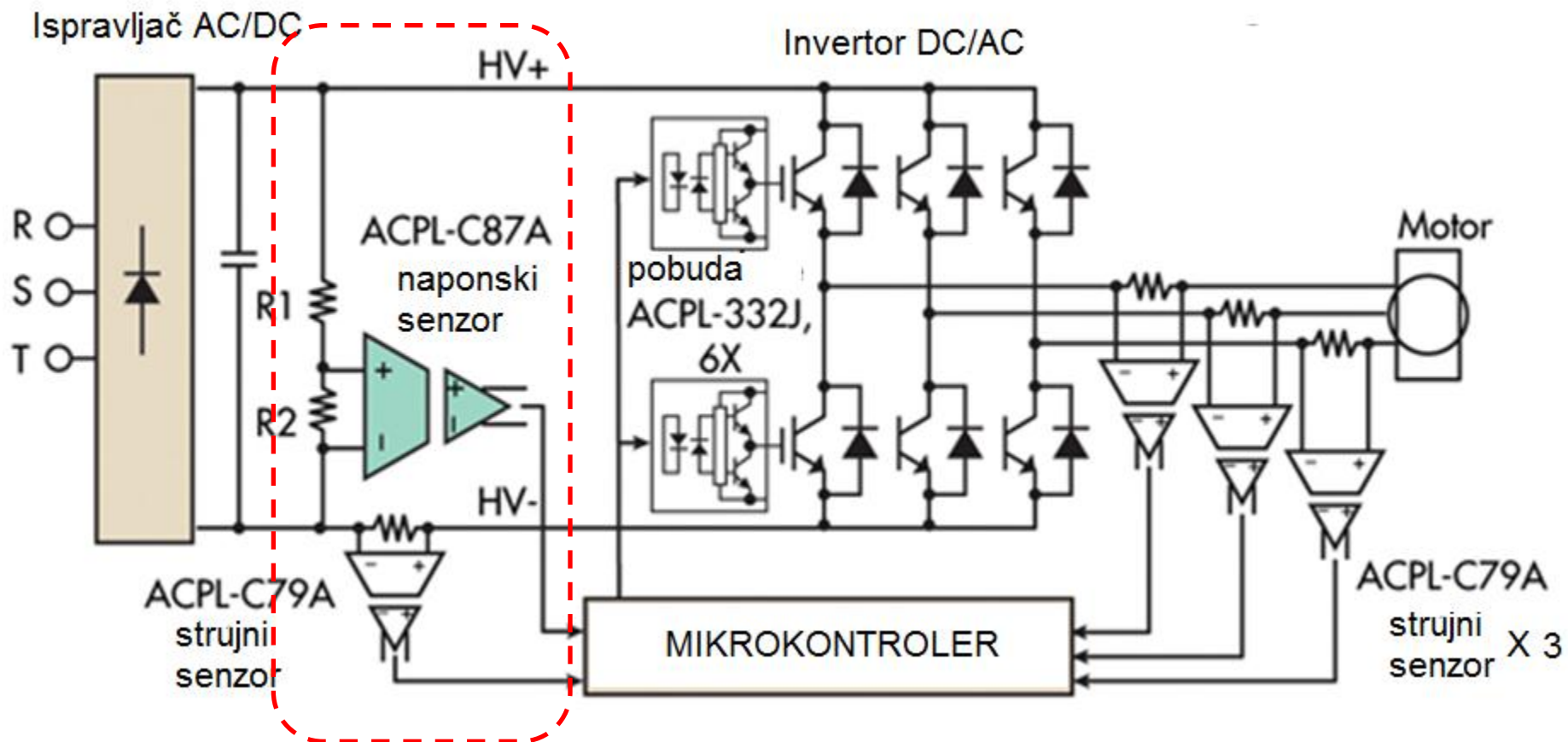
(a)



(b)

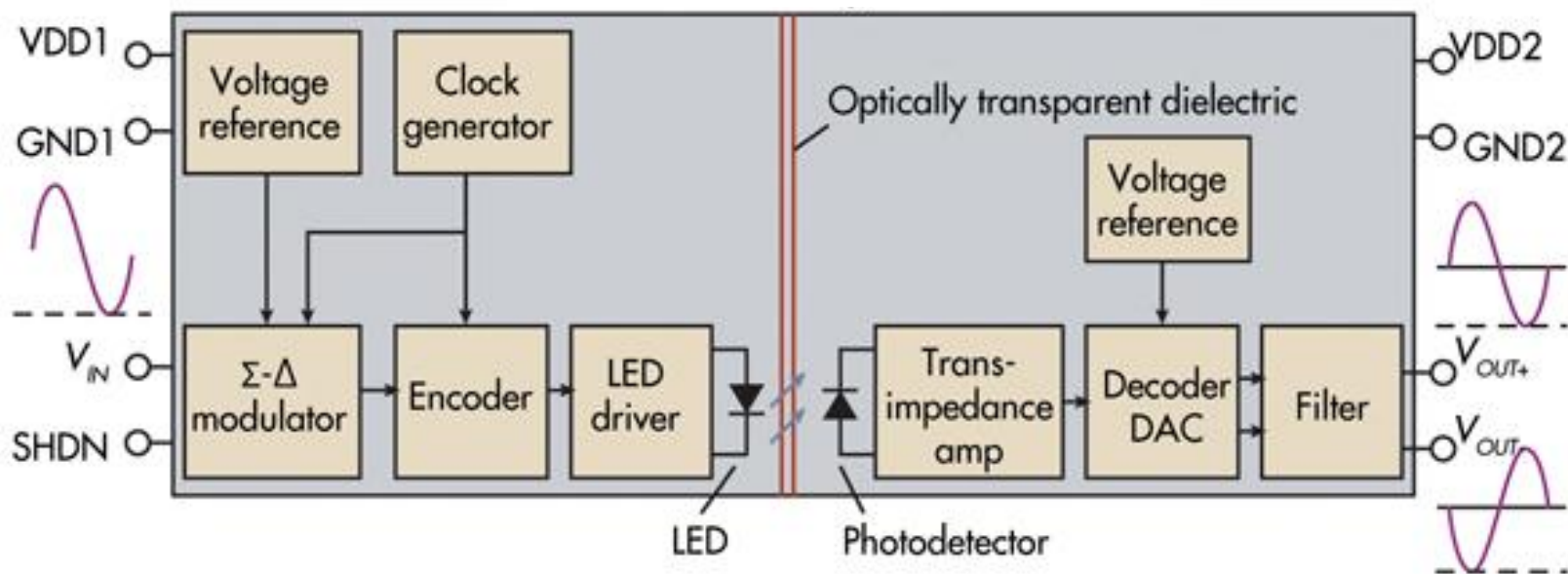
VN razdelnici firme North Star high Voltage, (a) tip VD60 za 60kV, (b) tip VD150 za 150kV

OPTOIZOLOVANO MERENJE VISOKOG NAPONA U DC MEĐUKOLU U REGULISANOM POGONA (frekventnog regulatora) AC MOTORA

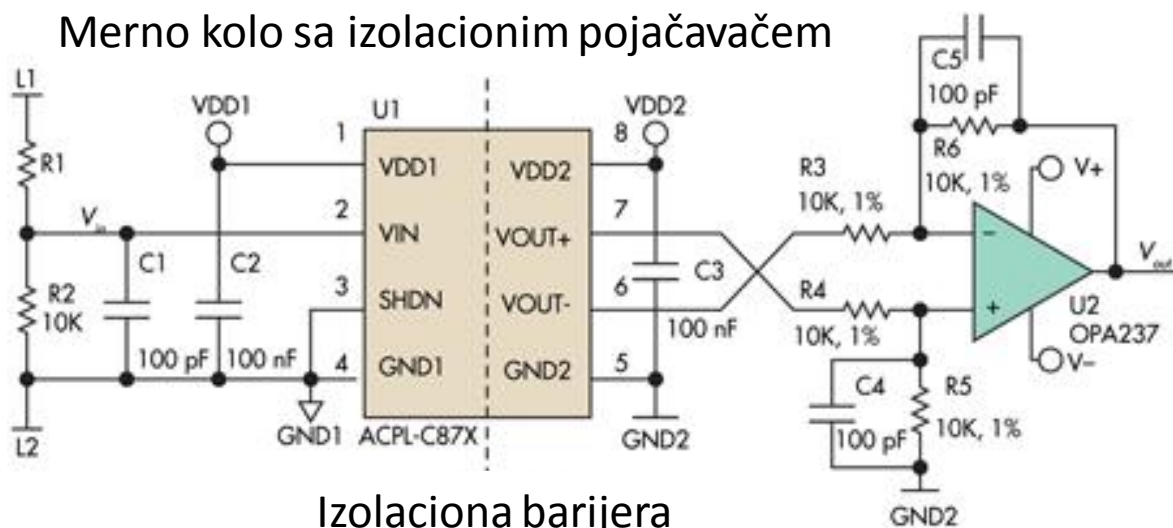


ACPL-C87A naponski senzor sa optoizolacijom koji koristi razdelnik u DC međukolu

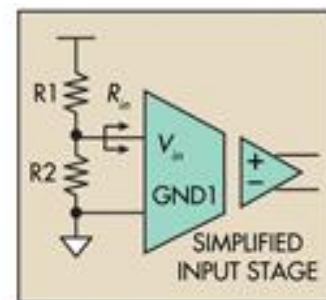
BLOK DIJAGRAM KOLA ACPL C87 X



Merno kolo sa izolacionim pojačavačem



Izolaciona barijera



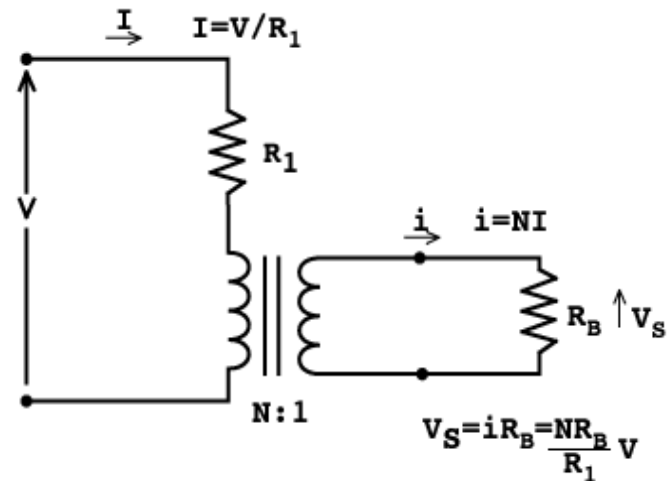
MERENJA NAPONA BAZIRANA NA Hall- EFEKTU

- Merenje jednosmernog i naizmeničnog napona
- Galvanska izolovanost
- Meri se struja kroz poznatu vrednost otpora
- Osetljiviji senzor struje, više navojaka na primarnoj strani
- Problemi sa disipacijom
- Problemi sa promenom otpora usled zagrevanja

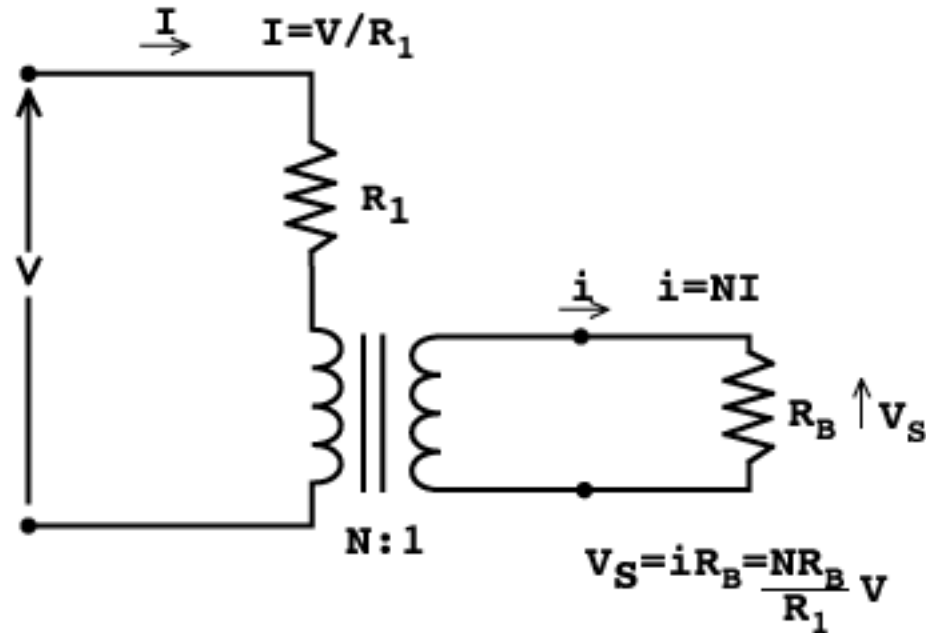


LEM – NAPONSKI PRETVARAČ

- LEM (Švajcarska firma-LEM: www.lem.com) naponski pretvarač konvertuje visoki napon u niski napon, uz izolaciju između VN izvora i signalnog NN izlaza.
- On omogućava dobijanje naponskog signala koji je u svakom trenutku proporcionalan primarnom naponu, i koji je pretvoren sa visokim kvalitetom bez izobličenja ali je istovremeno osiguran sa stanovišta bezbednosti u odnosu na VN.
- Ovo poslednje je veoma bitno sa stanovišta monitoringa energetske merenja i instrumentacije.



PRINCIP RADA NAPONSKOG PRETVARAČA

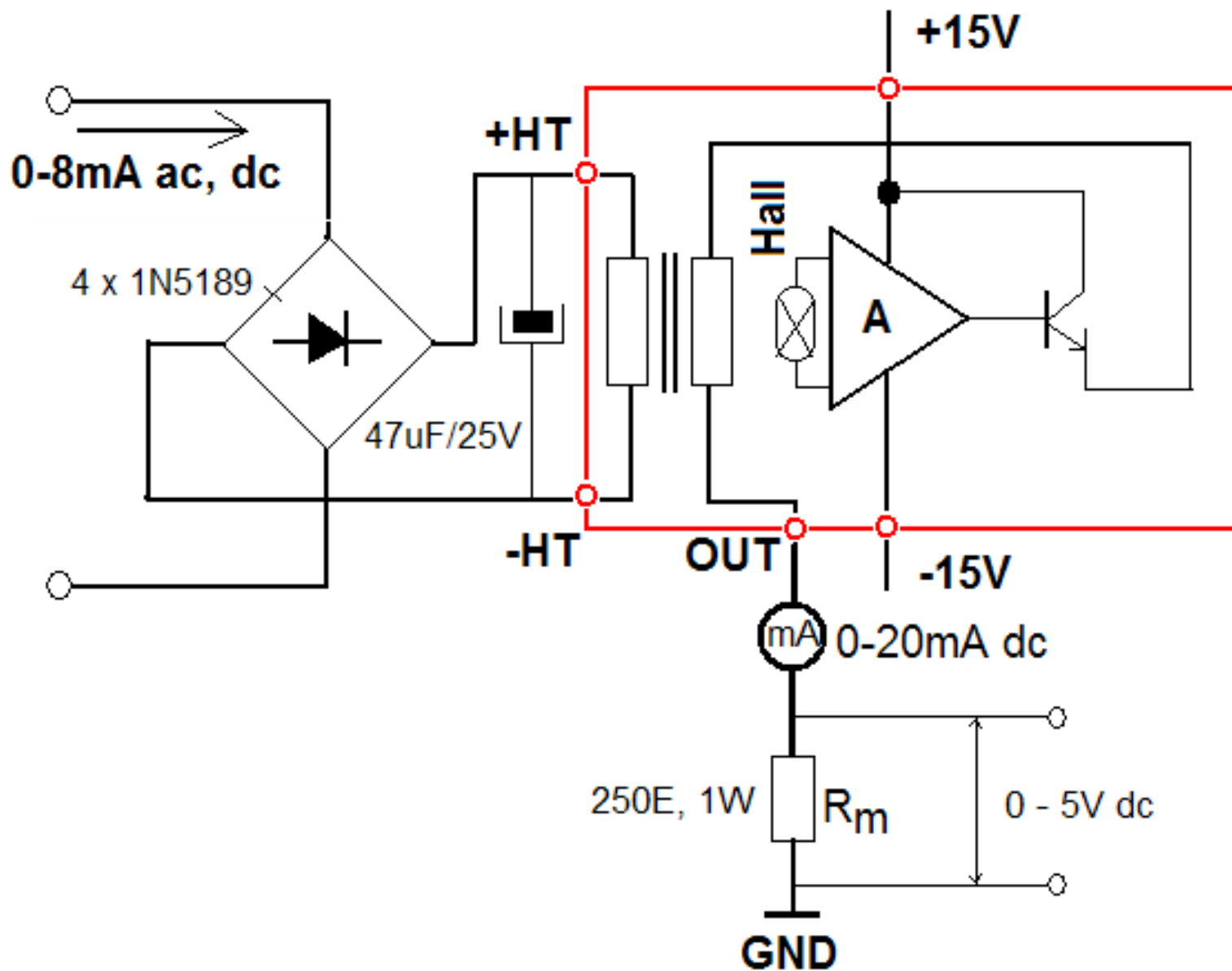


LEM naponski pretvarač ustvari koristi električno izolovani strujni senzor za merenje struje kroz jedan ili dva precizna visokonaponska otpornika koji se priključuju na visoki napon koji se meri. Signalno kolo je izolovano od primara, čak i ako se desi prekid na otpornicima u primaru.

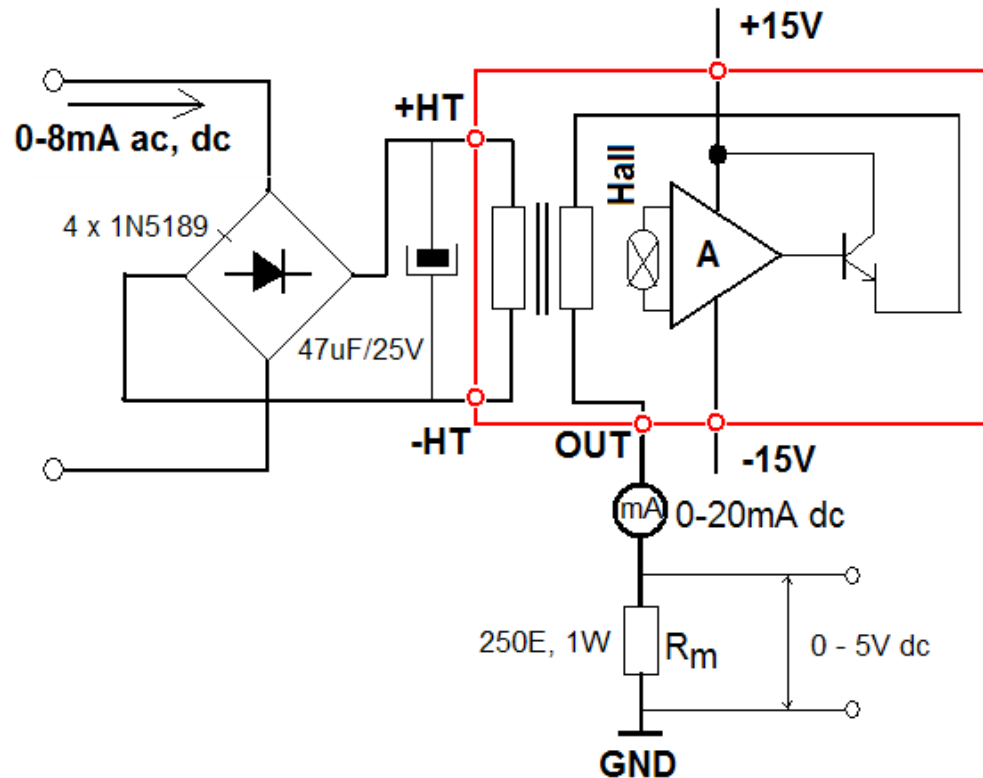
Za ulazni visoki napon V i redno vezan otpor R_1 , primarna struja je $I = V/R_1$.
PRIMER: $V = \pm 1000V$ i $R_1 = 0.5M$, tada je $I = \pm 2mA$. Disipacija na R_1 je $P_d = (2mA)^2 * 1M = 4W$. Ova snaga je gubitak u primarnom kolu. LEM pretvarač je veoma osetljiv (baš zato što se koristi otpornost).

KAKO SE POSTIŽE LINEARNOST NAPONSKOG PRETVARAČA?

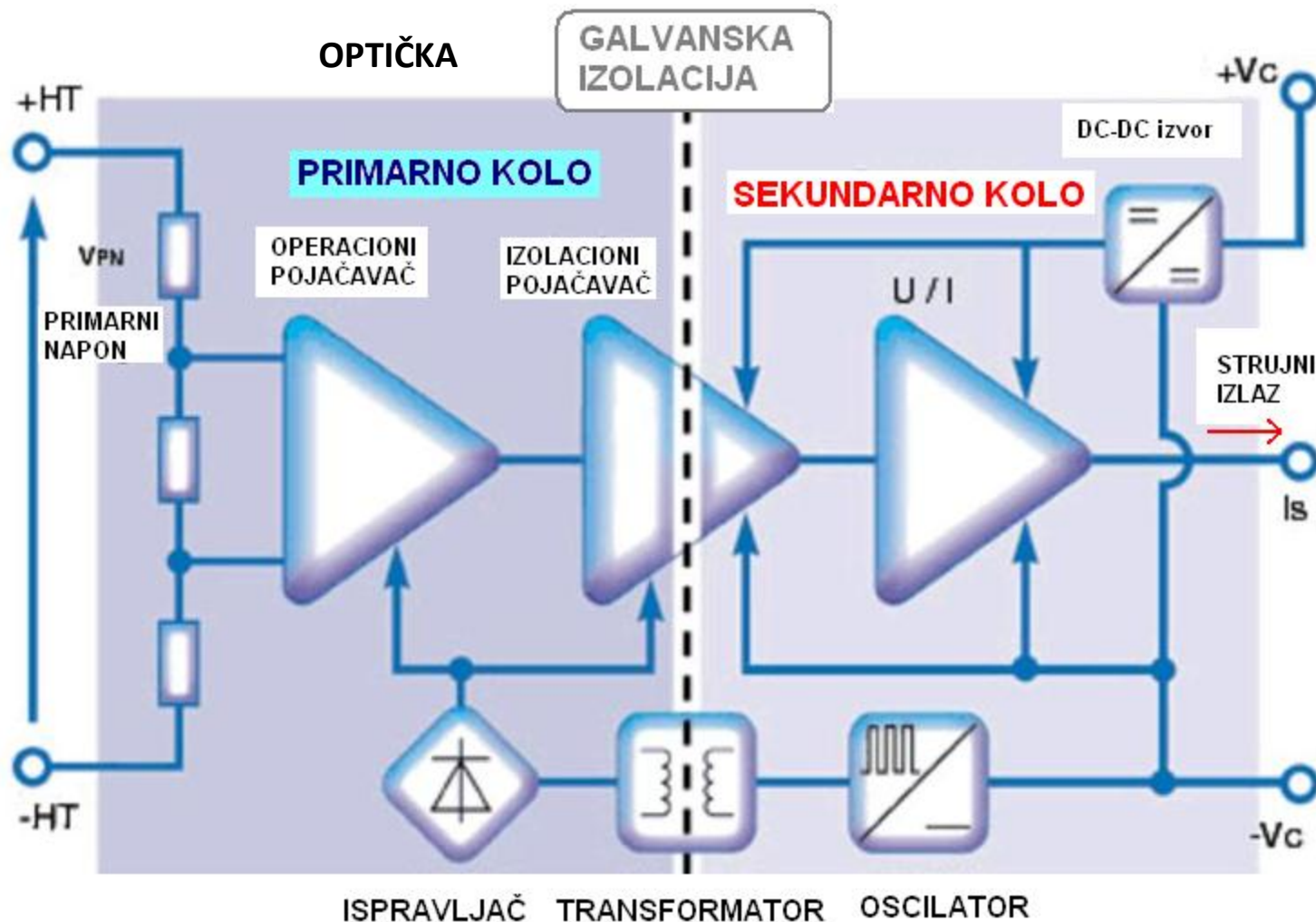
PRINCIPSKI BLOK DIAGRAM NAPONSKOG LEM MODULA



DOBIJANJE VISOKE LINEARNOSTI NAPONSKOG LEM MODULA

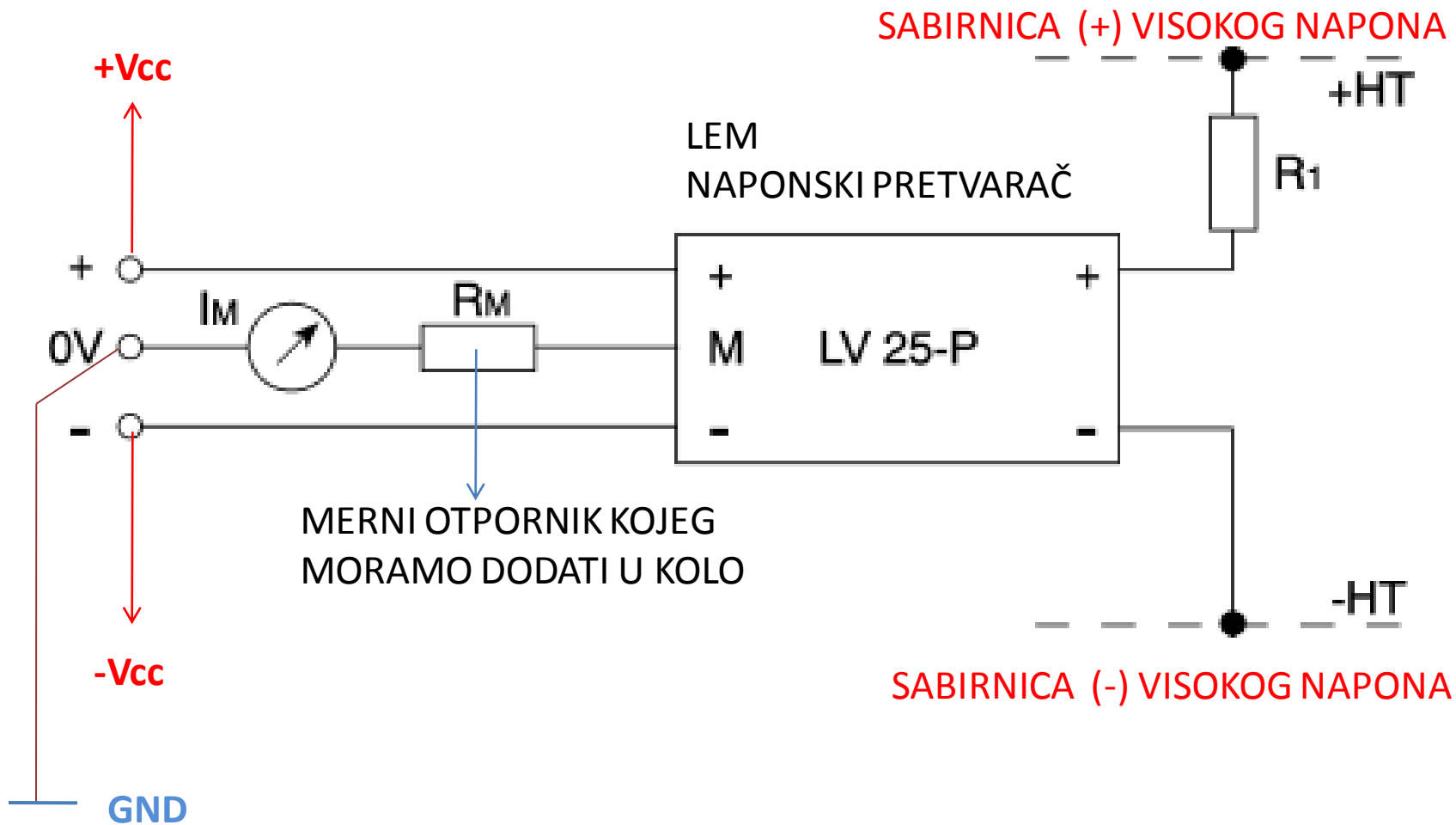


- Za dobijanje visoke linearnosti strujnog dela senzora, sam strujni senzor je izveden sa zatvorenim povratnom spregom ("closed loop") ili kompenzovanim magnetnim tipom gde se u magnetnom jezgru uvek održava fluks na vrednosti jednakoj nuli ili magnetno polje koje je jednako nuli.
- Korišćenjem više namotaja na primaru magnetnog jezgra, strujni senzor ima veoma veliku efektivnu osetljivost.
- LEM naponski pretvarač ima strujni senzor sa odnosom primarna struja / sekundarna struja od 1:1.5 do 1:20.



Merenje visokih napona LEM serije AV 100 koristi isključivo elektronske komponente od kojih je najbitnija IZOLACIONI OPERACIONI POJAČAVAČ. Mereni napon (V_p) je direktno primenjen na ulazni operacioni pojačavač ali preko interne otporne (razdelničke) mreže i dodatne elektronike za napajanje izolacionog pojačavača. U sekundarnom kolu se koristi U/I pretvarač koji daje strujni izlaz proporcionalan ulaznom naponu V_p . DC/DC pretvarač stabilizuje napajanje elektronike u sekundarnom kolu. Napon $+V_c$ i $-V_c$ se dovodi eksterno

KAKO SE VEZUJE NAPONSKI LEM?



LITERATURA

- J.H.Harlow: ***Electric power transformer engineering***, CRC Press
- Đ.Kalić, R.Radosavljević, ***TRANSFORMATORI***, II Izdanje , Beograd 2003
- **Current transformers, October 2013**
<http://meettechniek.info/instruments/current-transformer.html>
- **Introduction to Closed Loop Hall Effect Current Transducers**, Bodo Power Systems, 2013
<http://www.powerguru.org/closed-loop-hall-effect-current-transducers/>
- Hong Lei Chen, ***Isolated voltage sensing for safe control***, Avago Technologies, San Jose, Calif.
<http://machinedesign.com/energy/isolated-voltage-sensing-safe-control>

HVALA NA PAŽNJI!!!

PITANJA???



Beograd , Januar 2019

