

VIŠOKA ŠKOLA ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA STRUKOVNIH STUDIJA-
VIŠER, BEOGRAD

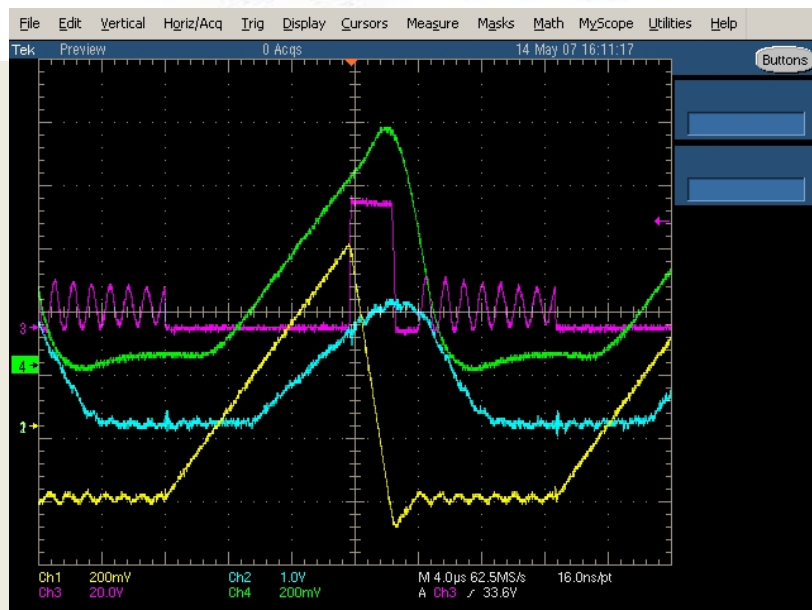
STUDIJSKI PROGRAM: NOVE ENERGETSKE TEHNOLOGIJE

SPECIALISTIČKE STUDIJE

PREDMET: UPRAVLJANJE ELEKTROENERGETSKIM PRETVARAČIMA



MERENJE NAPONA I STRUJE U KOLIMA ENERGETSKE ELEKTRONIKE



Predmetni profesor:

Dr Željko Despotović, dipl.el.inž

UVOD

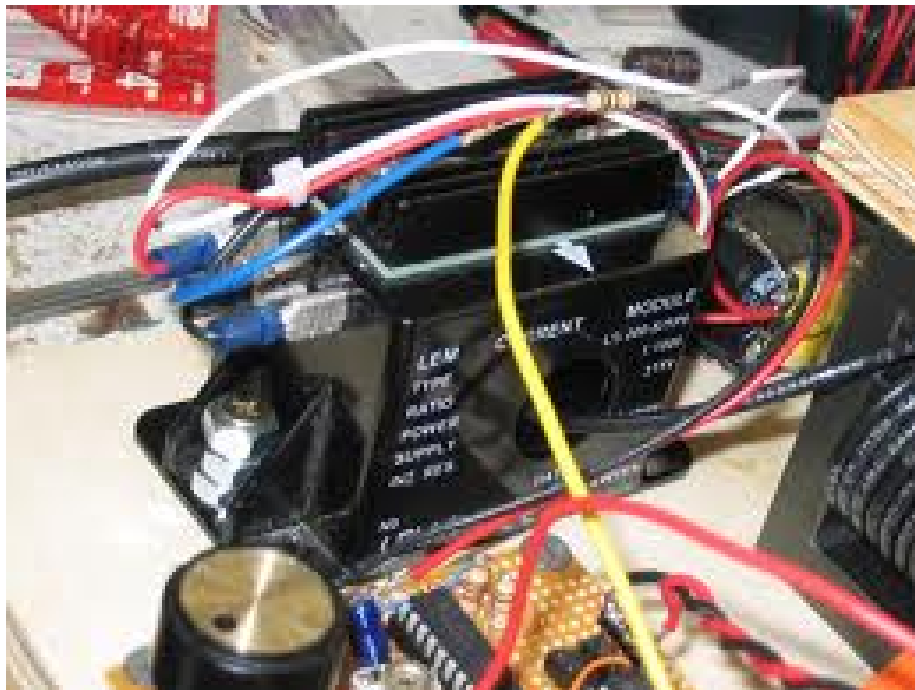
- Merenje napona i struje ima veliki značaj u kolima energetske elektronike, energetskom pretvaračima i regulisanim elektromotornim pogonima
- Ova merenja se koriste radi ostvarivanja nekoliko bitnih funkcija: kontrola, zaštita, monitoring, upravljanje snagom
- Veoma bitno je imati visoke performanse strujnih i naponskih senzora, da bi se ostvarile prethodno pomenute funkcije
- Koji su najbitniji parametri koje senzor mora imati, a koje utiču na povećanje njegovih performansi?

NAJZNAČAJNIJI PARAMETRI NAPONSKIH I STRUJNIH SENZORA

- 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 ugrađuje

PROUČAVANJE PRINCIPA MERENJA DVE NAJBITNIJE VELIČINE U ENERGETSKOJ ELEKTRONICI

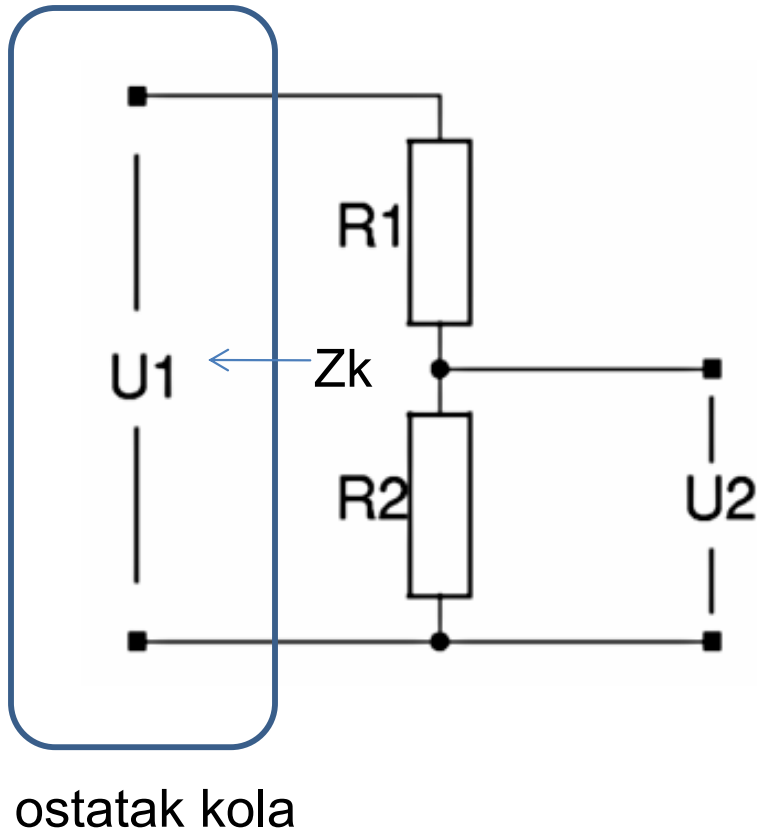
- MERENJE NAPONA
- MERENJE STRUJE



MERENJE NAPONA

- Merenje napona u kolima energetski elektronike 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

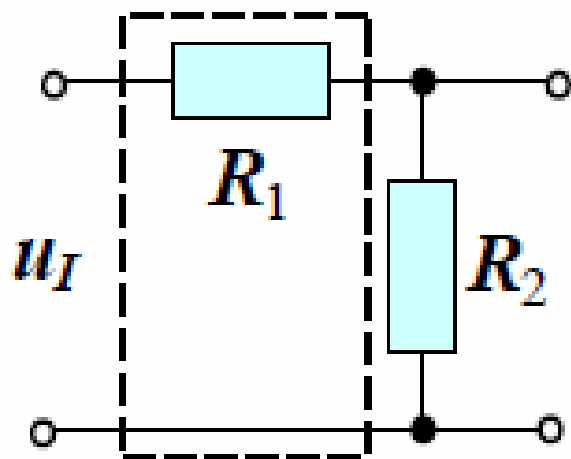
RAZDELNIK NAPONA



**KAKO SE DALJE OBRAĐUJE
IZMERENI NAPON U2?**

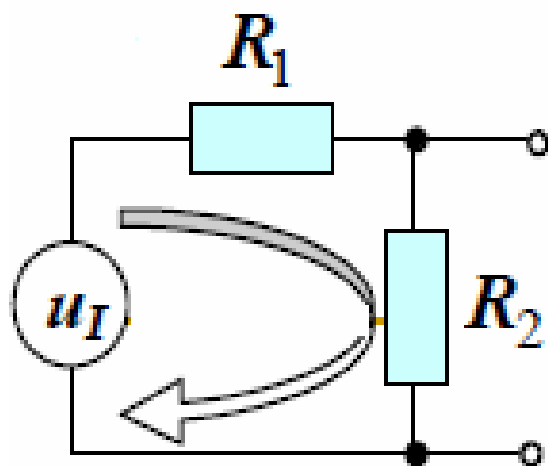
- $U2 = U1 \cdot R2 / (R1 + R2)$
- R1, R2 moraju biti mnogo veći od impedanse ostatka kola
- Samo u tom slučaju struja razdelnika je beznačajna i samim tim merenje je tačnije

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

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

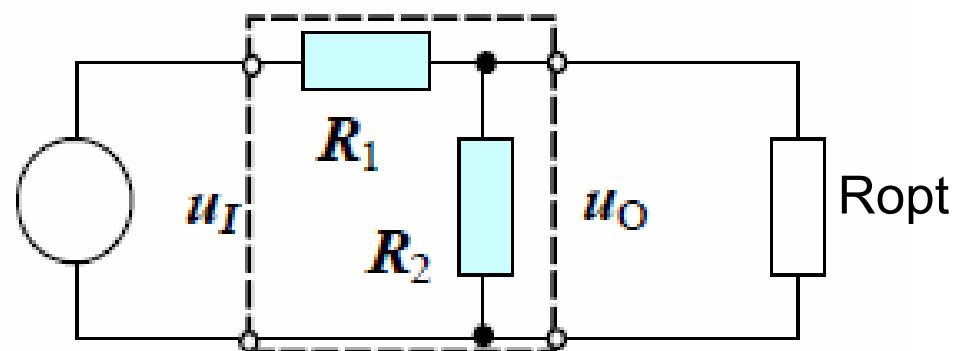
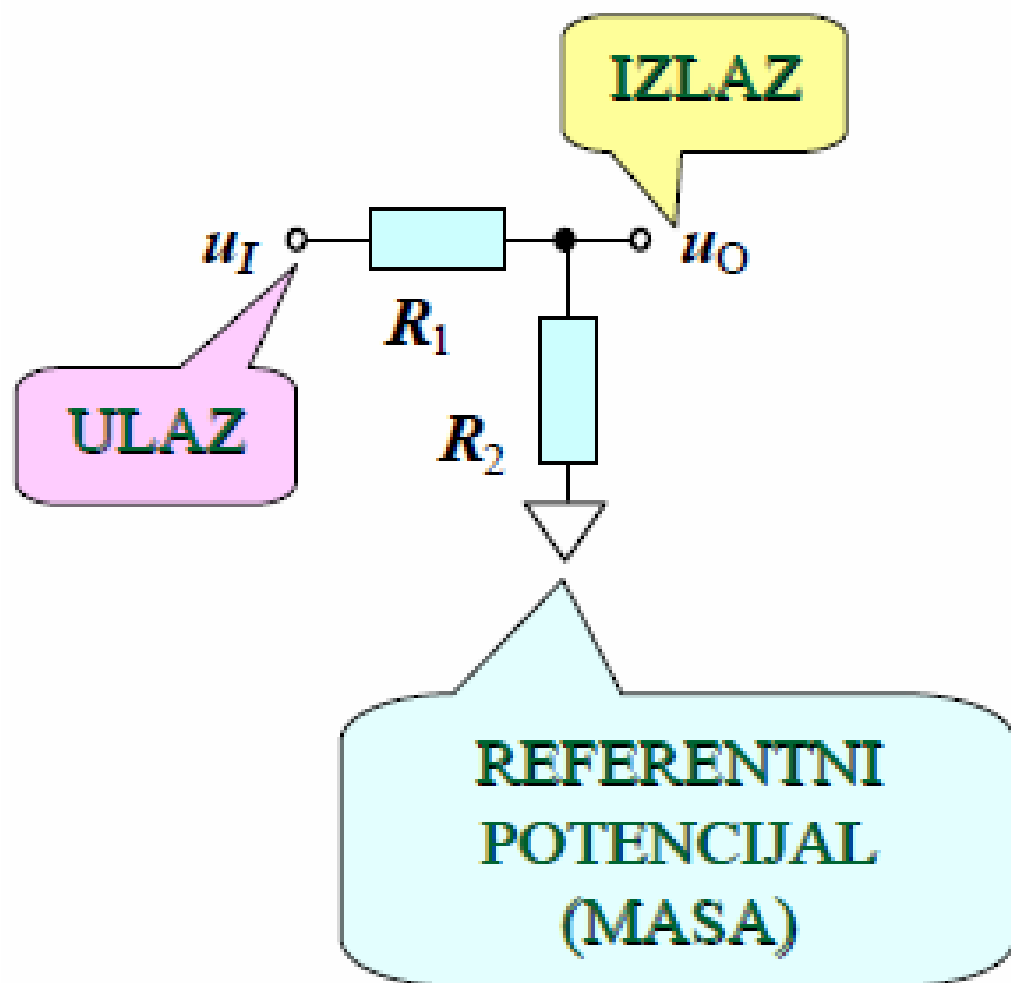


STRUJA
RAZDELNIKA

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

$$u_O = R_2 i$$

RAZDELNIK JE MREŽA SA DVA PRISTUPA ALI IMA TRI TAČKE!!!!



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

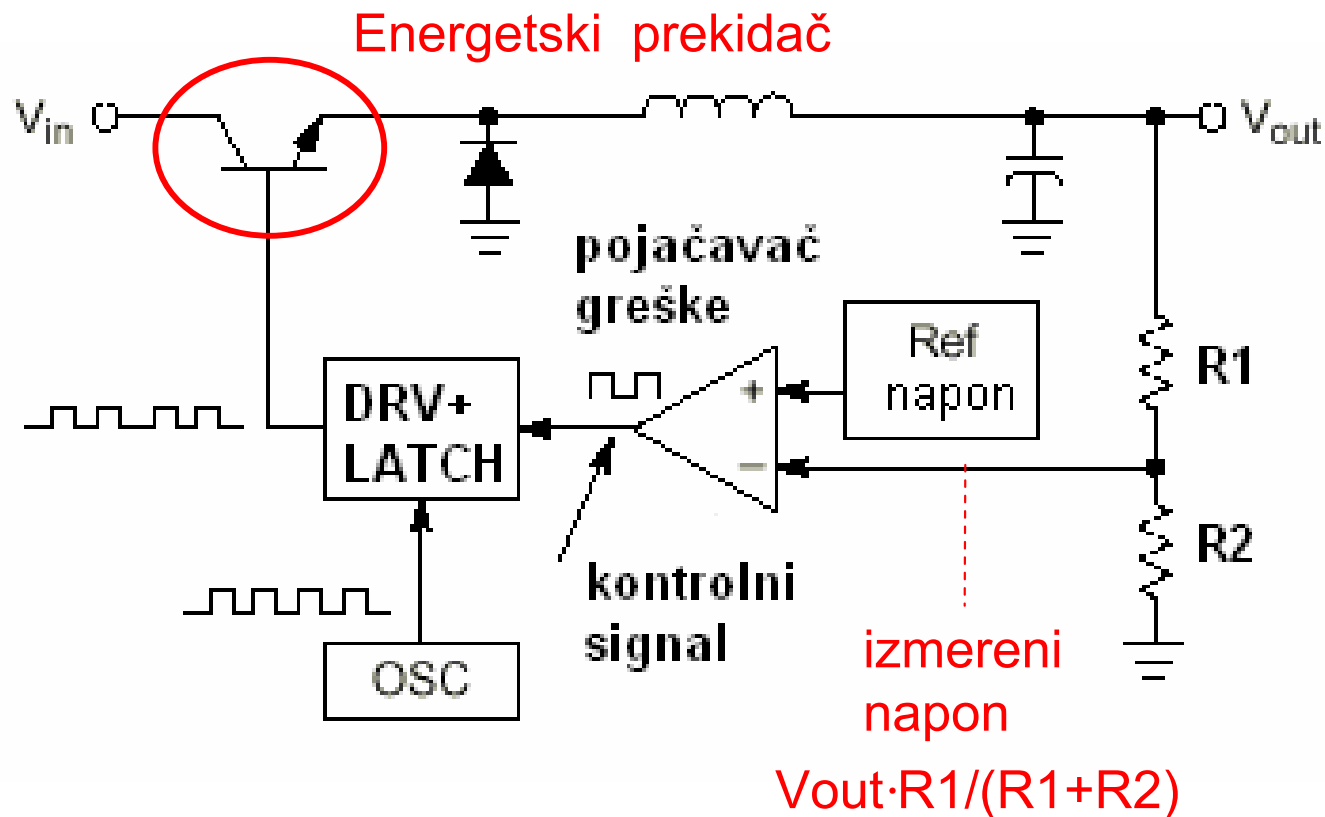
$R_1, R_2, R_1 + R_2$ moraju biti bar za red veličine veći od R_{opt} , odnosno od izlazne impedanse izvora U_i

Ulazna tačka

Izlazna tačka

Referentna (obično masa elektronike, ali nije pravilo)

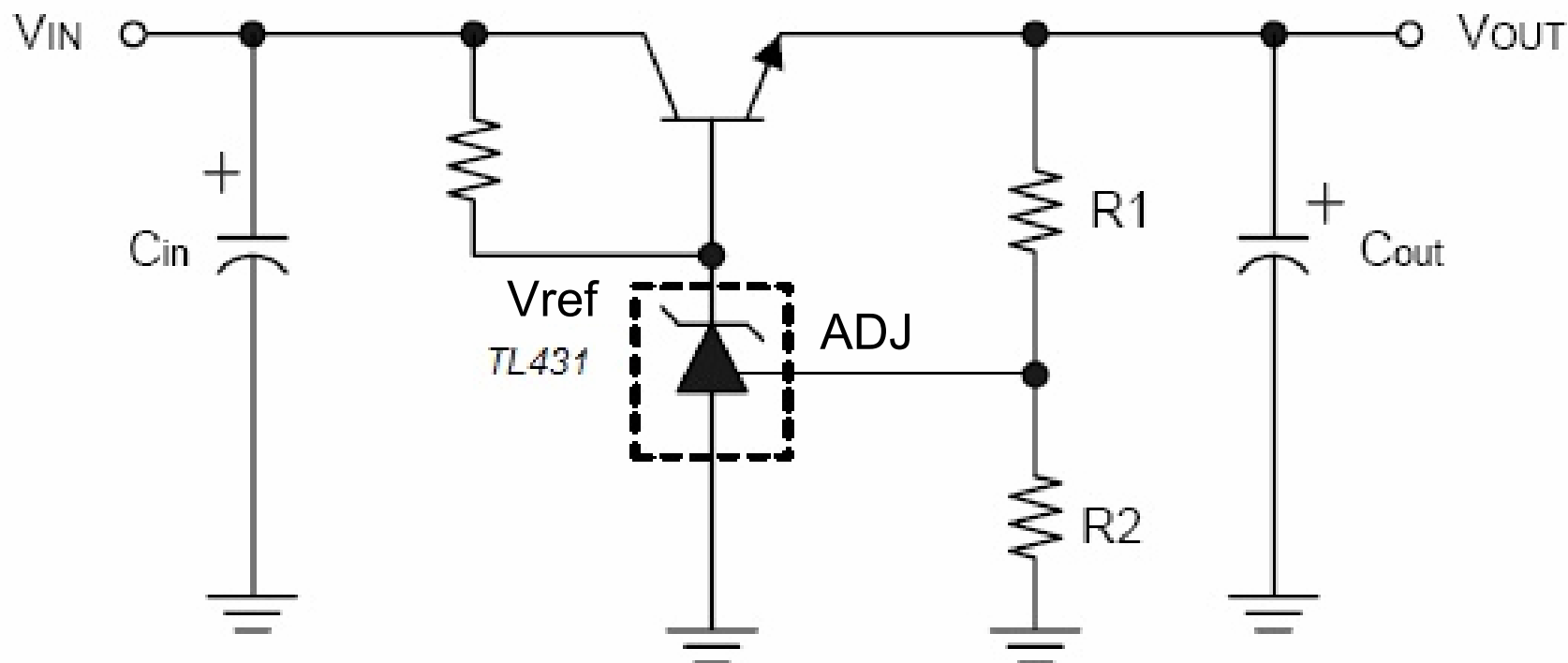
TIPIČNA PRIMENA RAZDELNIKA NAPONA



Izmereni napon sa razdelnika se poredi sa referentnim stabilnim naponom i na izlazu pojačavača naponske greške se dobija kontrolni signal, koji preko leč kola i drajvera pobuđuje energetski prekidač.

Ukoliko je V_{out} visok napon (ref napon je obično mali i tipično 2.5V) uzima se da je $R1 \gg R2$, ali $(R1 + R2) \gg$ izlazne otpornosti, odnosno otpornosti opterećenja)

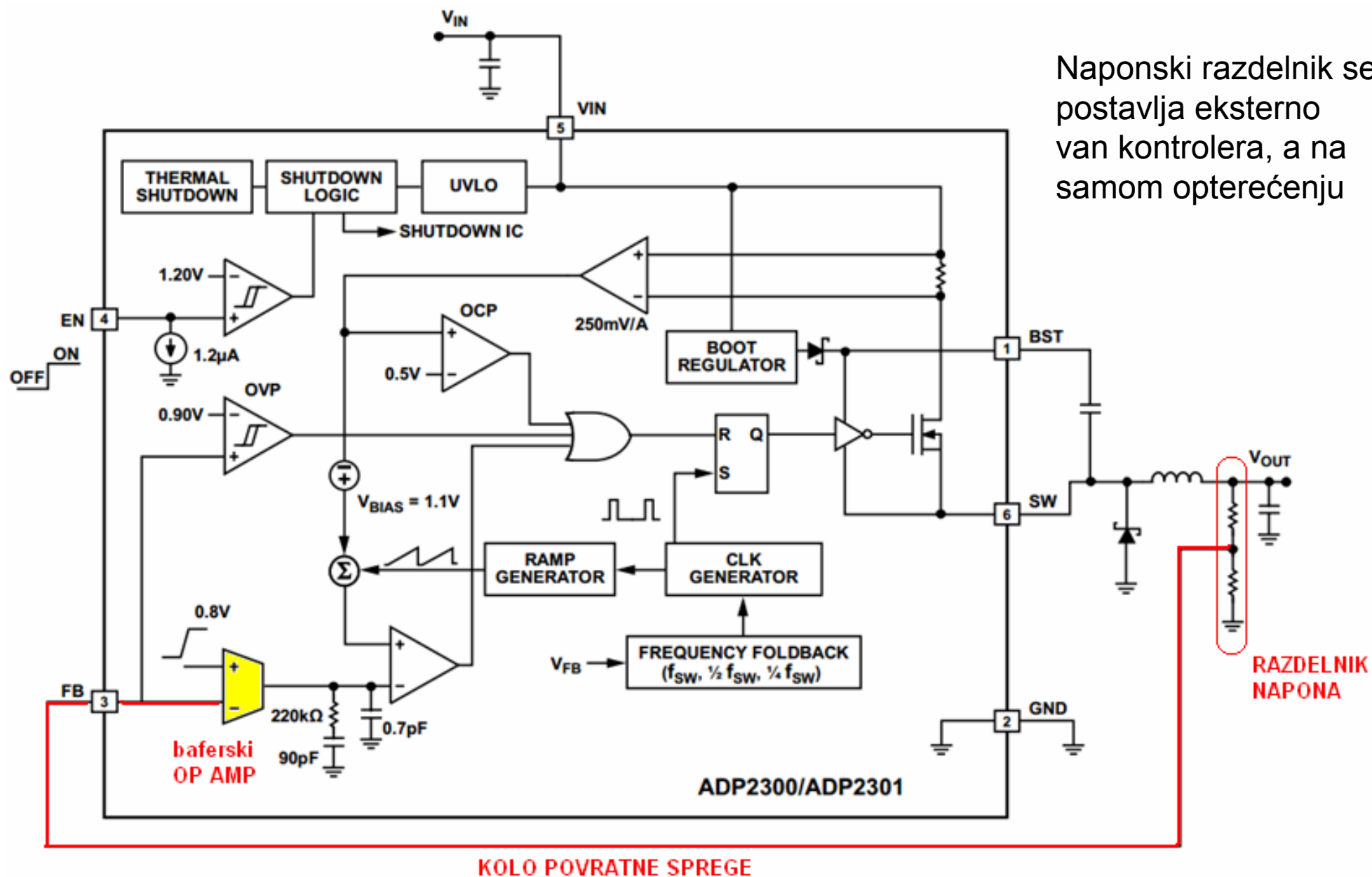
PRIMENA U KOLIMA SA PRECIZNOM REGULACIJOM NAPONA



$$V_{OUT} = (1 + R_1/R_2)V_{REF}$$

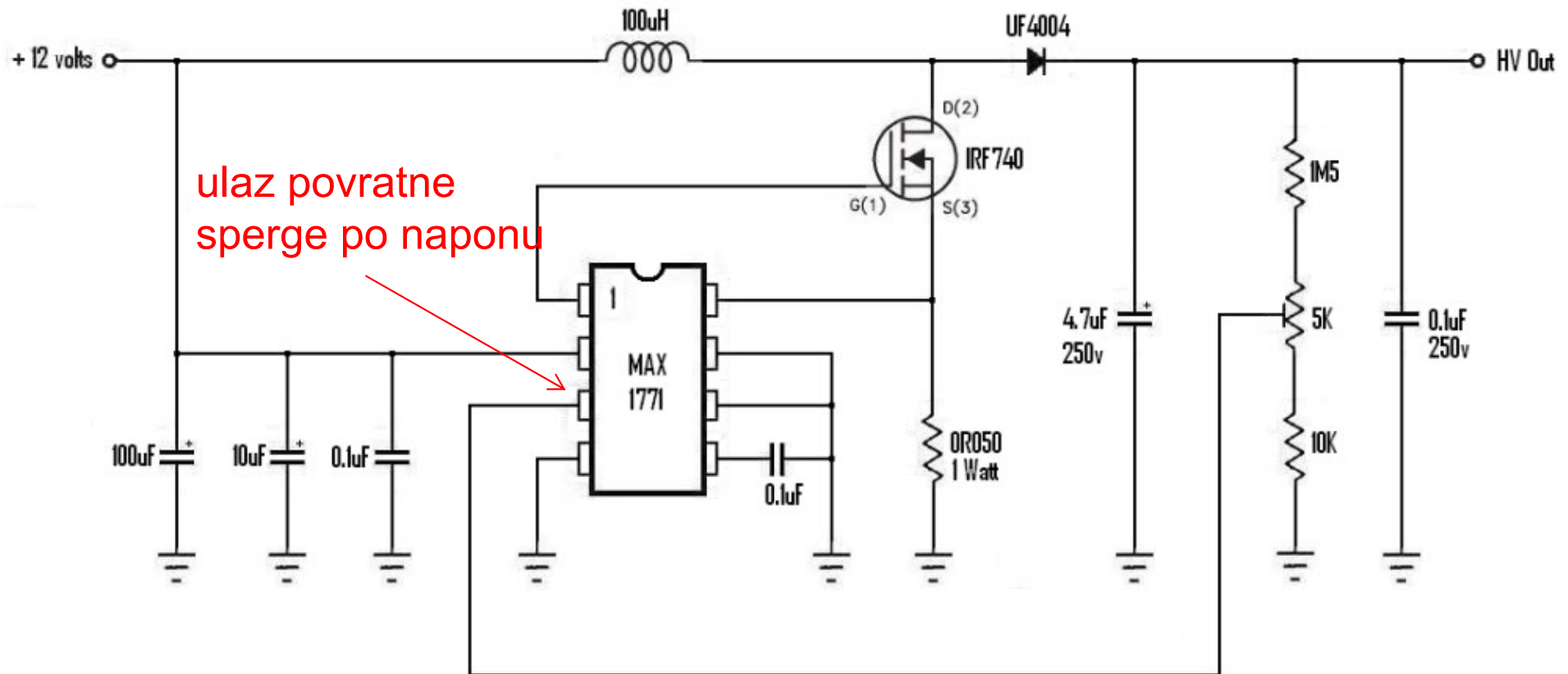
IZLAZNI NAPON RAZDELNIKA SE VODI NA ADJ ULAZ SUPERSTABILNOG ZENER REGULATORA (nije obična Zener dioda).
KOLO NA SLICI NIJE PREKIDAČKI VEĆ, LINEARNI STABILIZATOR IZLAZNOG NAPONA

PREKIDAČKI REGULATOR-PRIMENA RAZDELNIKA U KOLU POVRATNE SPREGE



PRIMER RAZDELNIKA SA PODEŠLJIVIM PRENOSNIM ODNOSOM

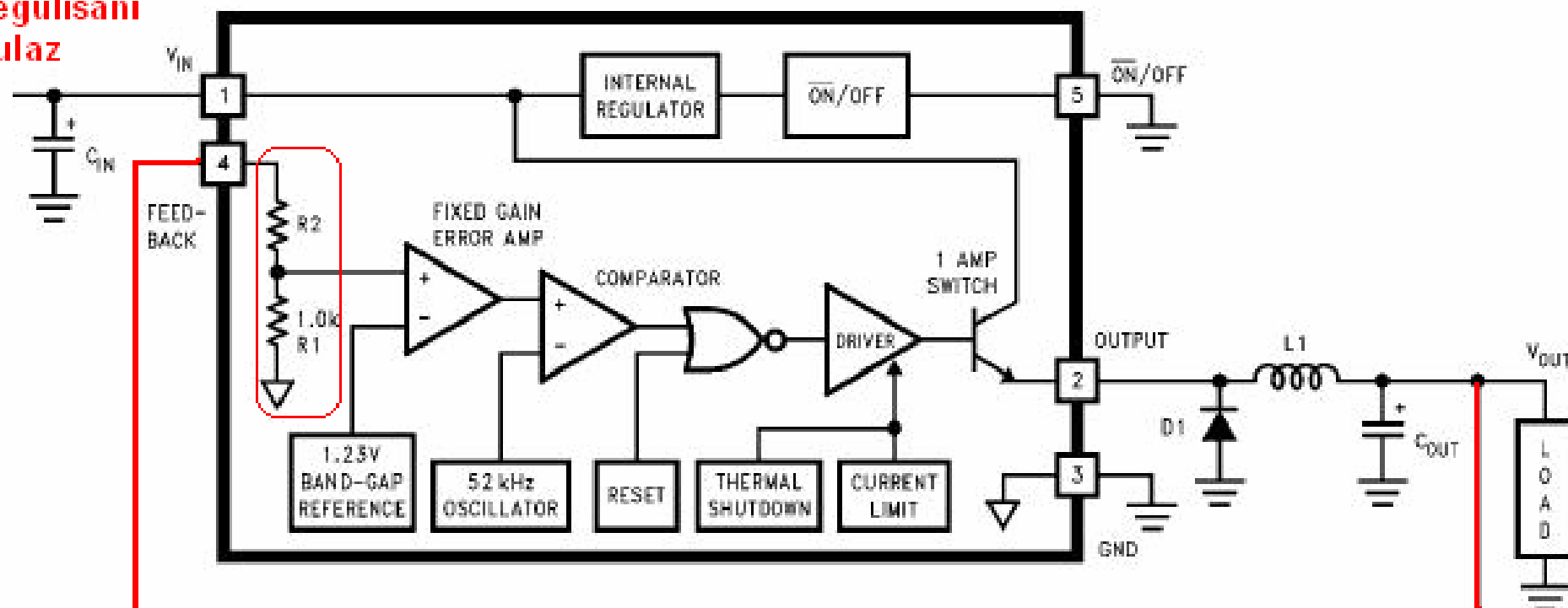
Zašto je bitno imati podešljiv prenosni odnos razdelnika?



Potenciometar se dimenzioniše prema željenom opsegu promene napona povratne sprege. Obično to nije više od +/- 10%. Napon srednje tačke potenciometra je diktiran naponom na ulazu u kontroler!!!

INTEGRACIJA RAZDELNIKA U ČIPU SMPS KONTROLERA

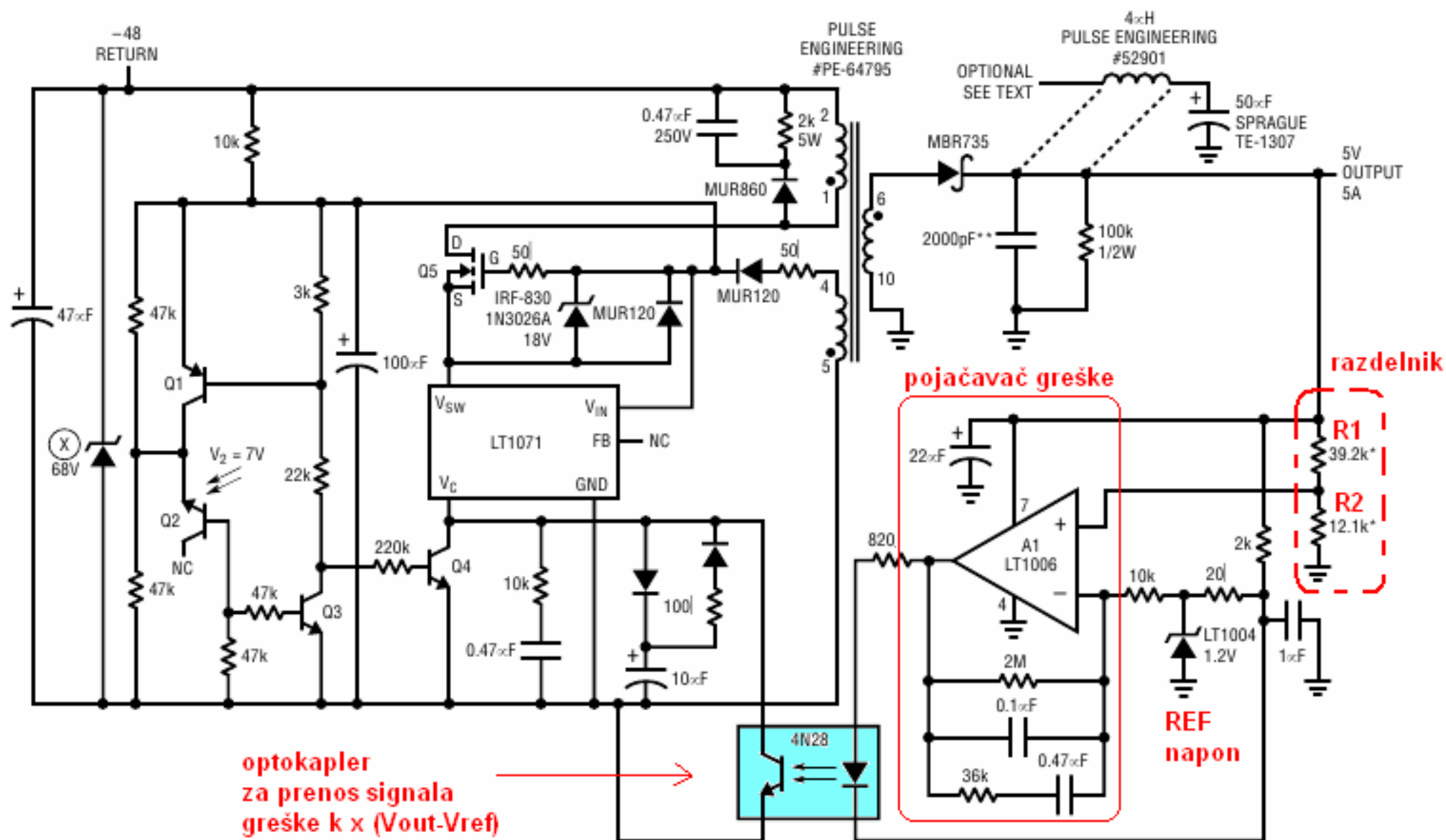
neregulirani
DC ulaz



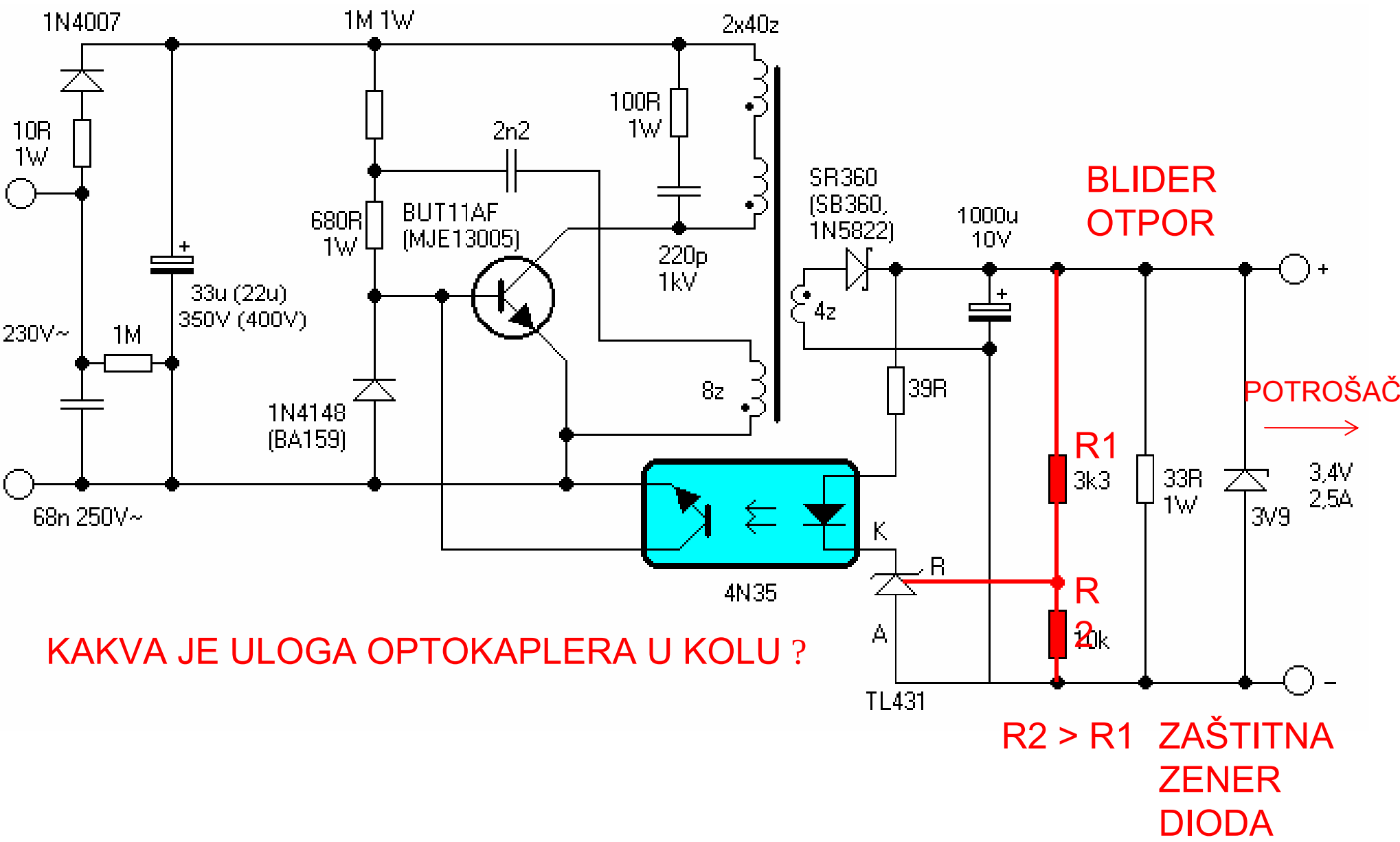
SMPS = Switch Mode Power Supply

PONEKAD JE SAM RAZDELNIK INTEGRISAN U SAMOM KONTROLERU PREKIDAČKOG REGULATORA NAPAJANJA, TAKO DA POVRATNA SPREGA PO IZLAZNOM NAPONU DIREKTNO SE DOVDI NA ČIP (KONTROLER)

KORIŠĆENJE RAZDELNIKA NAPONA U KOMBINACIJI SA POJAČAVAČEM GREŠKE I OPTOKAPLEROM. OVO IMA ITEKAKO SMISLA KOD PREKIDAČKIH NAPAJANJA SA GALVANSKOM IZOLACIJOM IZMEĐU PRIMARNE I SEKUNDARNE STRANE TRANSFORMATORA



PRIMENA RAZDELNIKA I OPTOKAPLERA KAO POJAČAVAČA GREŠKE. ŠTA JE U OVOM KOLU POJAČAVAČ GREŠKE?

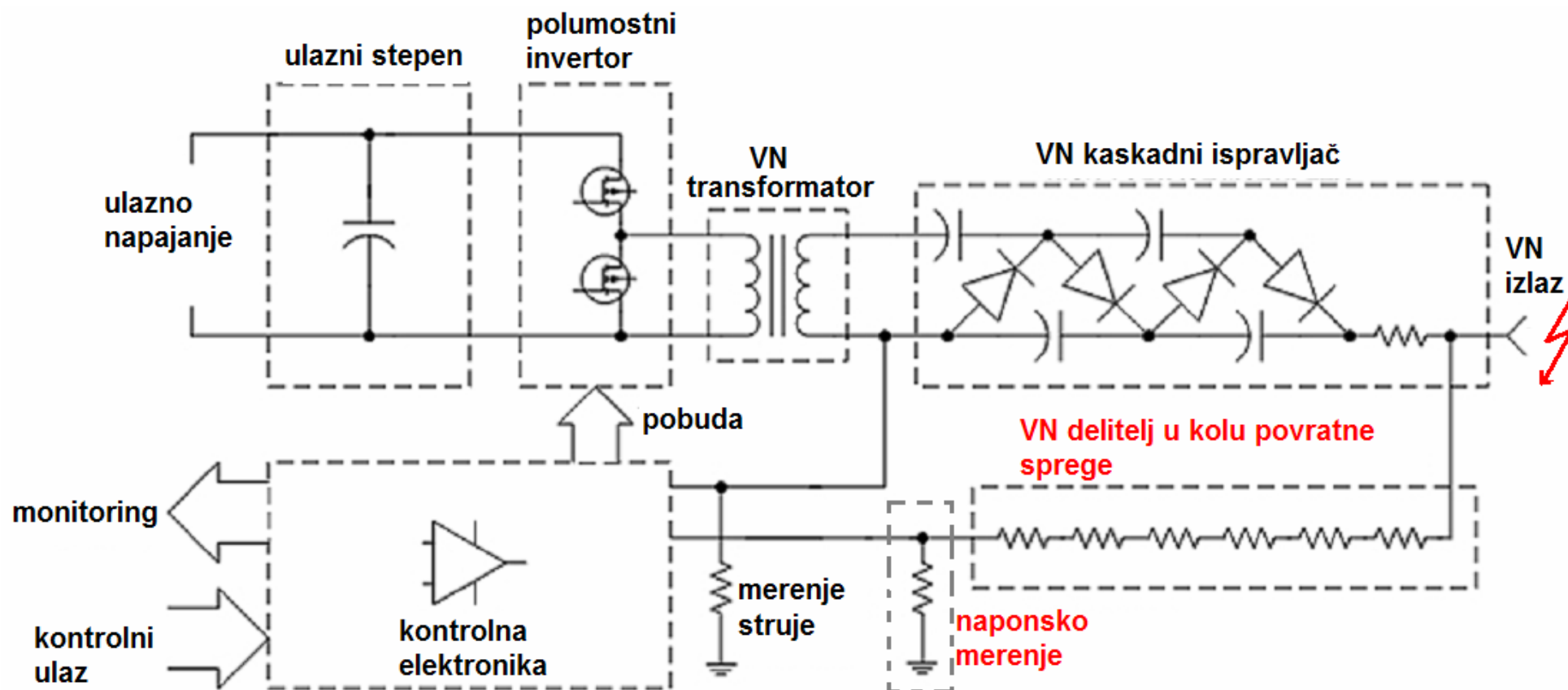


KAKVA JE ULOGA OPTOKAPLERA U KOLU ?

VISOKONAPONSKA MERENJA

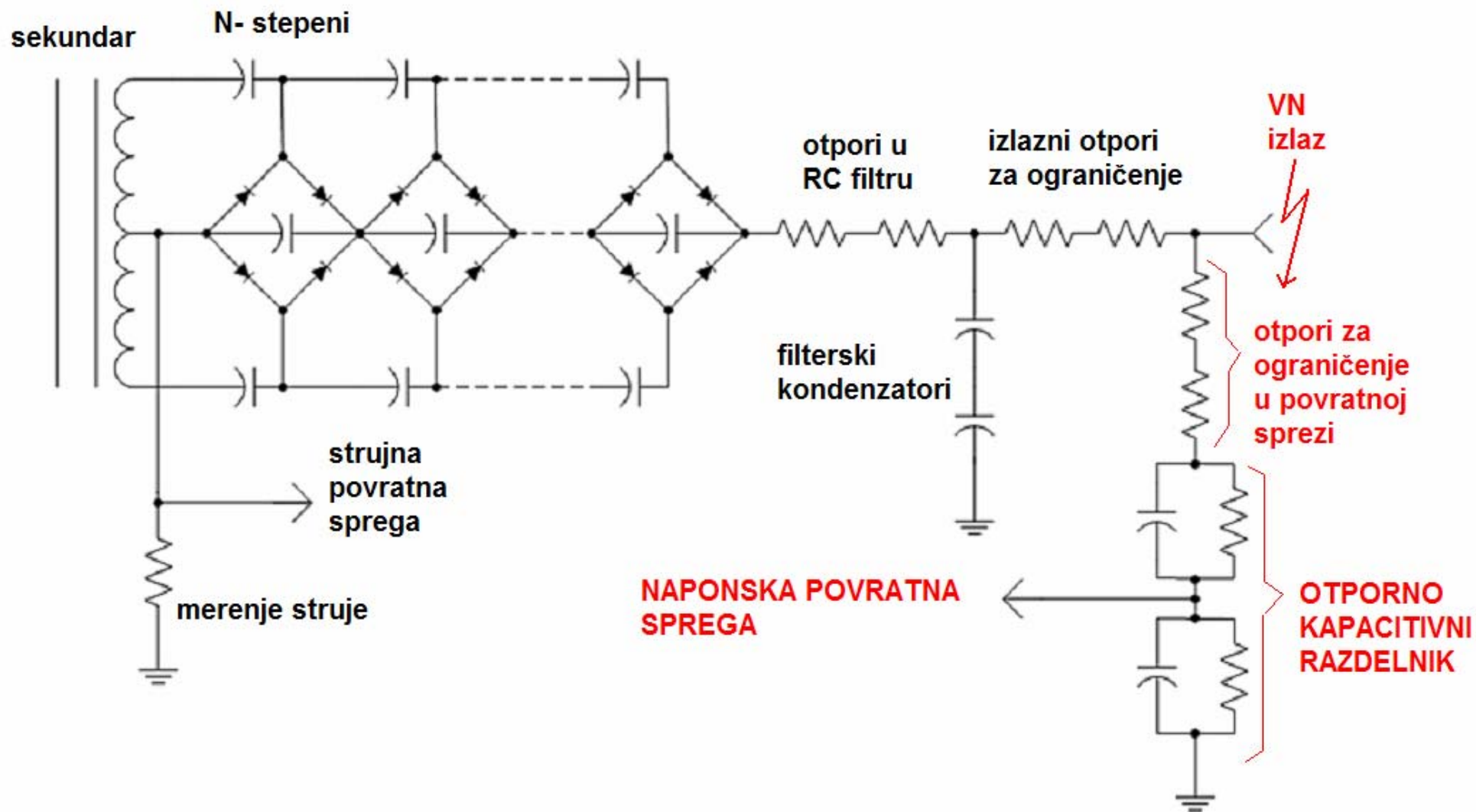
- Visoko naponski pretvarači se tipično koriste u sistemima bio jonizatorima (manje snage) i napajanje u sistemima za elektrostatičko izdvajanje dima i čađi na elektrofiltrima (izdvajačima)
- Visoki naponi koji se generišu u tim slučajevima su od 30kV-100kV DC
- U ovim sistemima je veoma bitna regulacija izlaznog napona, te je stoga potrebno imati povratnu spregu po izlaznom naponu, odnosno obezbediti tačno merenje
- Obzirom na “nemirni režim” rada elektrostatičkih filtara potrebno je obezbediti adekvatnu filtraciju smetnji
- Kako se ustvari mere ovo visoki jednosmerni napon?
- Najčešće korišćeni merni sistem je VN razdelnik na samim izlaznim elektrodama, u kombinaciji sa optikom za prenos izmerenih vrednosti napona

VISOKONAPONSKI (VN) IZVOR SA KASKADNIM ISPRAVLJAČEM

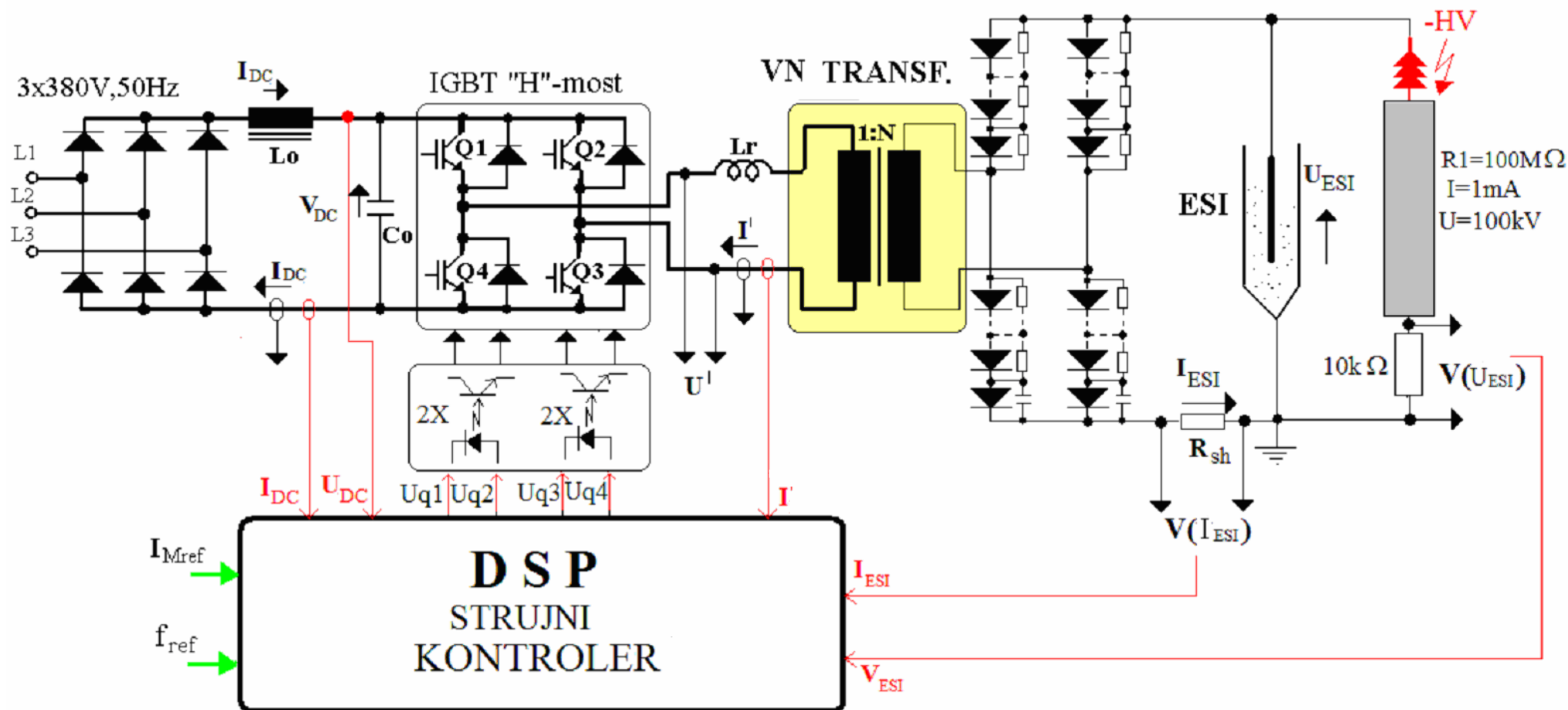


Merenje izlaznog napona se ostvaruje razdelnikom

OTPORNO-KAPACITIVNI RAZDELNIK

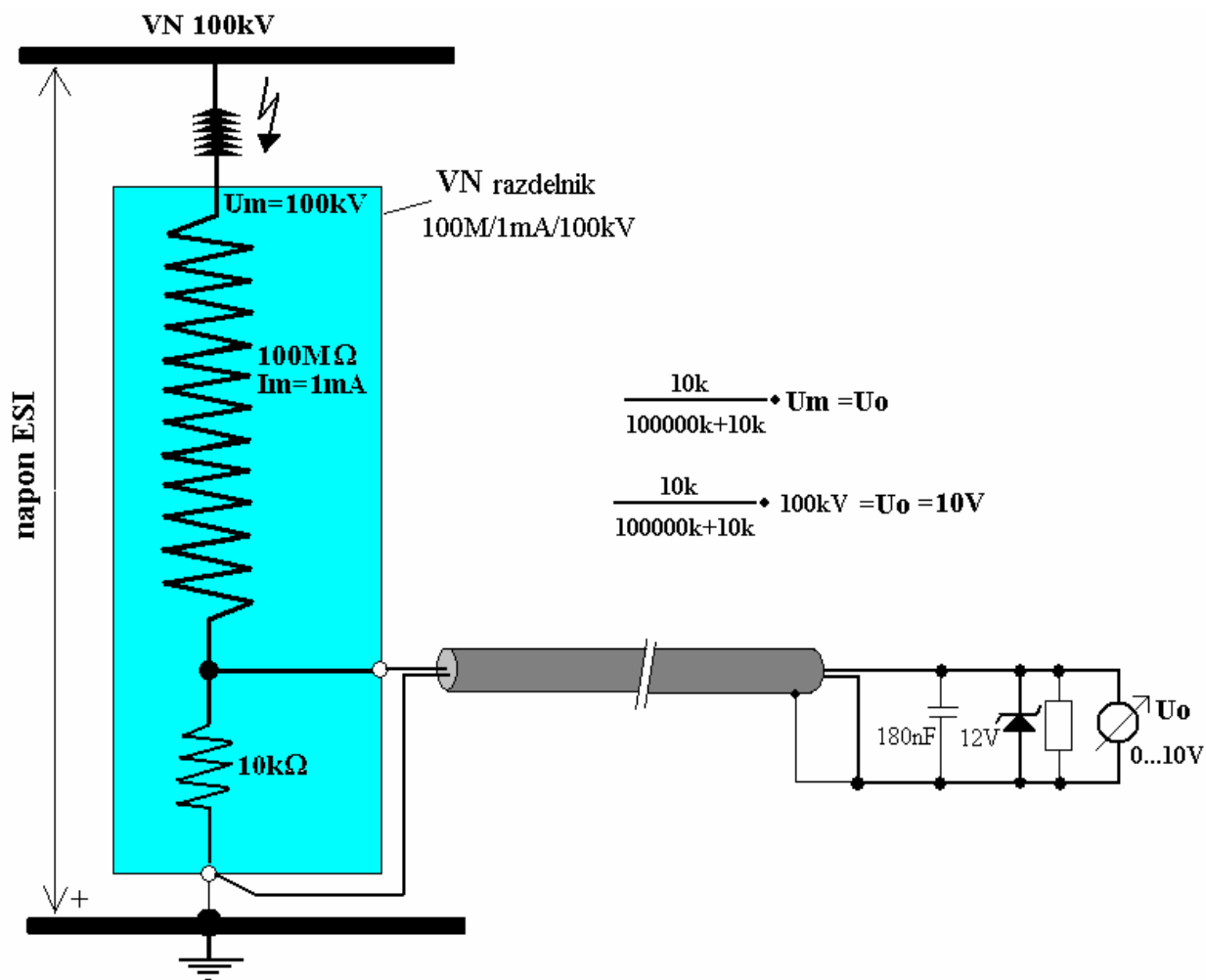


VISOKOFREKVENTNI PRETVARAČ ZA NAPAJANJE VISOKONAPONSKIH ELEKTRODA ELEKTROSTATIČKIH PRECIPITATORA (IZDVAJAČA)



Merenje napona se najčešće ostvaruje otpornim razdelnikom napona. Otpornik prema VN strani je jako velike vrednosti, za malu struju, ali je značajnih dimenzija obzirom da se vezuje na visoki napon 100kVDC. Po pravilu ima izolator na vrhu pošto se mogu javiti puzajuće struje i pražnjenja. Otpornik prema masi može biti tada standardni.

Konvencionalno merenje VN na elektrodama ESI



Standardno se problem merenja visokog napona ESI rešava **VN otporničkim razdelnikom**, pri čemu je razdelnik sastavljen od dva otpornika kao što prikazuje slika. Gornji kraj VN otpornika je vezan preko VN izolatora na VN kraj (standardno 100kV za većinu elektrostatičkih izdvača-ESI). Standardna vrednost ovog otpornika je 100MΩ, 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 10kΩ se vodi naponski signal oklopljenim ("širmovanim") kablom do mernog instrumenta ili do ulaska u digitalni kontroler.

KAKO TO IZGLEDA U STVARNOSTI??



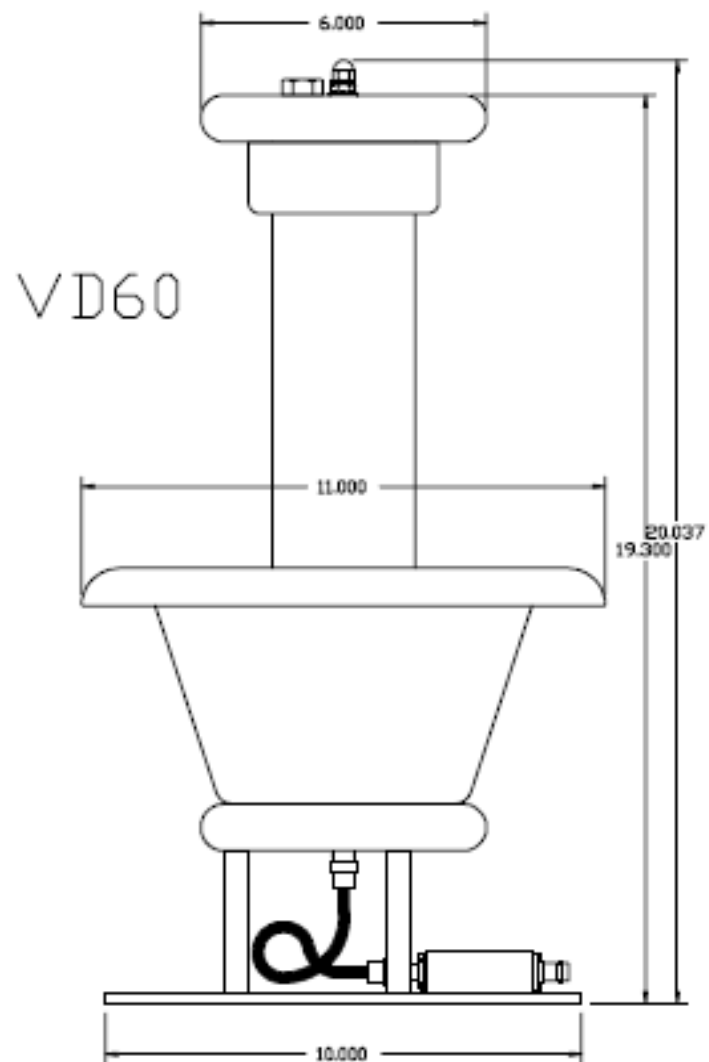
VN razdelnik



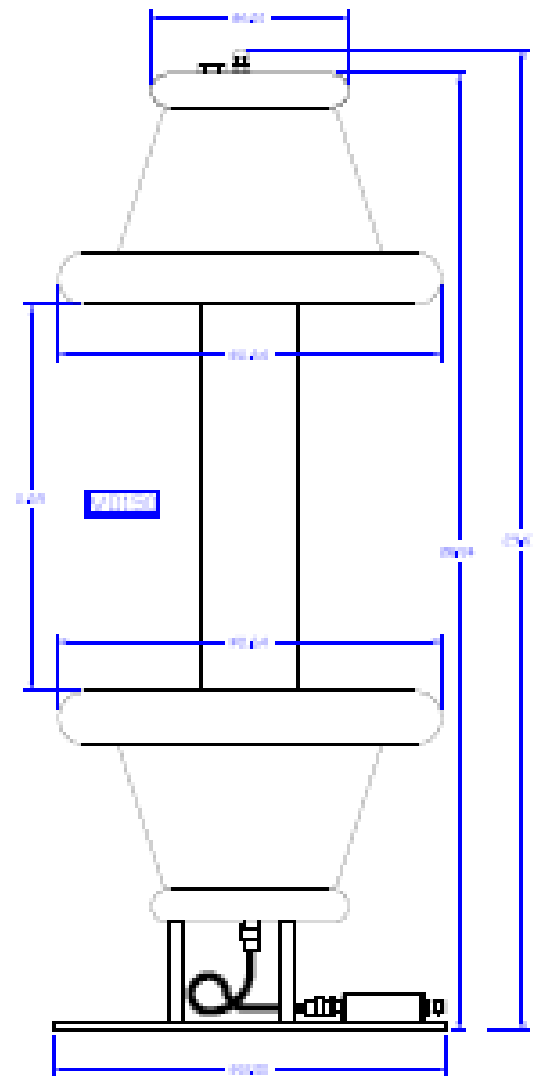
Transmitter

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



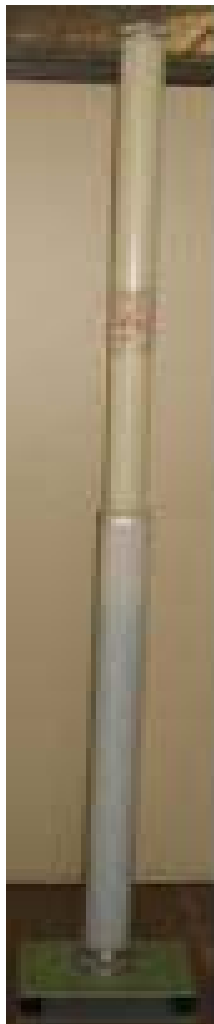
(a)



(b)

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

(a)

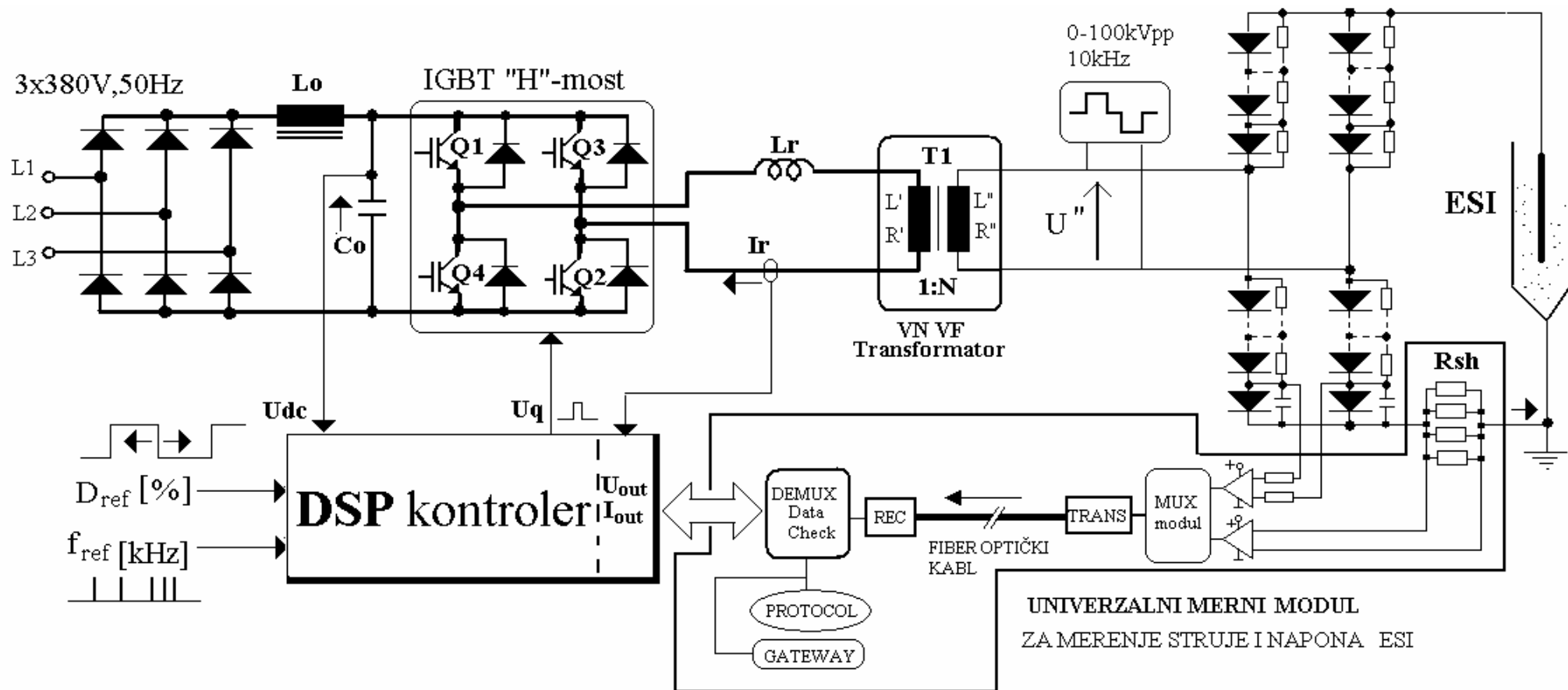


(b)



U nekim slučajevima se jednosmerni napon ESI tj. napon negativne elektrode meri preko VN otpornika od $80\text{M}\Omega$ (ili $265\text{M}\Omega$ zavisno od proizvođača) koji zajedno sa otpornikom od $6.8\text{k}\Omega$ formira razdelnik napona. VN otpornik je napravljen od niza na red povezanih otpornika od $1\text{M}\Omega$, 6kV . Obično se nalazi u ulju u kotlu energetske jedinice transformator/ispravljač. Moguće je rešenje i sa samostalnim VN otpornikom koji se nalazi izvan posude sa uljem. Na slici je prikazan spoljni izgled samostalnog VN otpornika koji je ugrađen u elektrofilteru bloka A5 u TE "Kolubara A" (realizacija Instituta „N.Tesla”-Beograd. Slika (a) prikazuje kompletan stub sa otpornikom, a slika (b) štampane ploče sa lancem otpornika koje se smeštaju u ovaj stub ili u kotao transformatora.

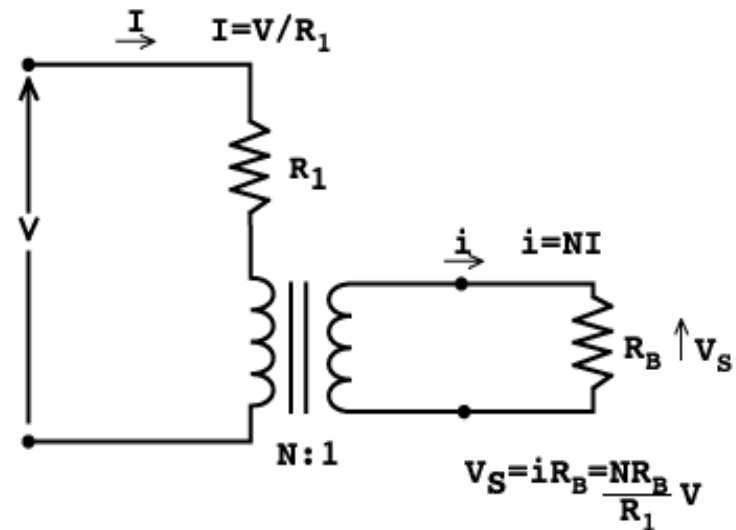
Principiska šema visokonaponskog merenja struje i napona ESI



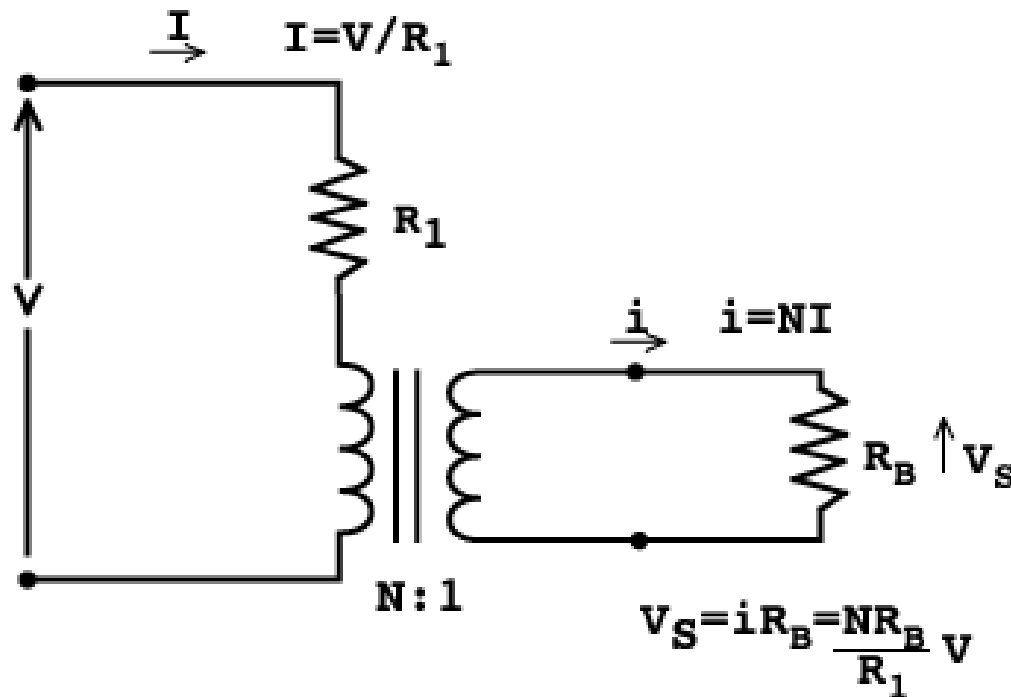
Kompaktni i integrisani elektronski modul za merenje trenutne vrednosti struje i napona ESI napajanih iz VF pretvarača. Na slici je dat sistem za merenje trenutnog napona i trenutne struje. Obzirom da se radi o merenju na visokom naponu, izvodi se galvanske izolacije merenja (fiber optikom). Ovim se takođe obezbeđuje eliminacija uticaja spoljnih signala na merenja, obzirom da je struja ESI relativno mala veličina. Klasičan žičani prenos nije moguć na veće daljine. Osnovna struktura merenja je da se ono sastoji od „visokonaponskog“ i „niskonaponskog“ dela. Visokonaponski deo čine izlazni napon ESI, skaliran impulsno preko naponskog razdelnika inherentno ugrađenog u diodni VN most i izlazna struja ESI filtra koja se dovodi direktno sa sata 0-50 mV. Rešenje za optički prenos omogućava korišćenje samo jednog fiber vlakna za prenos proizvoljnog broja veličina i podataka (veoma bitna komponenta je multiplex predajna jedinica)

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

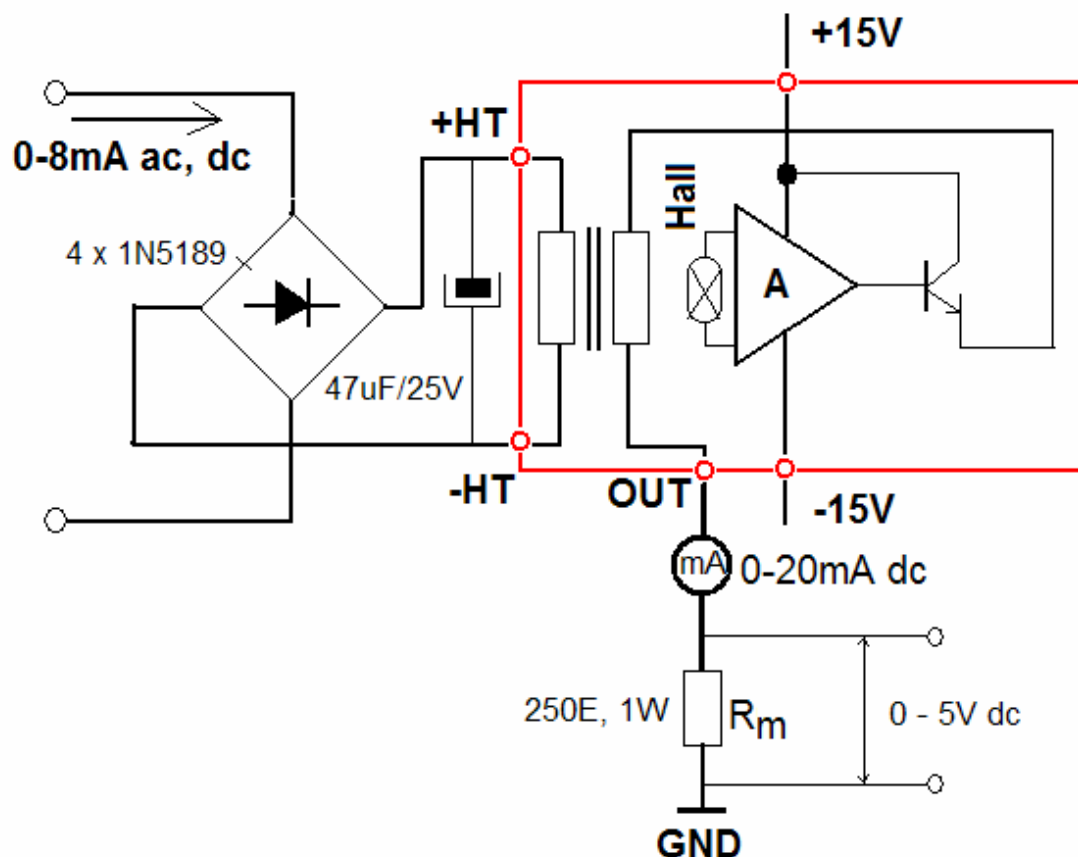


LEM naponski pretvarač ustvari koristi električno izolovani strujni senzor za merenje struje kroz jedan ili dva precizna visokonaponska otpornika koji se priključuju na visoki napon koji se meri. Signalno kolo je izolovano od primara, čak i ako se desi prekid na otpornicima u primaru.

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 $P_d = (2mA)^2 \cdot 1M = 4W$. Ova snaga je gubitak u primarnom kolu. LEM pretvarač je veoma osetljiv (baš zato što se koristi otpornost).

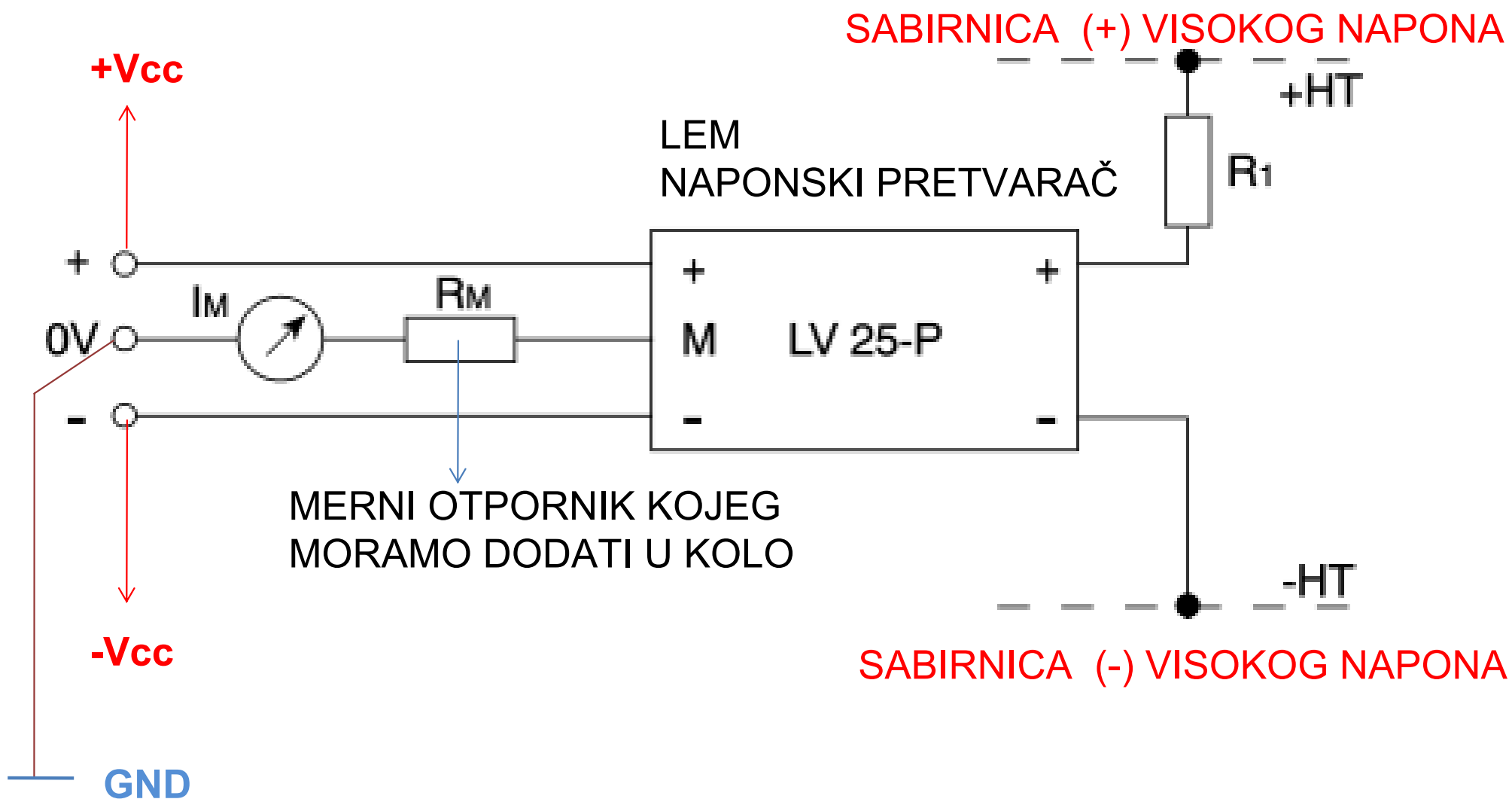
KAKO SE POSTIŽE LINEARNOST NAPONSKOG PRETVARAČA?

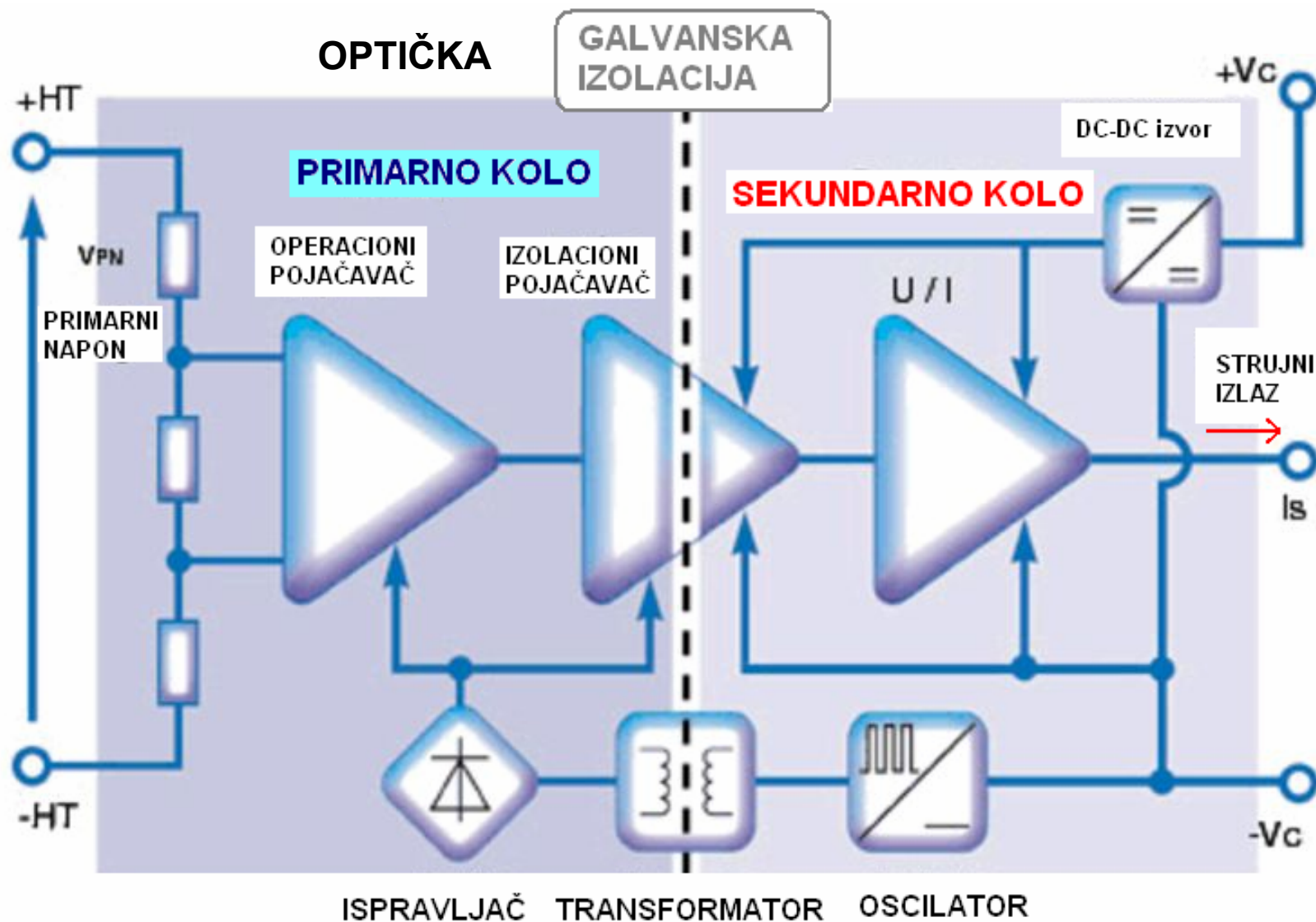
DOBIJANJE VISOKE LINEARNOSTI NAPONSKOG LEM MODULA



- 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.

KAKO SE VEZUJE NAPONSKI LEM

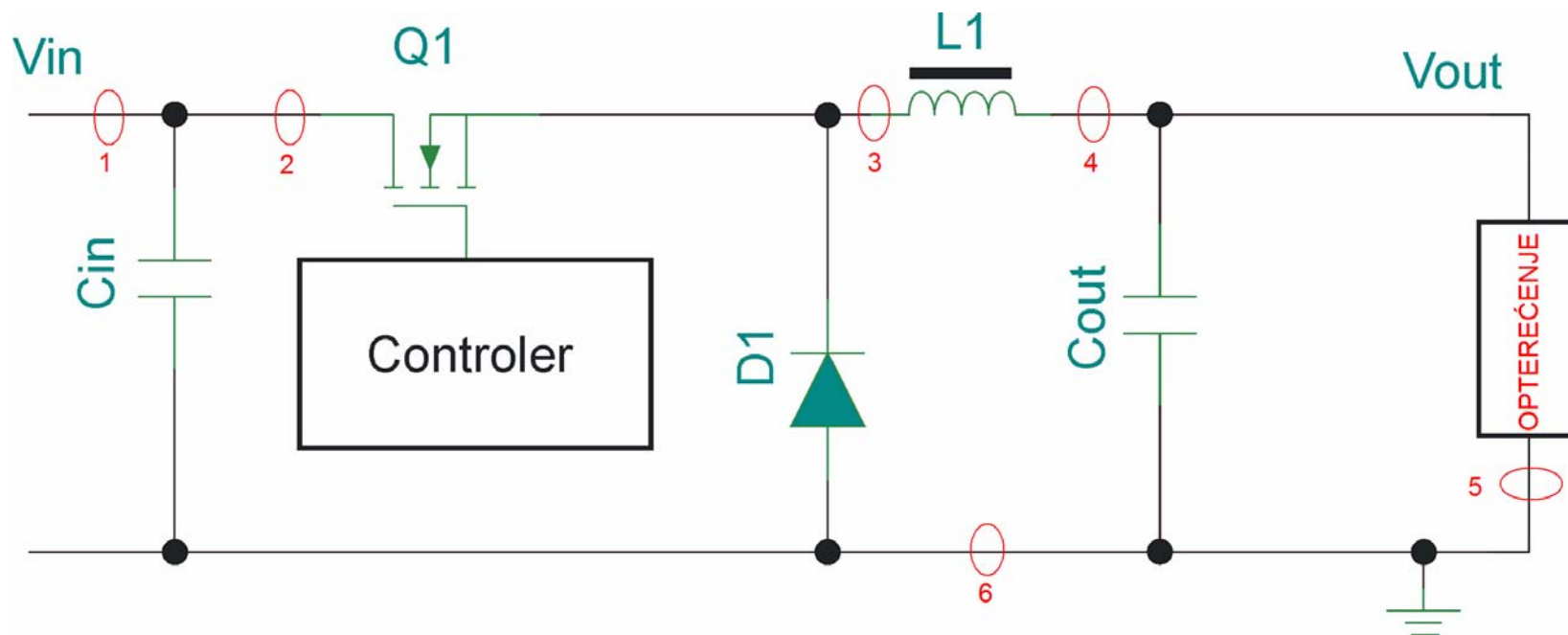




Merenje visokih napona LEM serije AV 100 koristi isključivo elektronske komponente od kojih je najbitnija **IZOLACIONI OPERACIONI POJAČAVAČ**. Mereni napon (V_p) je direktno primenjen na ulazni operacioni pojačavač ali preko interne otporne (razdelničke) mreže i dodatne elektronike za napajanje izolacionog 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

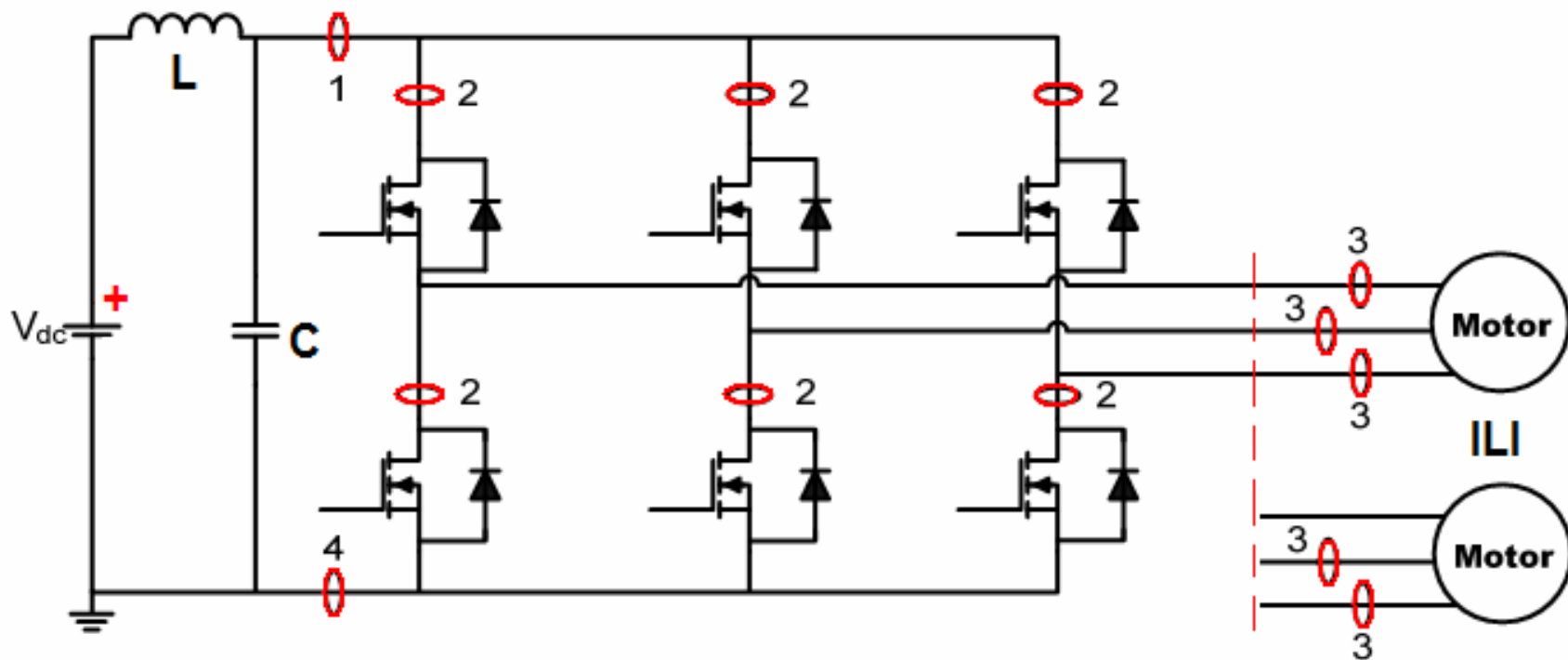
MERENJE STRUJE

- Merenje struje u kolima energetske elektronike je neobično značajno sa više stanovišta (kontrola i regulacije, 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!!!)
- Koje su interesantne merne tačke za struju u jednom tipičnom energetskom pretvaraču ili regulisanom elektromotornom pogonu?



Moguće merne pozicije struje u jednom energetskom pretvaraču (spuštač napona)

U energetskom pretvaraču je moguće meriti struje na više mesta. Zavisno od aplikacije odabiraće se željena lokacija. Nekada to diktira sam pretvarač i nije baš moguće meriti struju na željenom mestu. Pozicija (1) je dobra za merenje ukupne struje (DC ili talasnosti). Ova pozicija se koristi u kolima energetskih pretvarača kada se zahteva korekciju faktora snage, strujna zaštita, zaštita od kratkog spoja, merenje ulazne snage. Pozicija (2) meri struju prekidača, ona je zgodna kada se kontroliše vršna vrednost struje. Pozicija (3) daje informaciju o srednjoj vrednosti struje. Isto to daje i pozicija (4). Pozicija (3) nije efikasna zbog velike promene napona u toj tački. Mnogo bolja je situacija u poziciji (4), i ona se koristi u kontroli srednje vrednosti struje tzv. *Average Mode Control*. U ovoj poziciji merimo i struju induktora L ali i srednju vrednost struje opterećenja. **ZAŠTO!!!** Pozicija (5) daje informaciju o struji opterećenja, ali nije pogodna za zaštitu od kratkog spoja na njemu. **ZAŠTO!!!** Pozicija (6) meri isto što i (4) ali postoji problem što je masa opterećenja odvojena od ulaza.



Moguće merne pozicije struje u energetskom pretvaraču za pogon trofaznih motora (regulisani elektromotorni pogon)

U energetskim pretvaračima (invertorima) za pogon trofaznih motora (asinhronih , sinhronih, brush-less) 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

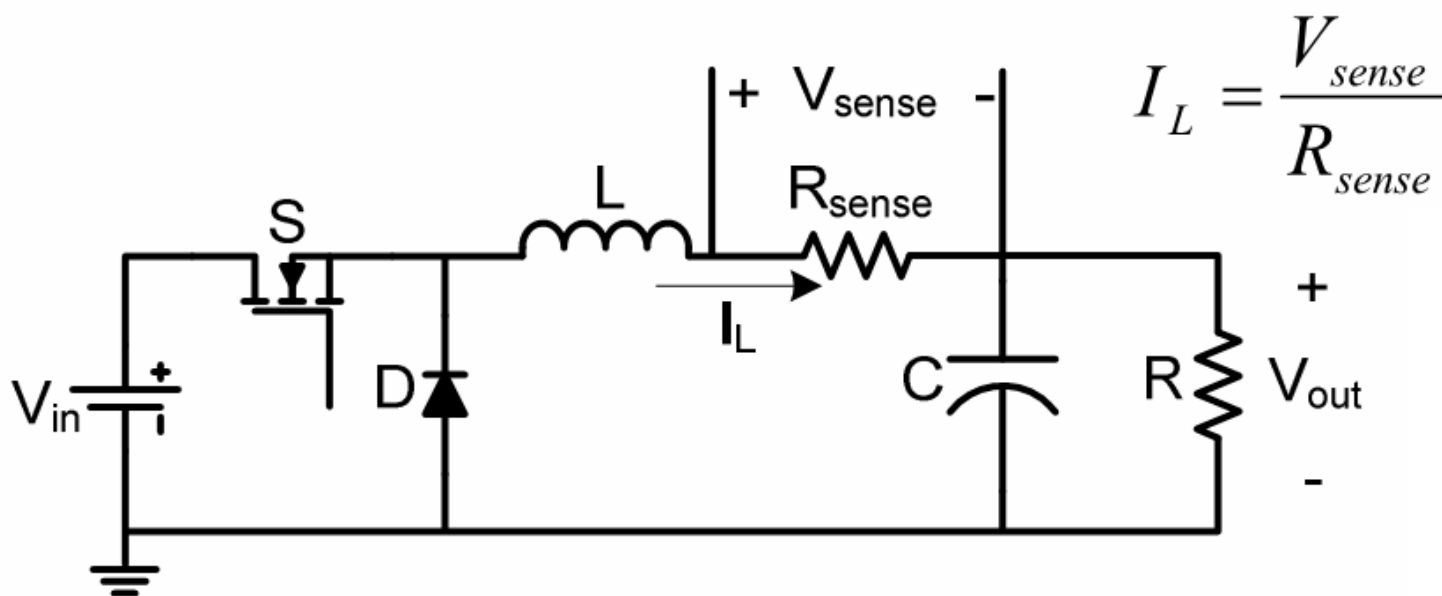
U OVOM PREDAVANJU ĆE BITI OBRAĐENE MERNE STRUJNE TEHNIKE BAZIRANE NA:

1. MERENJU POMOĆU OTPORNOSTI

2. ELEKTROMAGNETNIM MERENJIMA

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

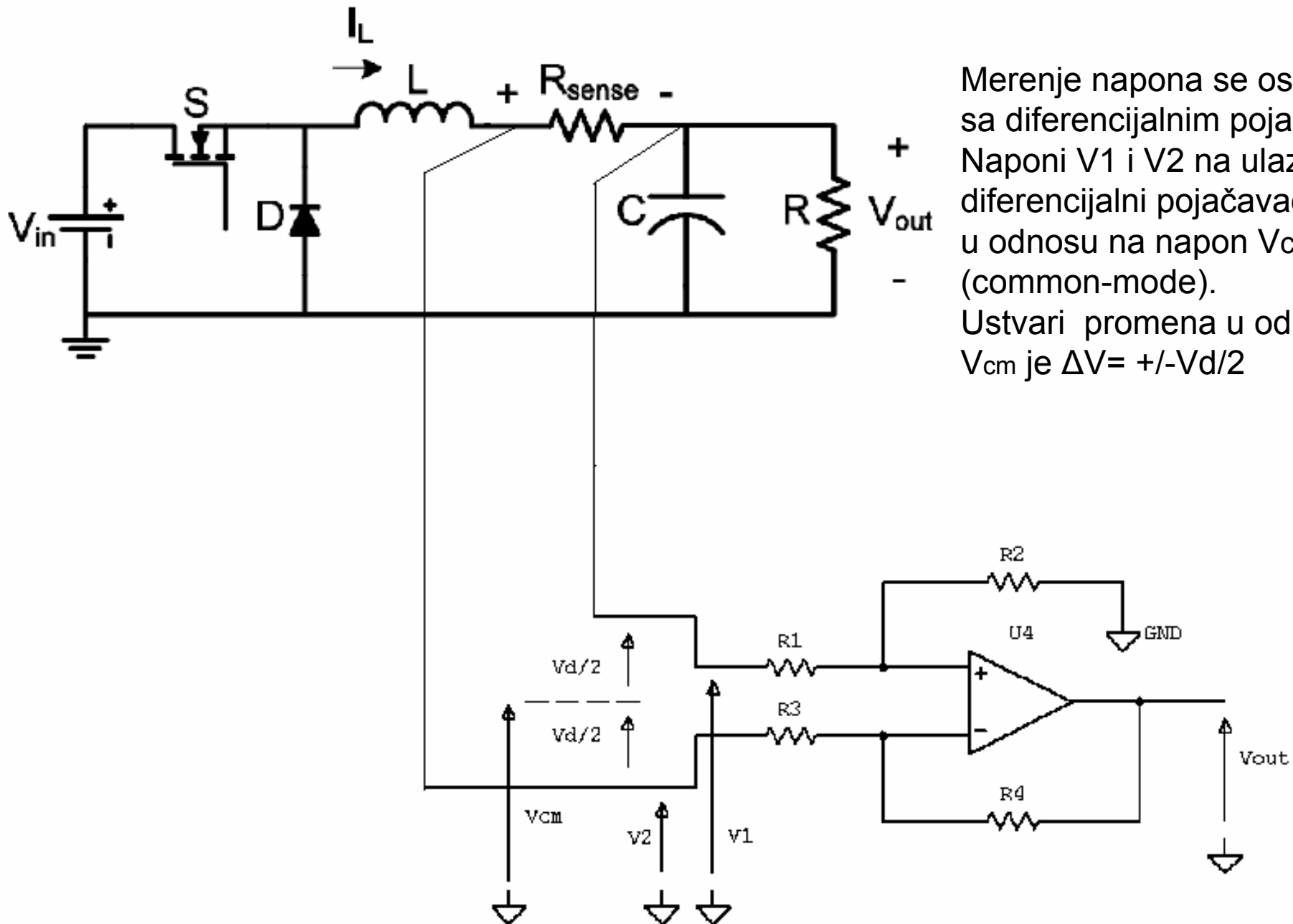
MERNA STRUJNA TEHNIKA BAZIRANA NA KORIŠĆENJU EKSTERNOG OTPORNIKA KOJI SE DODAJE U GRANU PRIGUŠNICE



Struja prigušnice se dobija merenjem napona na otporniku uz poznatu vrednost otpornika, lako se dobija vrednost struje. Bitno je da na otporniku gubici budu što manji, te se zato koriste vrlo male otpornosti 10mΩ-100mΩ. Stoga se dobijeni napon mora pojačavati dodatnom elektronikom. Ova tehnika nije primenljiva kod pretvarača visokih performansi obzirom na disipaciju na otporniku R_{sense} .

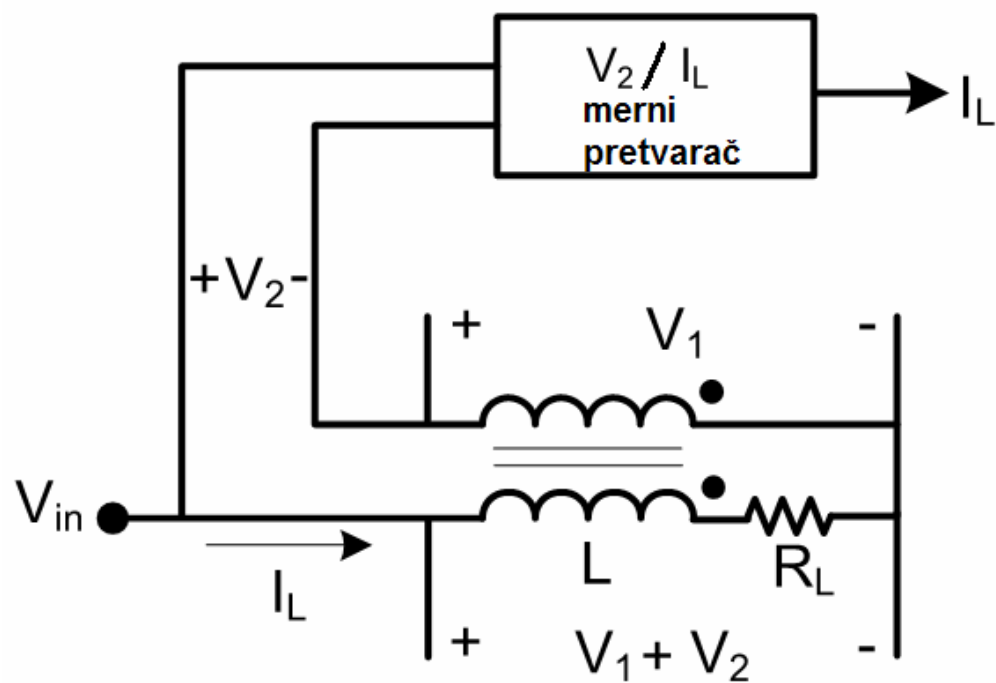
Kako meriti napon na R_{sense} ?

“COMMON MODE” TEHNIKA MERENJA



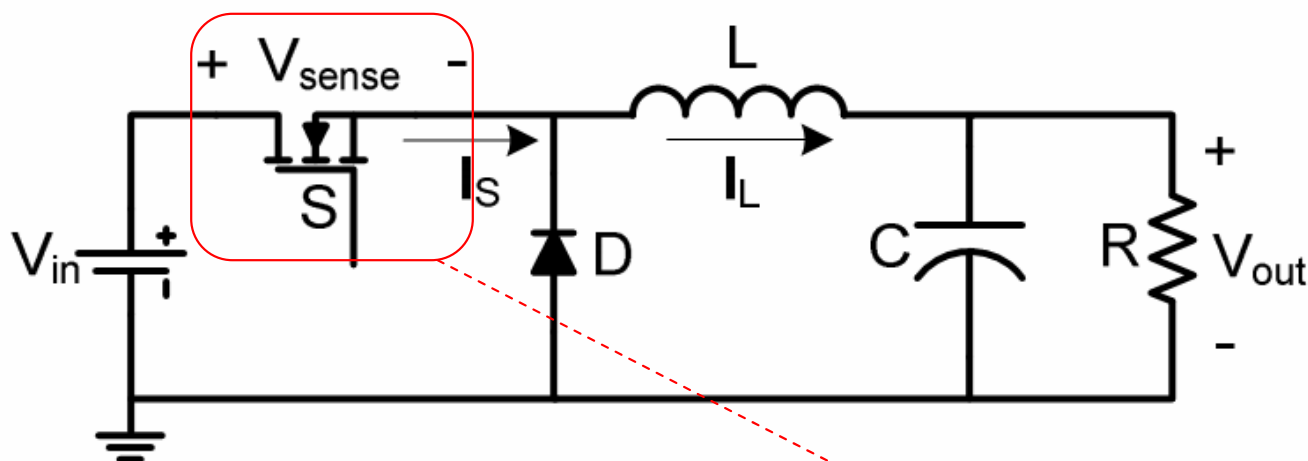
Merenje napona se ostvaruje sa diferencijalnim pojačavačem. Naponi $V1$ i $V2$ na ulazu u diferencijalni pojačavač “plivaju” u odnosu na napon V_{cm} (common-mode). Ustvari promena u odnosu na V_{cm} je $\Delta V = \pm V_d/2$

MERNA TEHNIKA KOJA KORISTI INTERNU OTPORNOST INDUKTORA



$$V_L = V_1 + V_2 = L \frac{dI_L}{dt} + I_L R_L$$

MERNA TEHNIKA KOJA KORISTI INTERNU OTPORNOST MOSFET PREKIDAČA



$$I_S = I_L = \frac{V_{sense}}{R_{DS}}$$

U intervalu

$$0 < t < dT$$

MOSFET prekidač S je ON

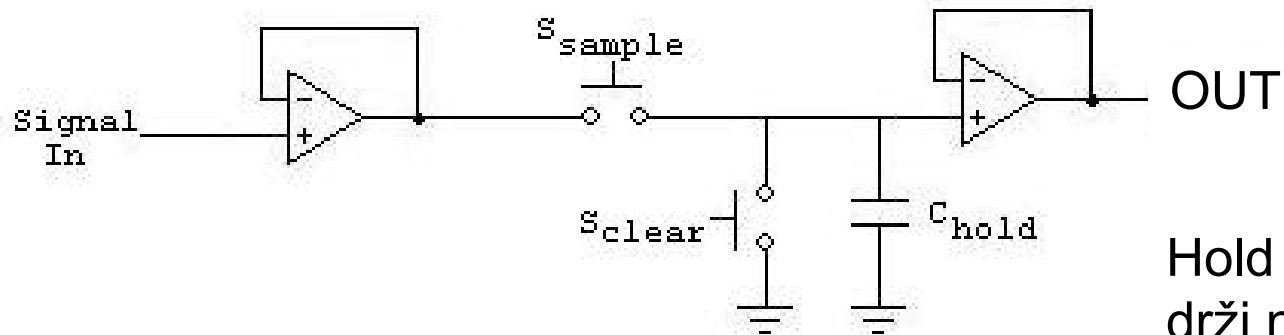
Zahteva se SMPLE&HOLD kolo za merenje struje I_L

$$R_{DS} = \frac{L}{W\mu C_{OX}(V_{in} - V_T)}$$

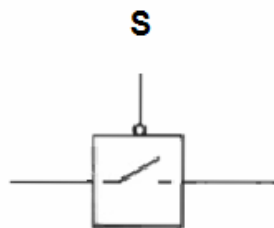
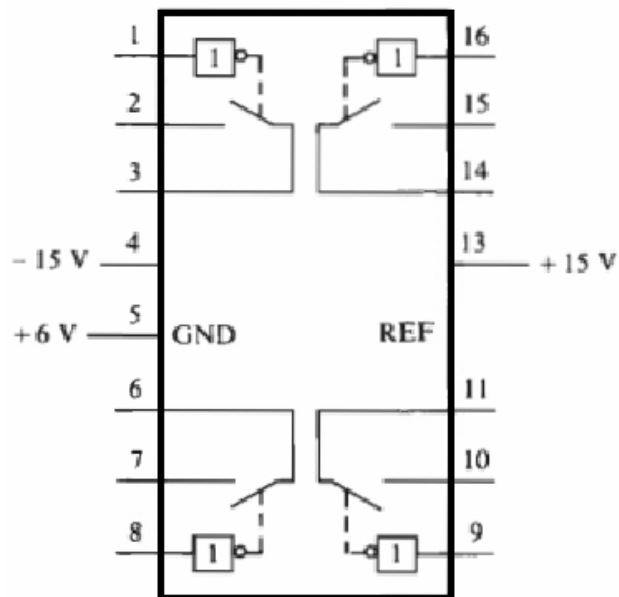
μ - poketljivost elektrona
 C_{ox} -kapacitet oksidnog spoja
 $-V_T$ (napon praga gejta)
 $-L/W$ geometrija MOSFET-a

SAMPLE & HOLD?

SAMPLE&HOLD

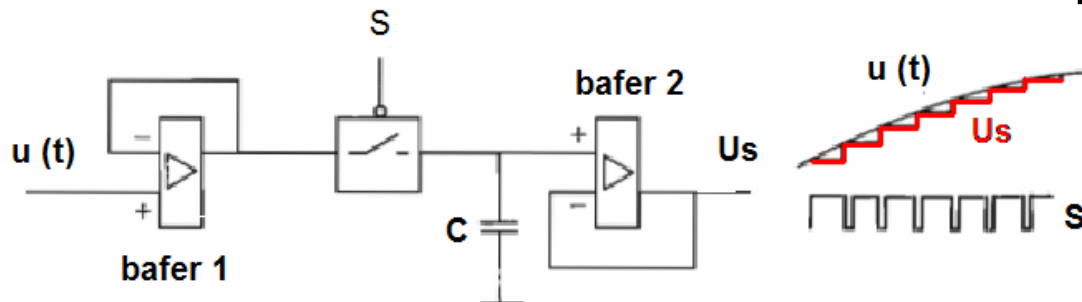


Hold kondenzator
drži napon čak i kada
 S_{sample} deluje
kratkotrajno!!!
Pražnjenje hold
kondenzatora se
ostvaruje sa S_{clear}



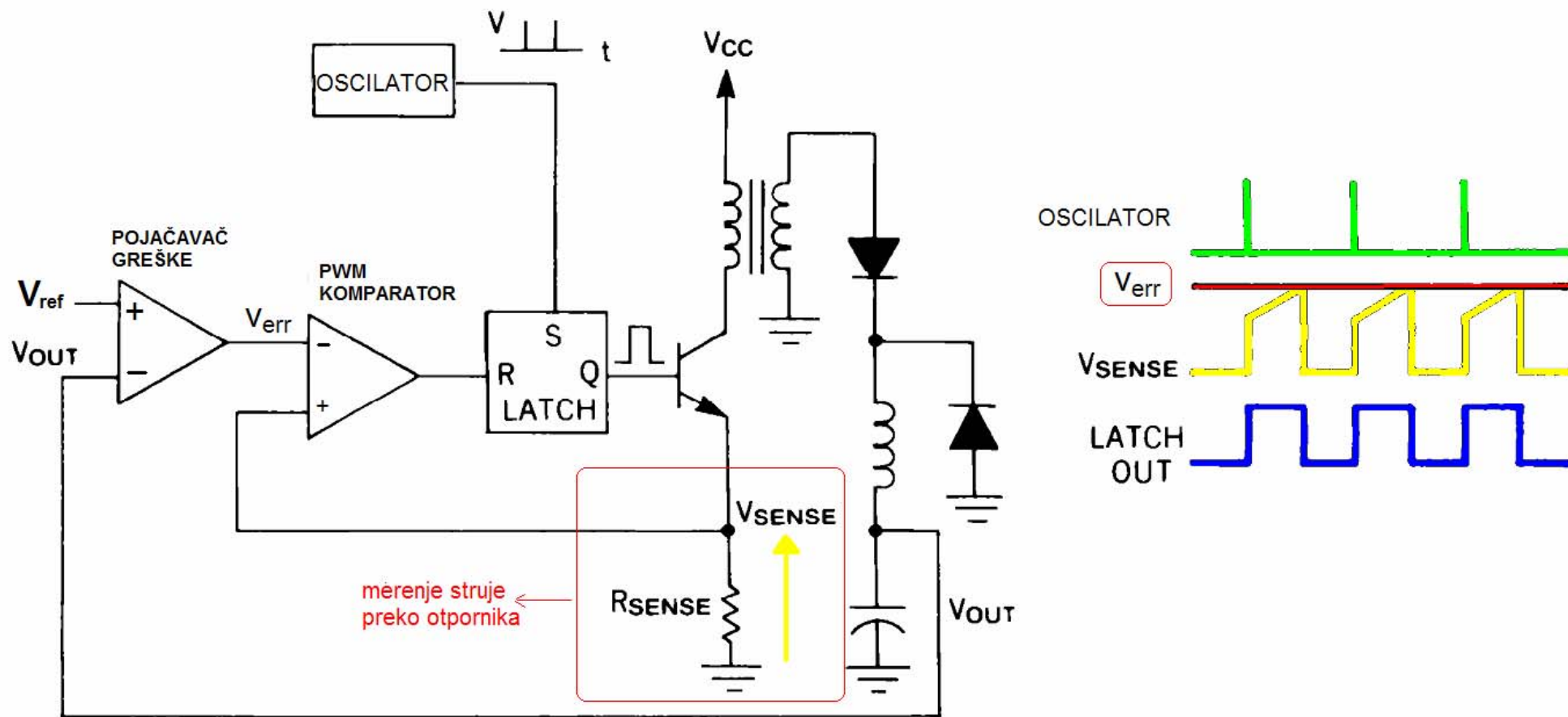
analogni
prekidač

Korišćenje analognog prekidača
umesto mehaničkih.
ANALOG SWITCH
Kontrolisan naponom



STRUJNO KONTROLISANI PRETVARAČ (Current Mode Control)

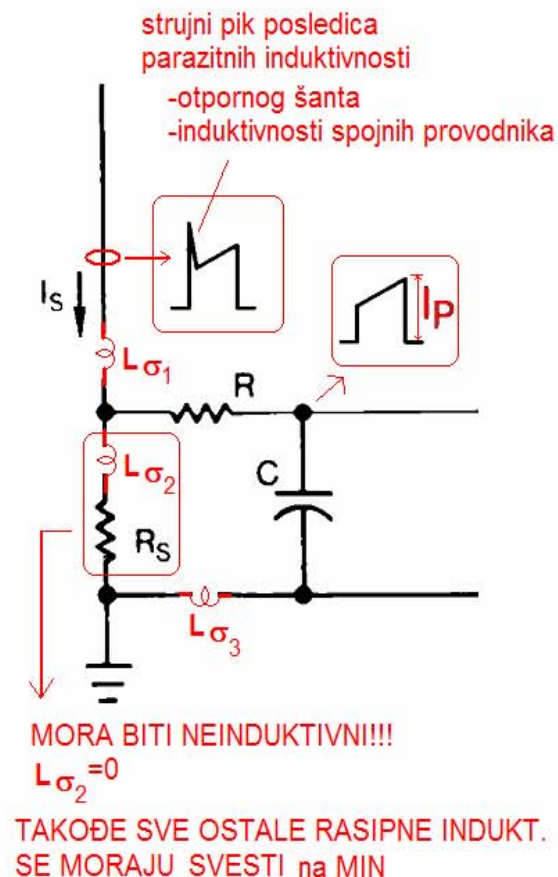
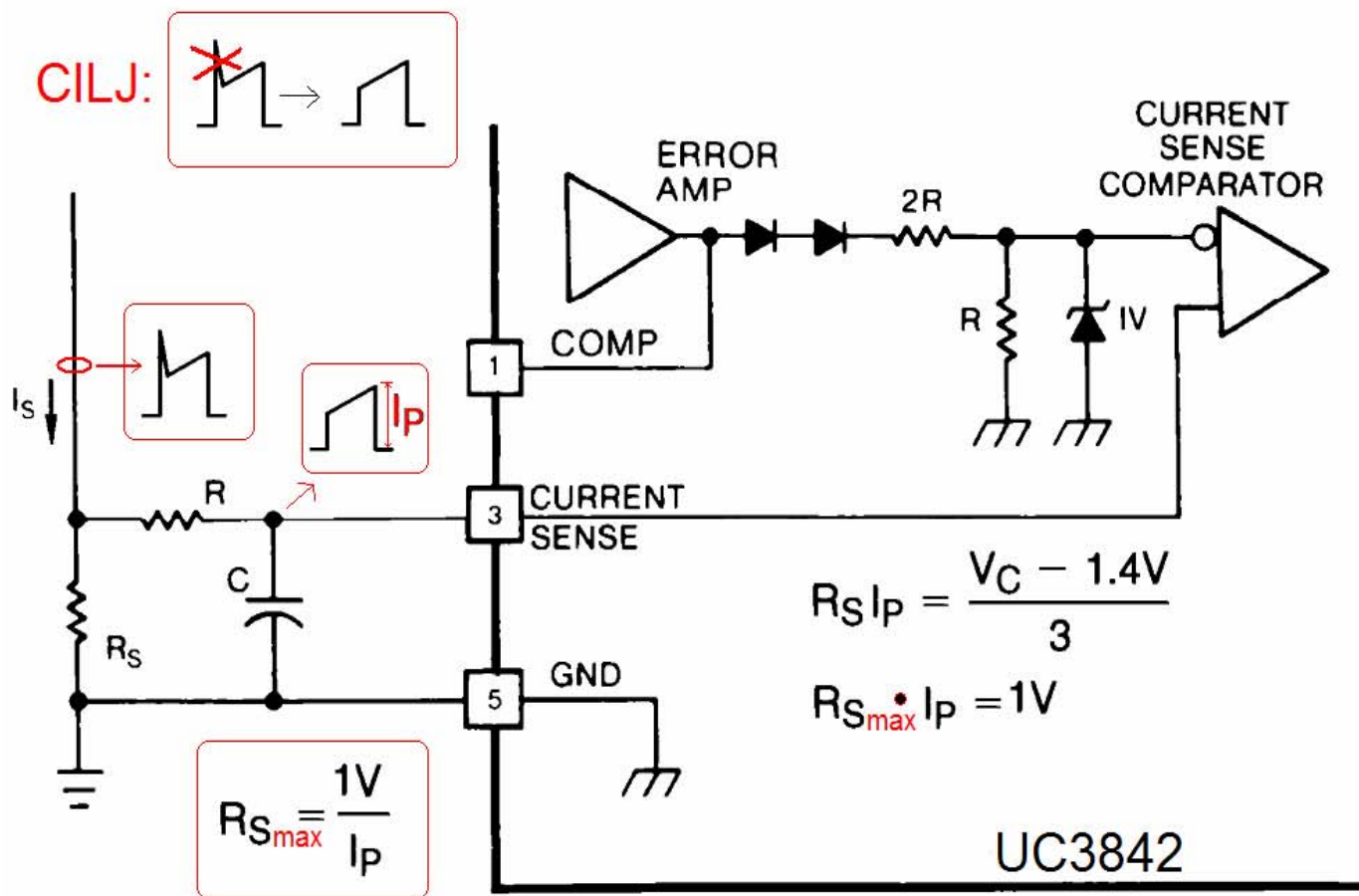
MERENJE STRUJE PREKO OTPORNIKA



U pretvaračima sa strujnom regulacijom veoma je bitno tačno i precizno merenje struje kao i trenutak dostizanja graničnih vrednosti. Jedan od načina je korišćenje naponskog signala dobijenog merenjem struje prekidačkog elementa. U ovoj primeni veoma je bitno da merni otpornik R_{sense} bude relativno mali (zbog disipacionih gubitaka) i da bude neinduktivni odnosno sa što manjom parazitnom induktivnošću. **ZAŠTO!!!**

PROBLEMI KOJI SE MOGU JAVITI PRI MERENJU STRUJE NA OTPORNOM ŠANTU!!!

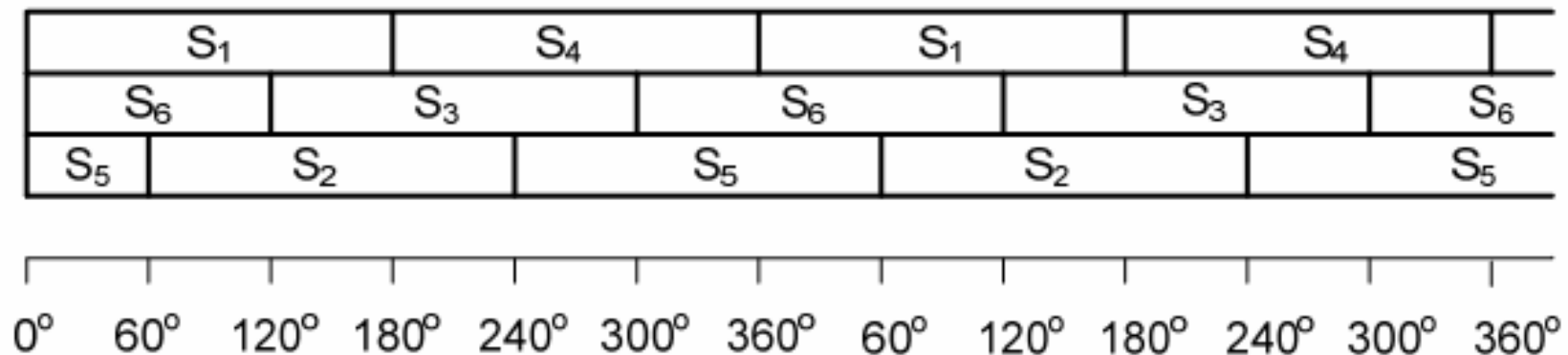
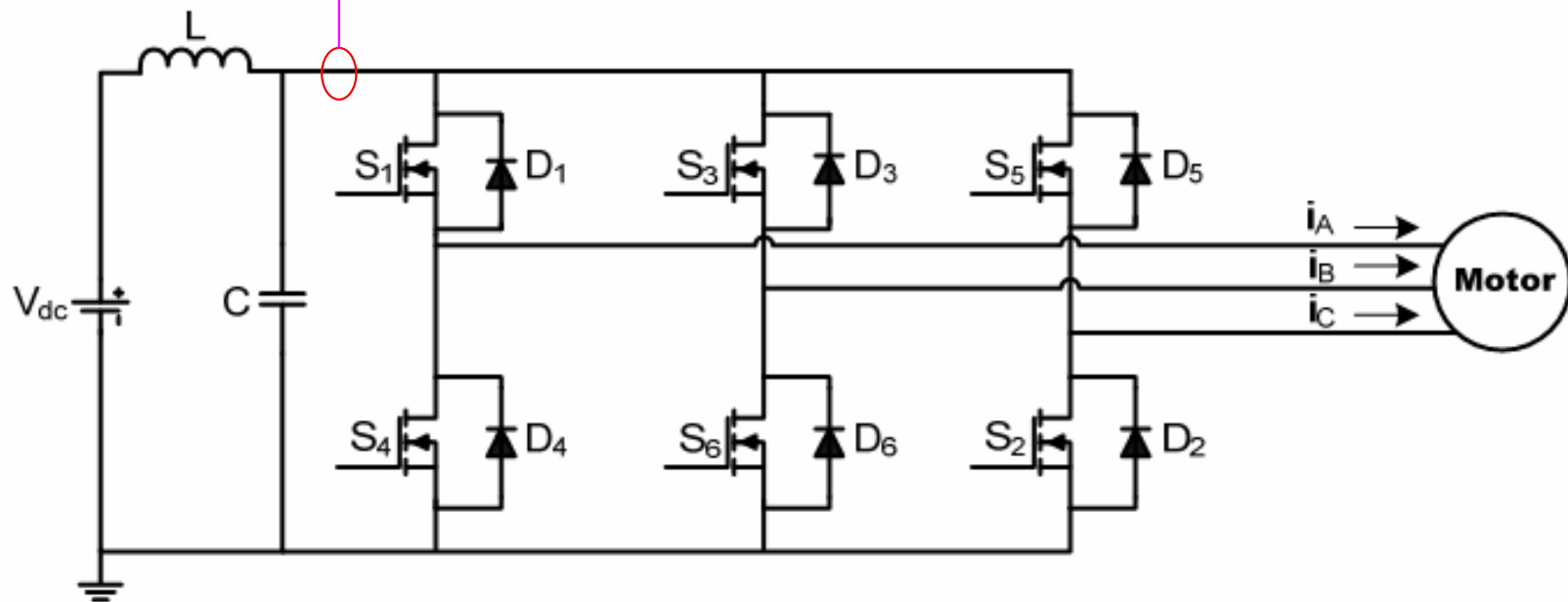
$$di/dt \rightarrow \infty \Rightarrow V_{\text{sense}} = L di/dt \rightarrow \infty$$



Usled parazitnih induktivnosti (otpornog šanta ili spojnih vodova) i usled talasnog oblika struje (sa strmom uzlaznom ivicom) mogu se javiti naponski pikovi (prenaponi) u naponu V_{sense} . Ovo jako “ometa” regularno merenje i može dovesti do pogrešnog rada RS flip flopa, odnosno same strujne regulacije!!! Mora biti pažljivo odabran RC filter. On ne sme da uspori mnogo odziv po merenoj struji, a treba da “priguši” pik u naponu V_{sense} . **TIPIČNO JE $R=1k$ i $C \approx 200-400pF$**

Naponski PWM inverter za regulaciju asinhronog motora

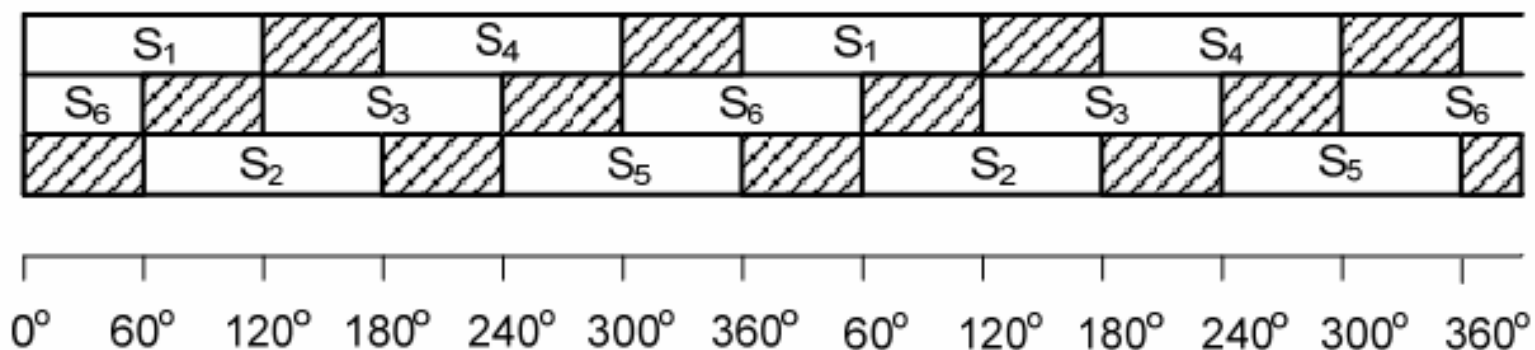
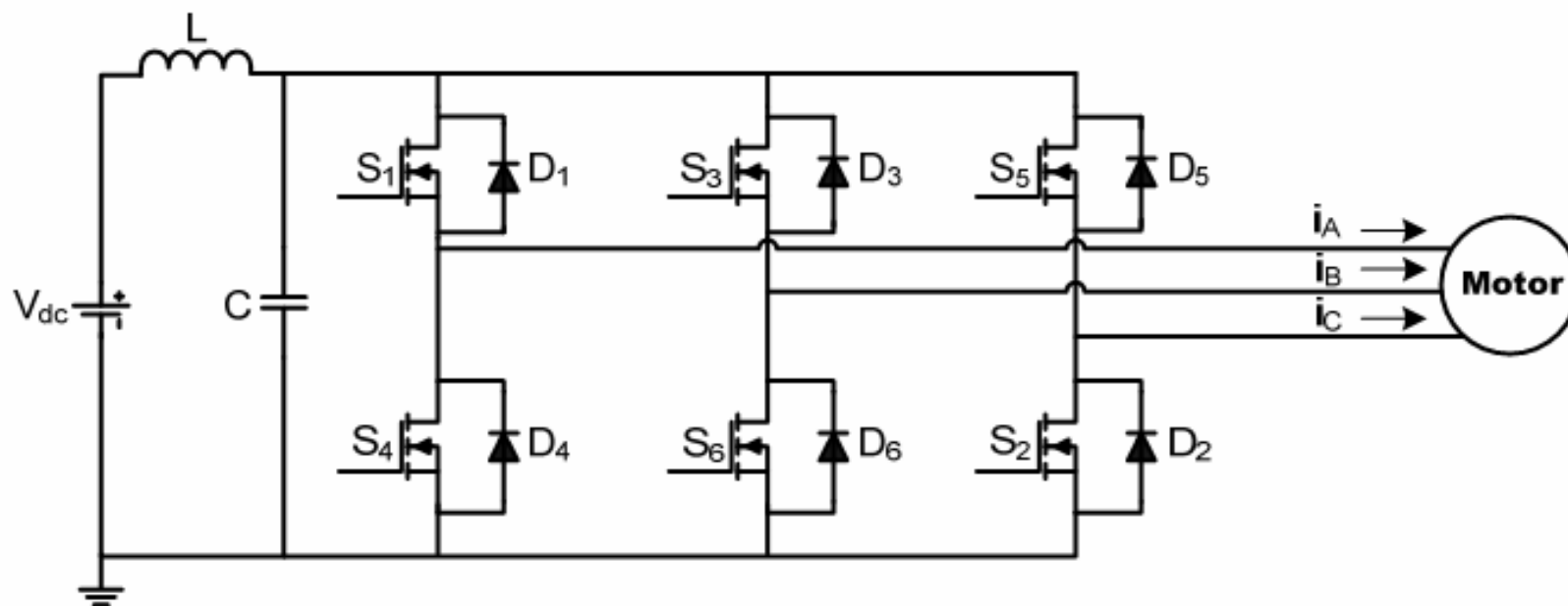
Da bi merili struju u "dc međukolu" bitno je da znamo sekvencu vođenja prekidača u invertorskom mostu



PREKIDAČKA SEKVENCA ZA MAX TRAJANJE VOĐENJA PREKIDAČA S1-S6
U INTERVALU 180°

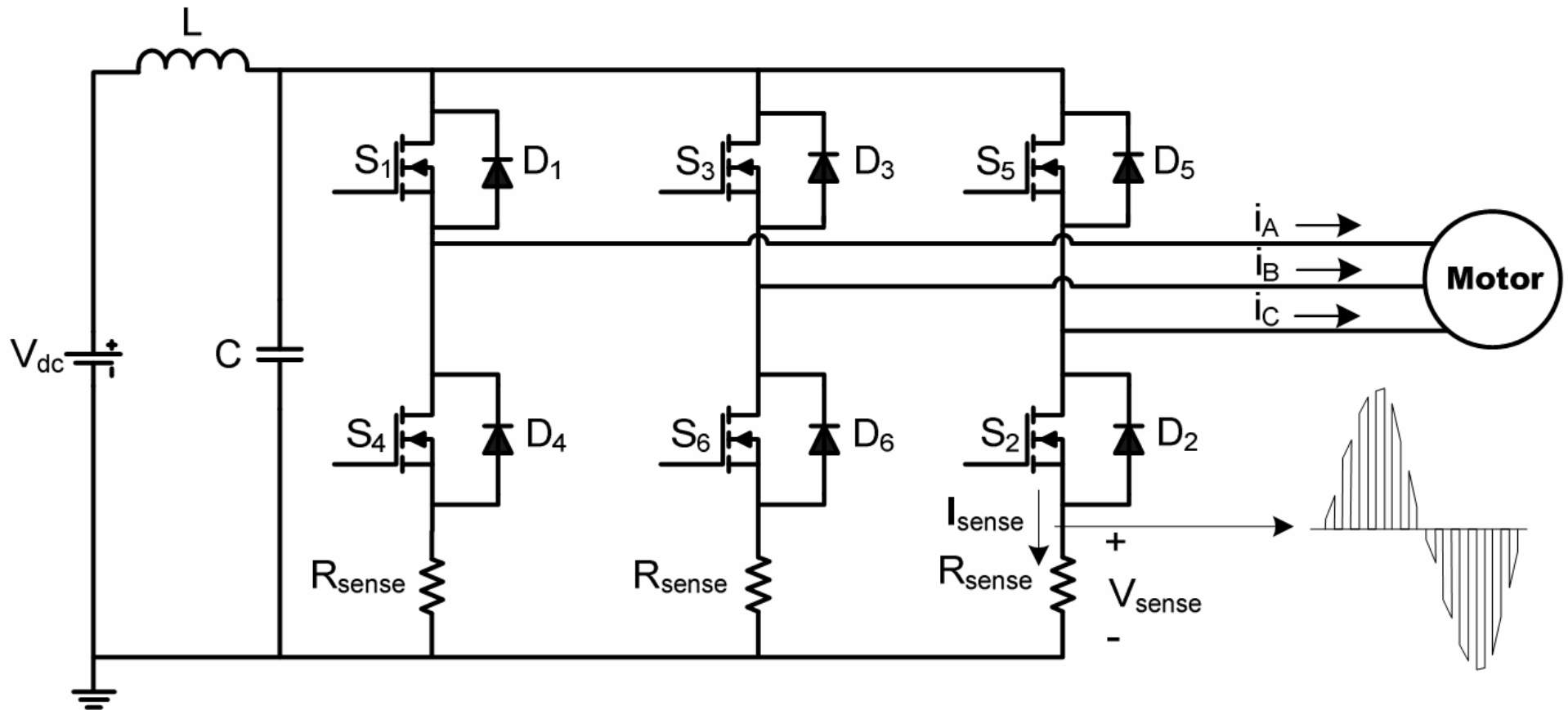
Naponski PWM inverter za regulaciju asinhronog motora

Sekvence vođenja prekidača u mostu za trajanje vođenja 120°



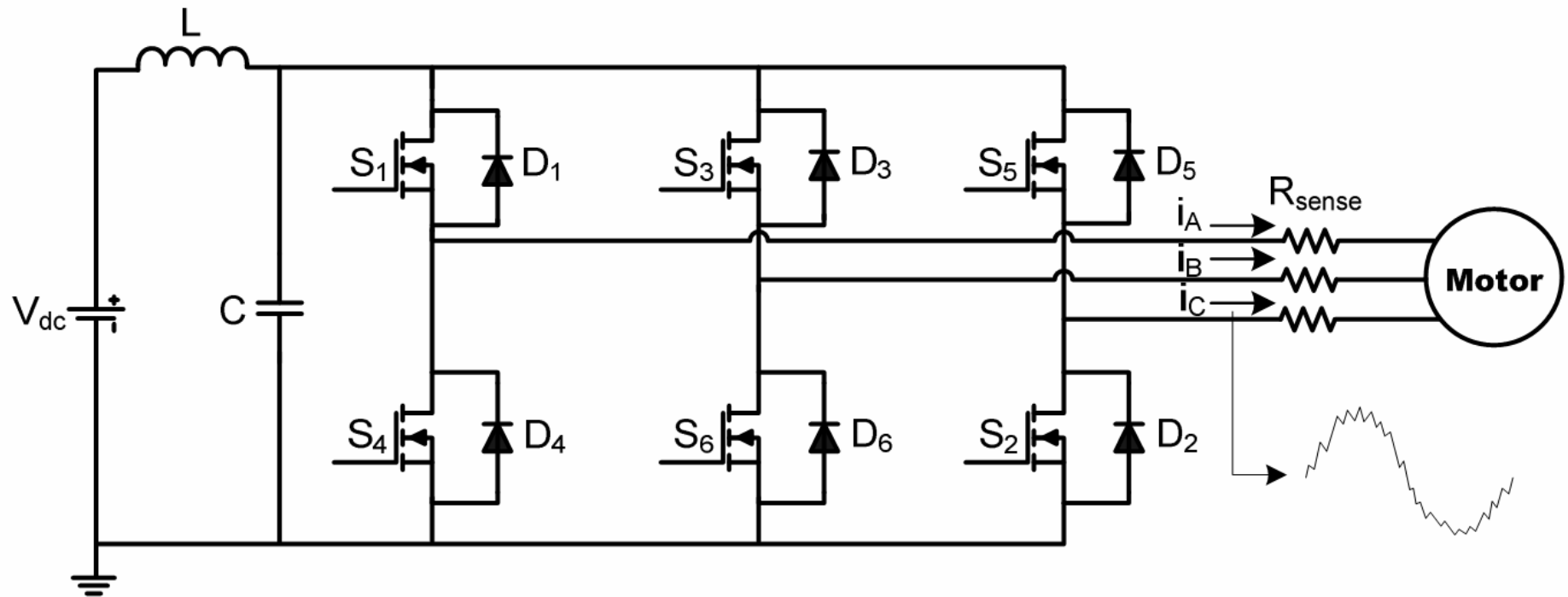
PREKIDAČKA SEKVENCA ZA MAX TRAJANJE VOĐENJA PREKIDAČA S1-S6
U INTERVALU 120°

“REKONSTRUKCIJA STRUJE MOTORA” PREKO S&H KOLA U REGULISANOM ELEKTROMOTORNOM POGONU



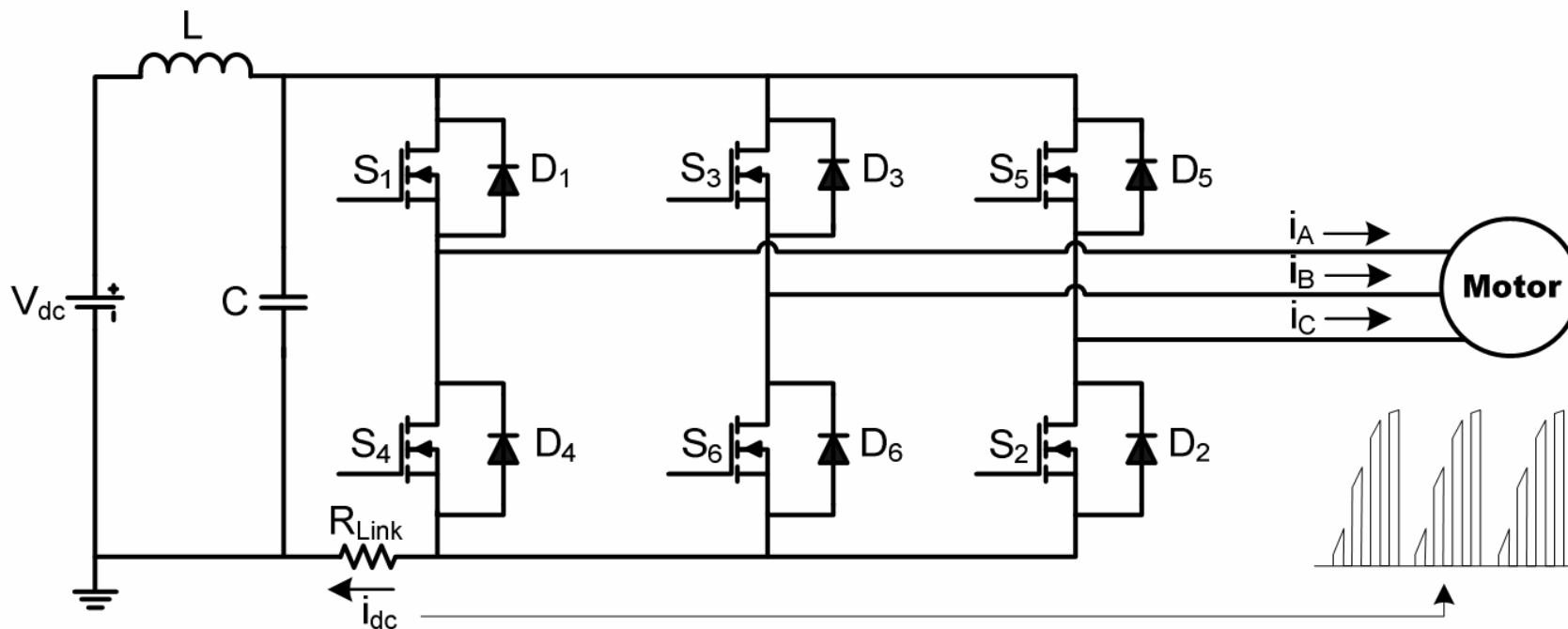
Mogućnost merenja struja motora, merenjem struja svakog od prekidača koji se nalaze u donjim granama mosta (ka masi). Dodaje se otpornik na red sa prekidačem i meri se napon V_{sense} na njemu. Jednostavno merenje. SAMPLE&HOLD kolo se takođe zahteva da bi se “rekonstruisala” struja motora iz prekidne ali ne toliko “egzotične” struje prekidača

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.

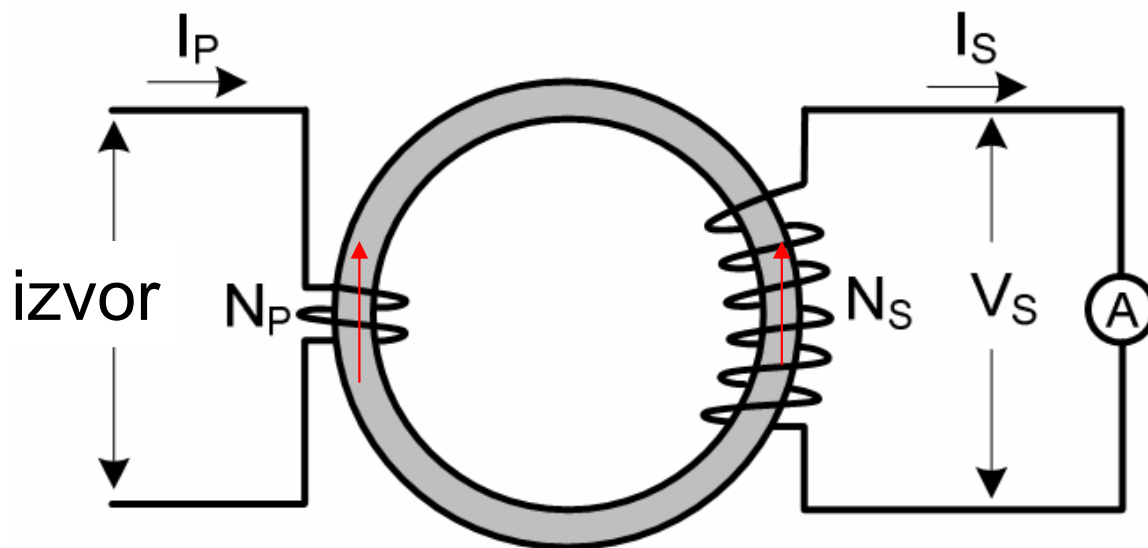
KORIŠĆENJE EKSTERNOG OTPORNIKA U “DC MEĐUKOLU”



Merena struja ne “liči” na faznu struju ali se fazne struje mogu rekonstruisati iz tabele

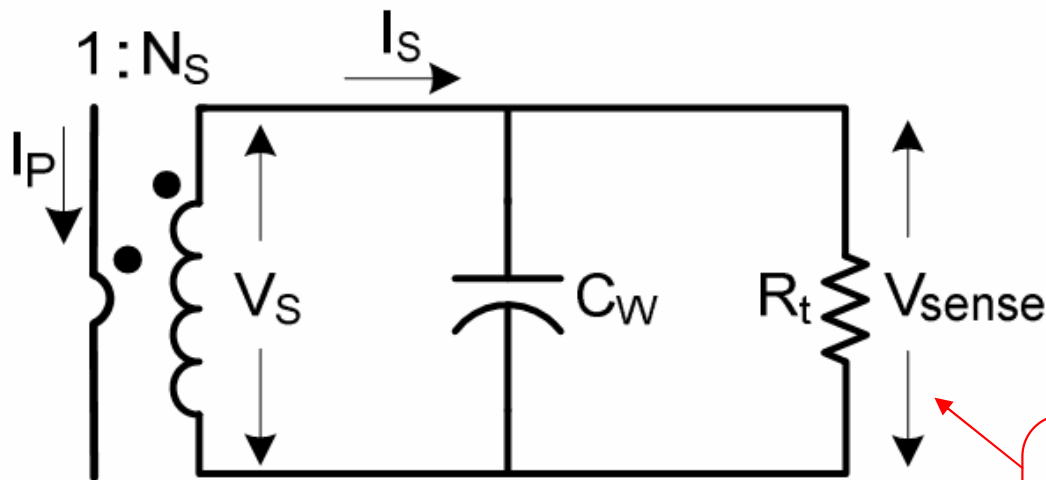
STANJE	i_{dc} za ugao vođenja 180°	i_{dc} za ugao vođenja 120°
1	$-i_B$	$i_A = -i_B$
2	i_A	$i_A = -i_C$
3	$-i_C$	$i_B = -i_C$
4	i_B	$i_B = -i_A$
5	$-i_A$	$i_C = -i_A$
6	i_C	$i_C = -i_B$

TEHNIKE MERENJA STRUJE KOJE KORISTE STRUJNI TRANSFORMATOR



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

AKO PRIMAR IMA SAMO JEDAN NAMOTAJ!!!



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

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

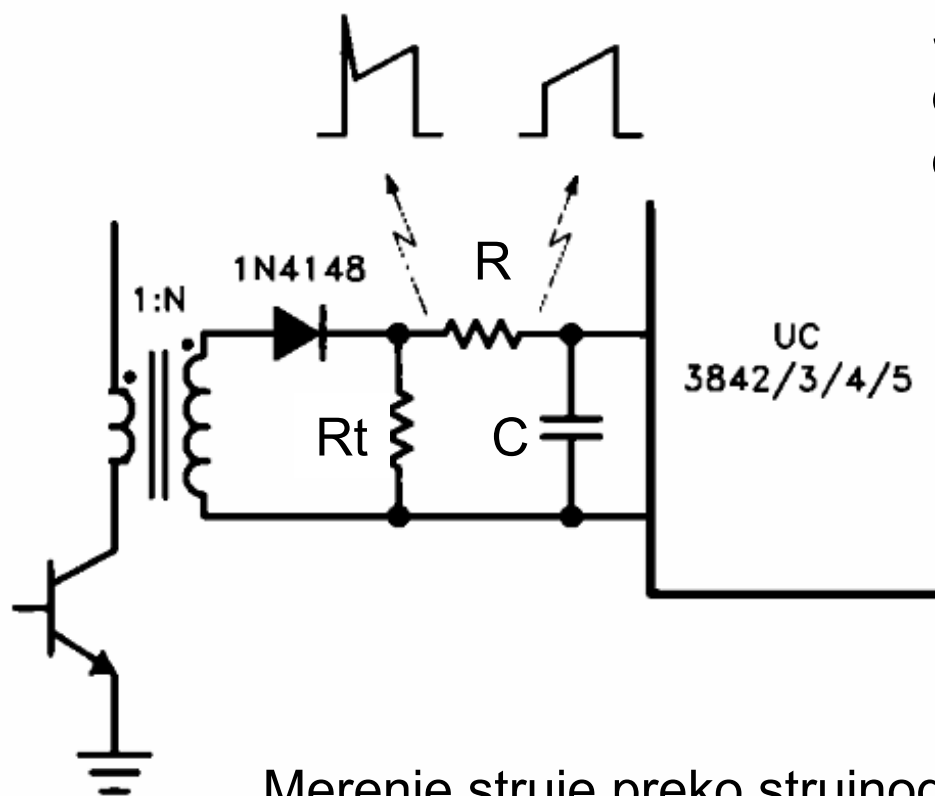
Na primaru imamo samo jedan namotaj $N_p=1$

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

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

TIPIČNA APLIKACIJA STRUJNOG TRANSFORMATORA KOD STRUJNE KONTROLE SA KONTROLEROM UC3842

$$i_{\max} = \frac{N \times 1V}{R_s}$$

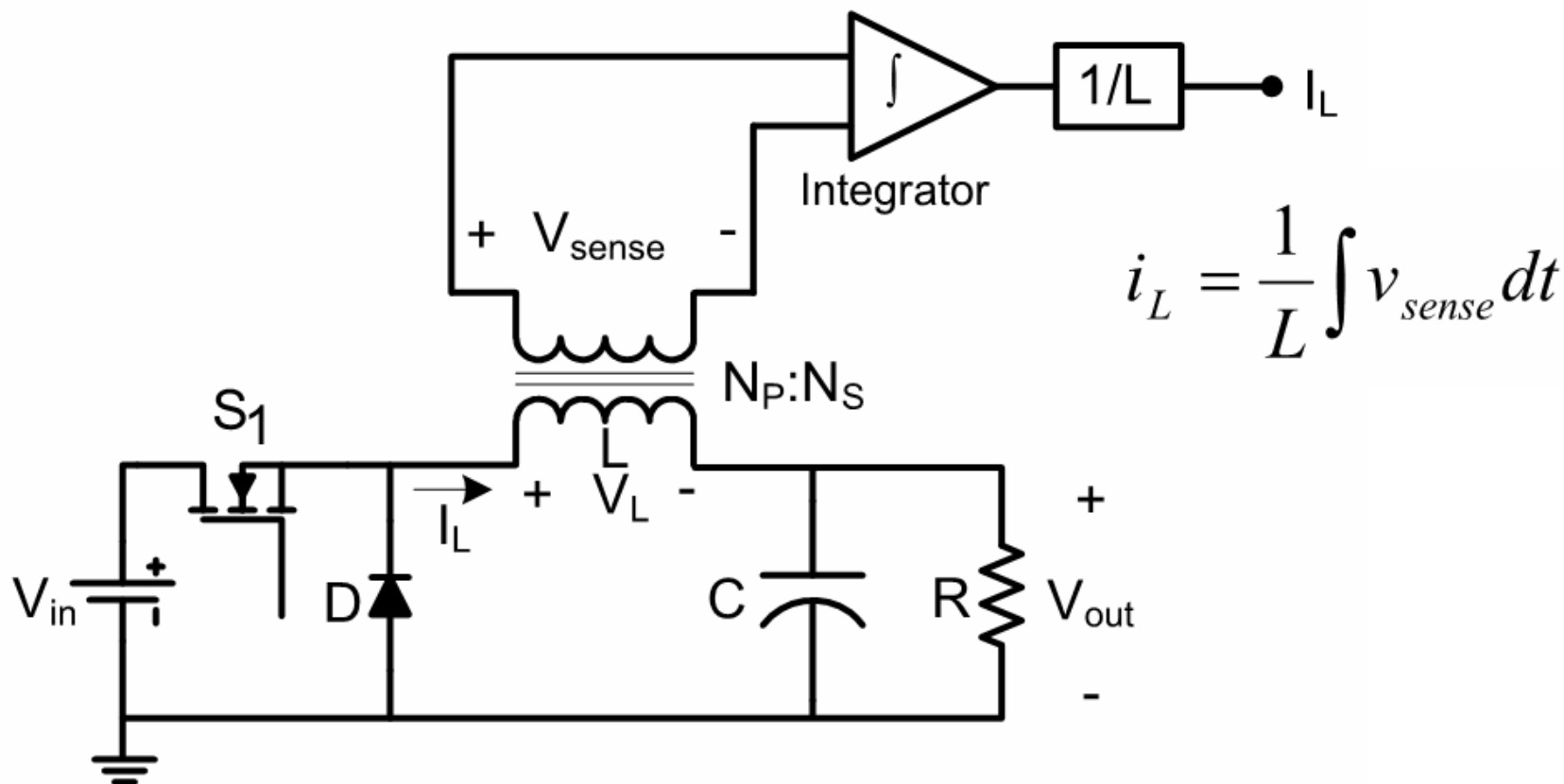


Sekundar transformatora je preko diode 1N4148 “zatvoren” sa otporom R_t .

Tipične vrednosti za
 $R=1k$
 $C=100pF$

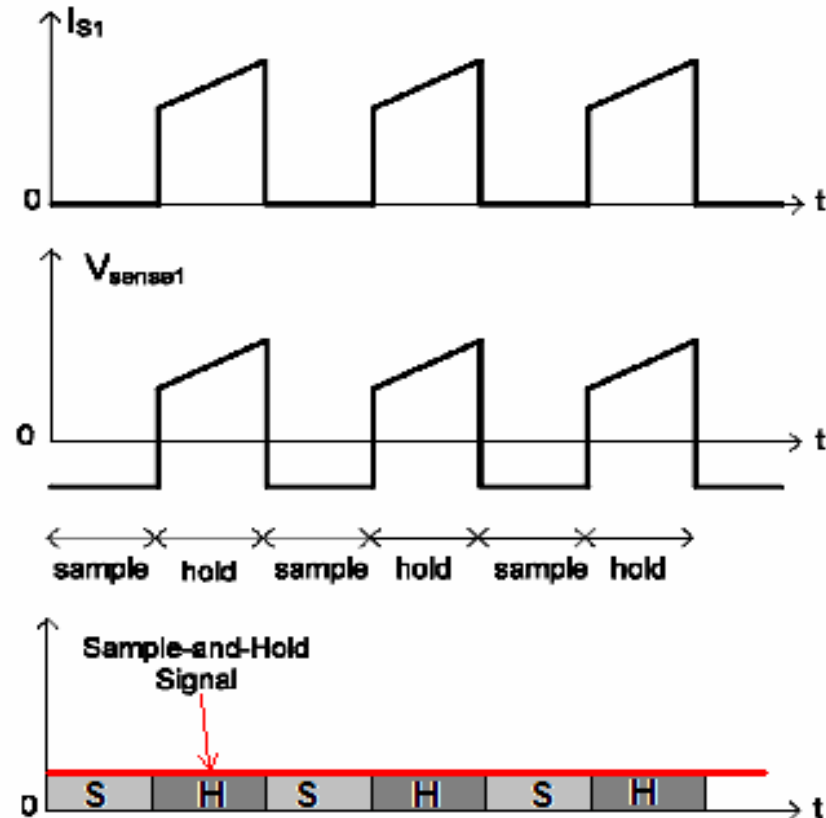
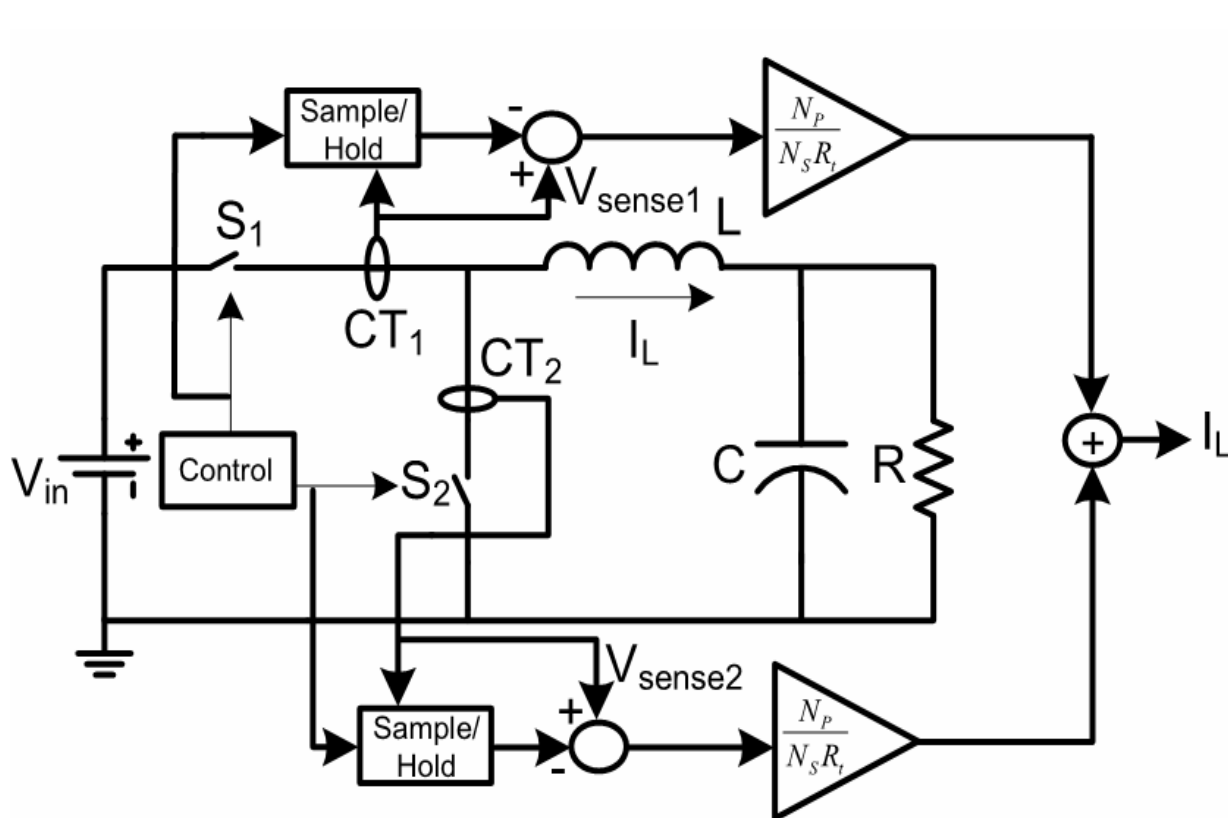
Merenje struje preko strujnog transformatora, korišćenjem RC filtra za filtriranje strujnog pika.

KORIŠĆENJE POSTOJEĆE INDUKTIVNOSTI KAO TRANSFORMATORA ZA MERENJE STRUJE.



Sekundarni namotaj se koristi za merenje, dok primarni predstavlja “radnu induktivnost”. Obavezno je korišćenje integratora i delitelja $1/L$ da bi imali merenje stvarne vrednosti struje I_L

ESTIMACIJA STRUJE INDUKTIVNOSTI KORIŠĆENJEM DVA AC STRUJNA TRANSFORMATORA I SAMPLE&HOLD KOLA



$$N_p I_p + N_s I_s = Hl$$

$$N_p I_p + N_s I_s = \frac{B}{\mu_0 \mu_r} l = \frac{\phi}{\mu_0 \mu_r A} l = R_e \phi$$

$$V_{sense} = I_s R_t = N_s \frac{d\phi}{dt}$$

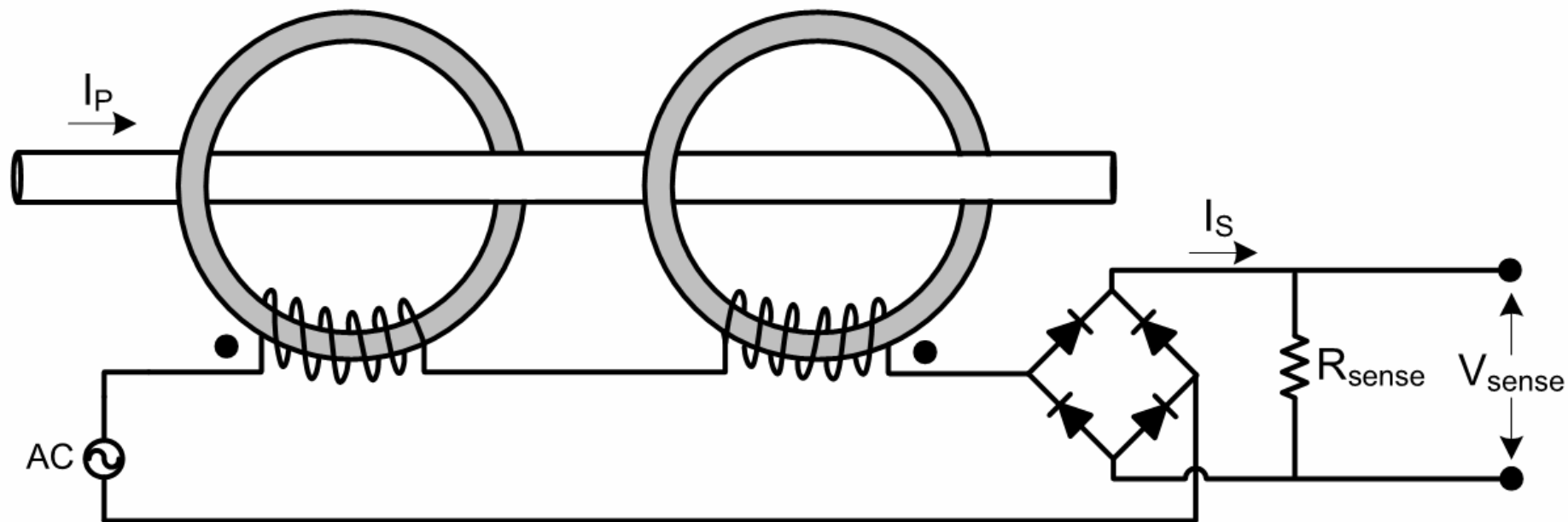
Učestanost "low pass"
filtra f_c mora biti mnogo manja
od prekidačke f_{sw}

$$\frac{I_s}{I_p} = \frac{N_p}{N_s} \left(\frac{ks}{1 - ks} \right)$$

$$k = (N_s^2) / (R_t R_e)$$

$$f_c = \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi R_t R_e}{N_s^2}$$

MERNA TEHNIKA KORIŠĆENJA DVA DC STRUJNA TRANSFORMATORA



Naponi na sekundarima su u opoziciji tako da ne remete rad diodnog ispravljača. To važi za oba smera struje primara I_P . Primar je zajednički i obično je to jedan prolazni provodnik. Tačke (smerovi motanja) određuju polaritet napona na sekundarima. Obavezno je korišćenje diodnog ispravljača (puno talasnog) i otpornosti R_{sense} .

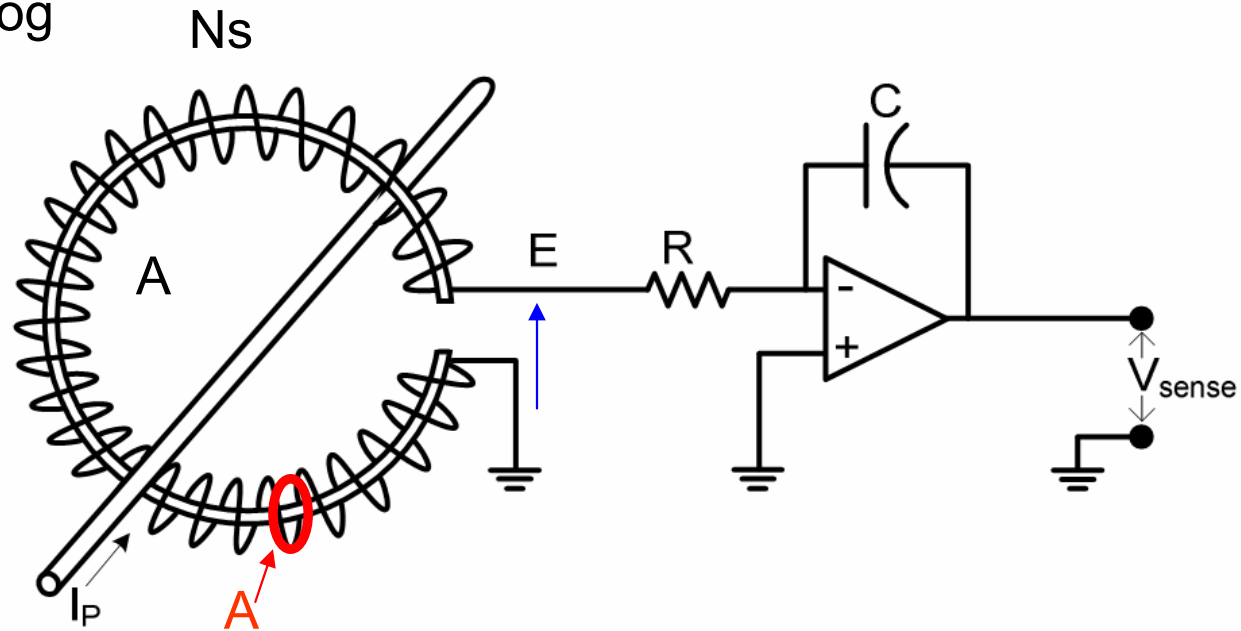
MERNA TEHNIKA BAZIRANA NA VAZDUŠNOM STRUJNOM TRANSFORMATORU- KALEM ROGOVSKOG

KORIŠĆENJE KALEMA ROGOVSKOG

Induktivnost vazdušnog kalema je:

$$M = \frac{\mu_0 AN_s}{l}$$

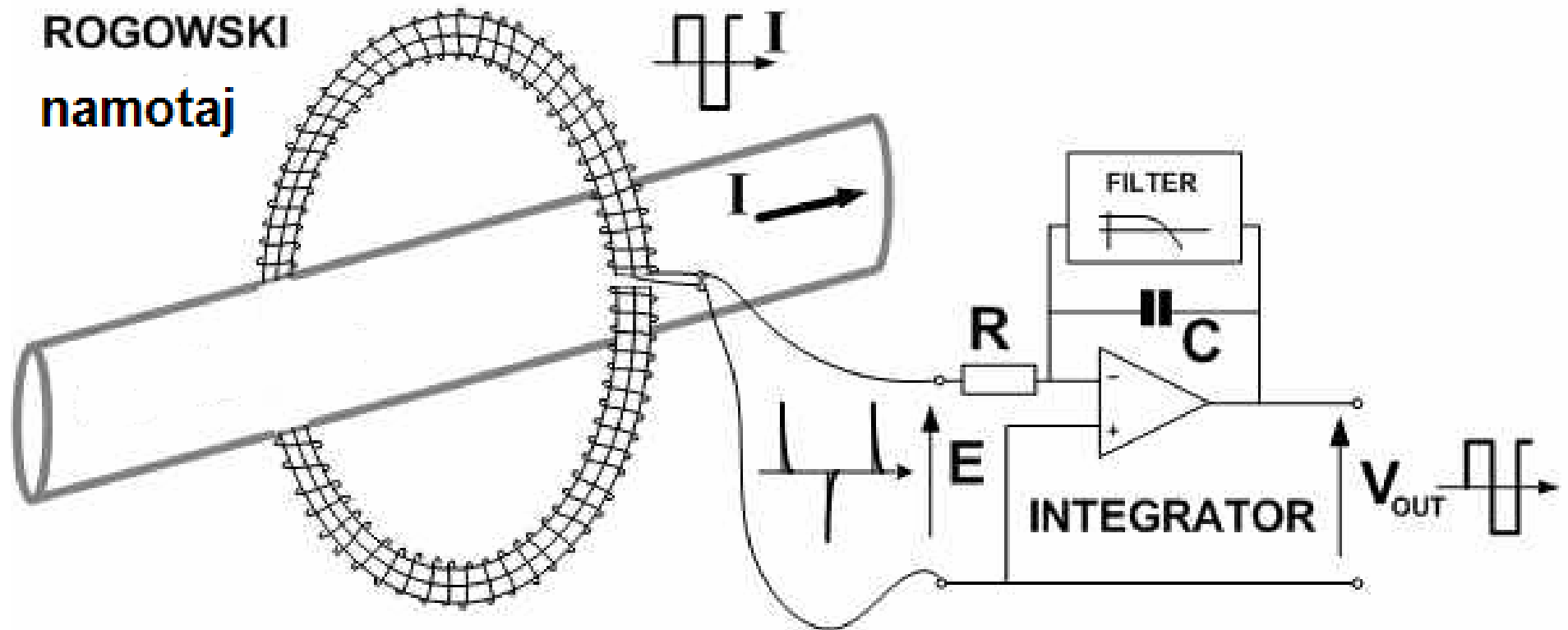
$$E = M \frac{dI_P}{dt}$$



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

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)

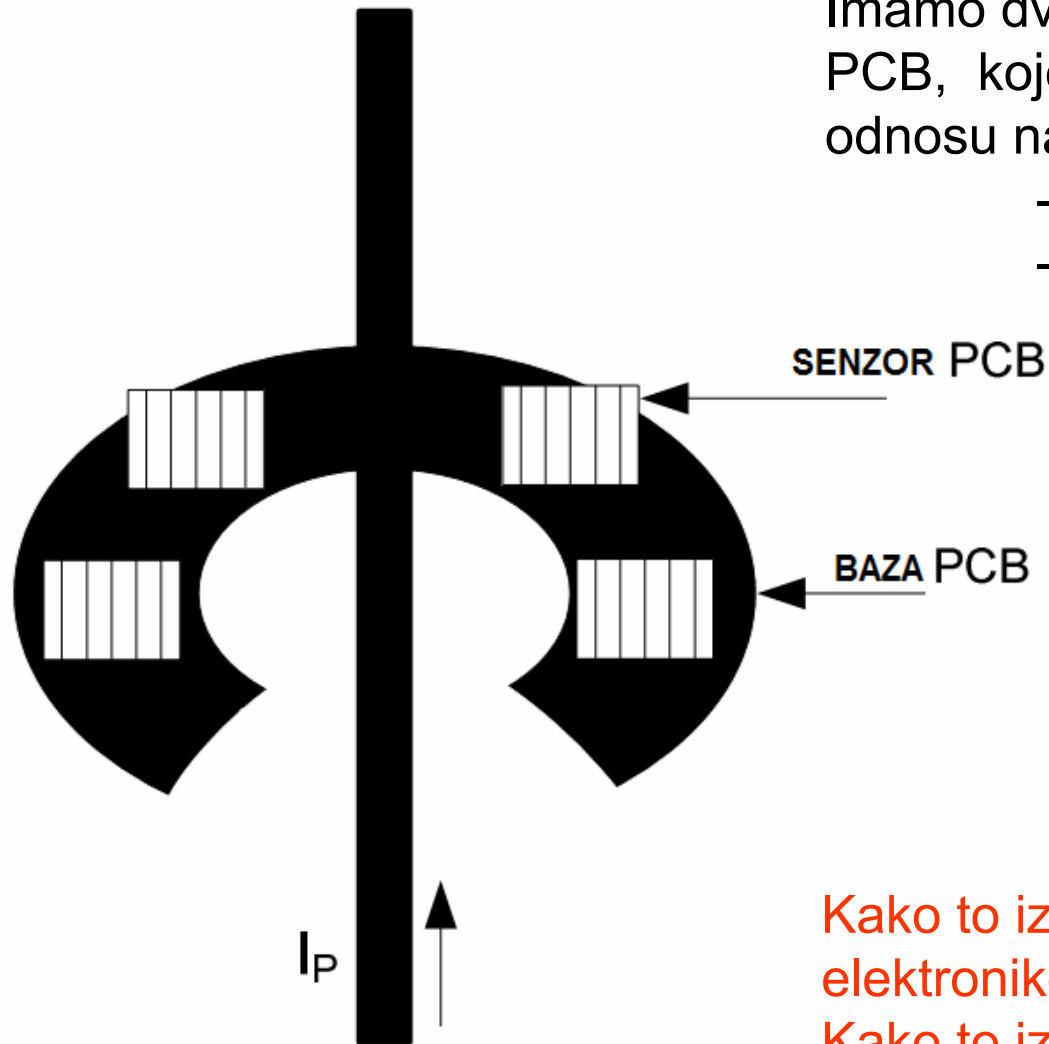


Merenje diferencira originalnu struju (to je ustvari napon E). Da bi dobili originalnu struju I moramo ustvari da integralimo napon E . Tako je izlazni napon integratora $V_{out} \sim I$

KORIŠĆENJE PLANARNIH KALEMOVA ROGOVSKOG

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

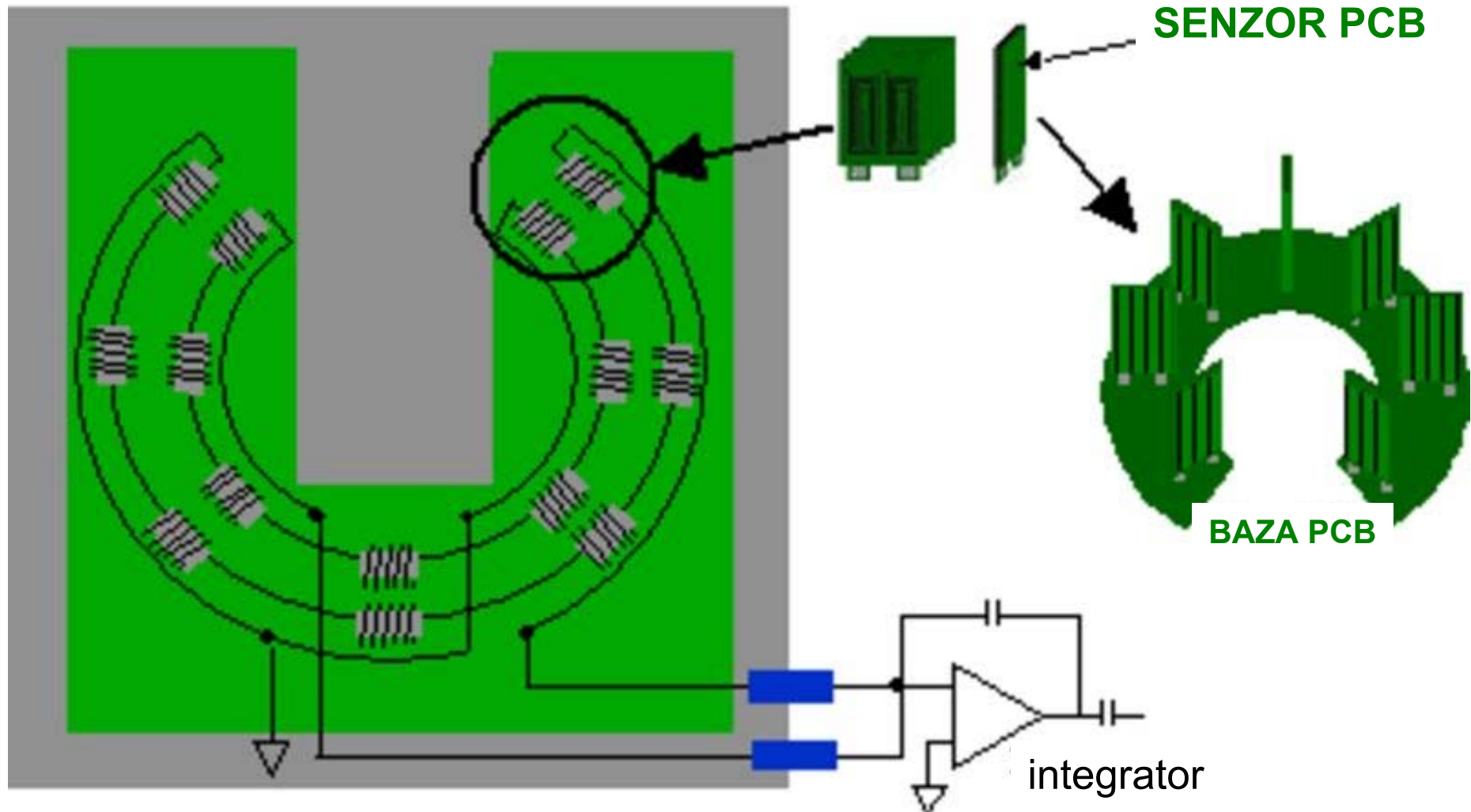
- senzorska PCB
- bazna PCB



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.

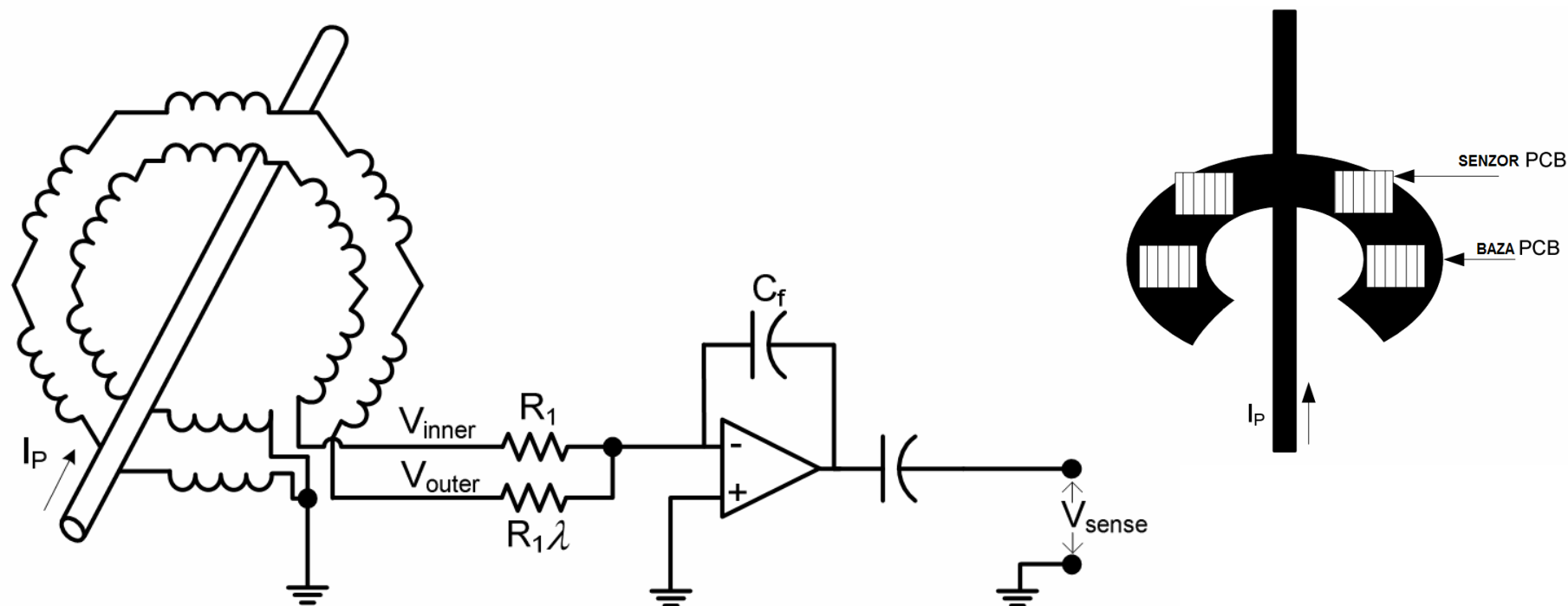
Kako to izgleda u kombinaciji sa pojačavačkom elektronikom?
Kako to izgleda u 3D?

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

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

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

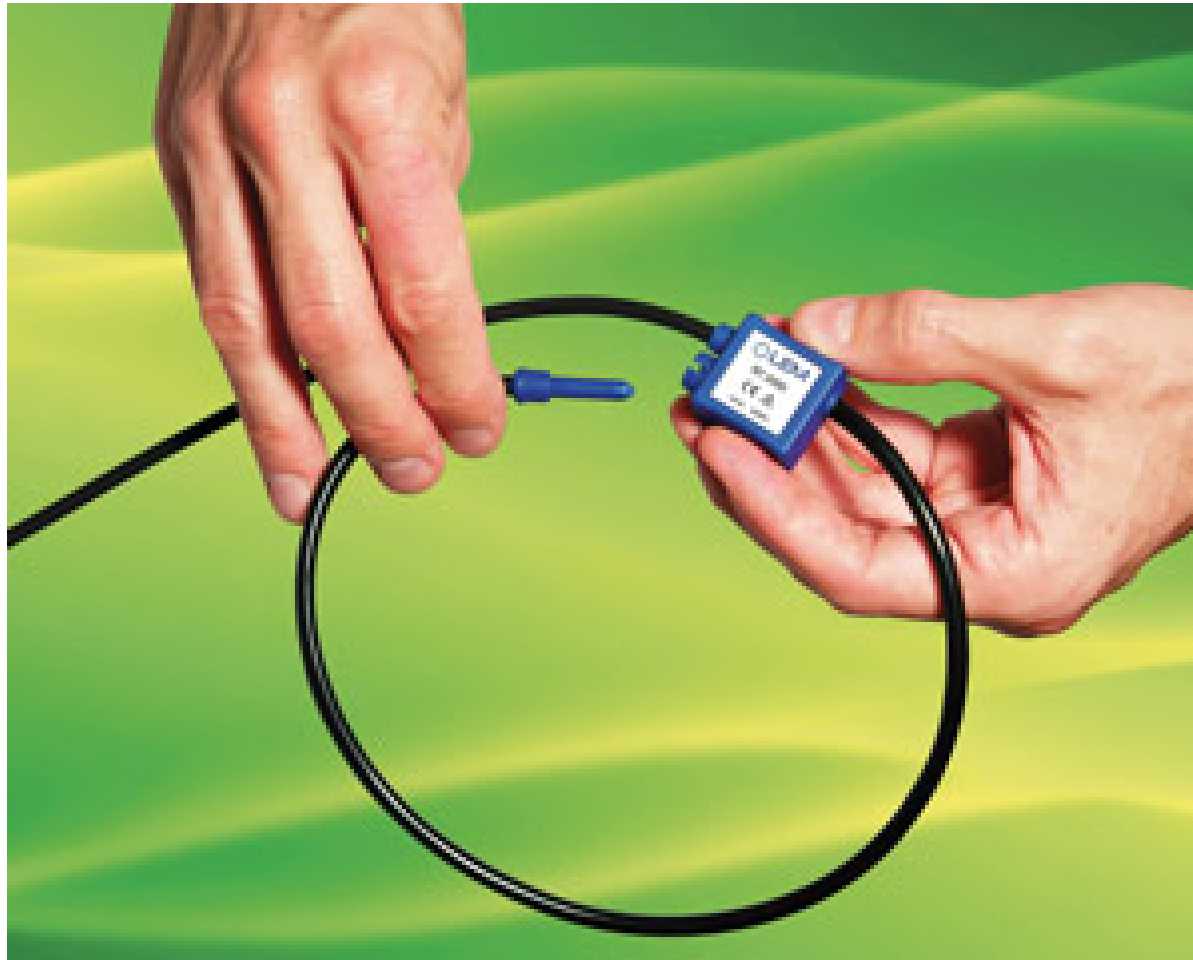
Propusni opseg 10kHz-100kHz

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

IZGLED KALEMA ROGOWSKOG (zatvoren)



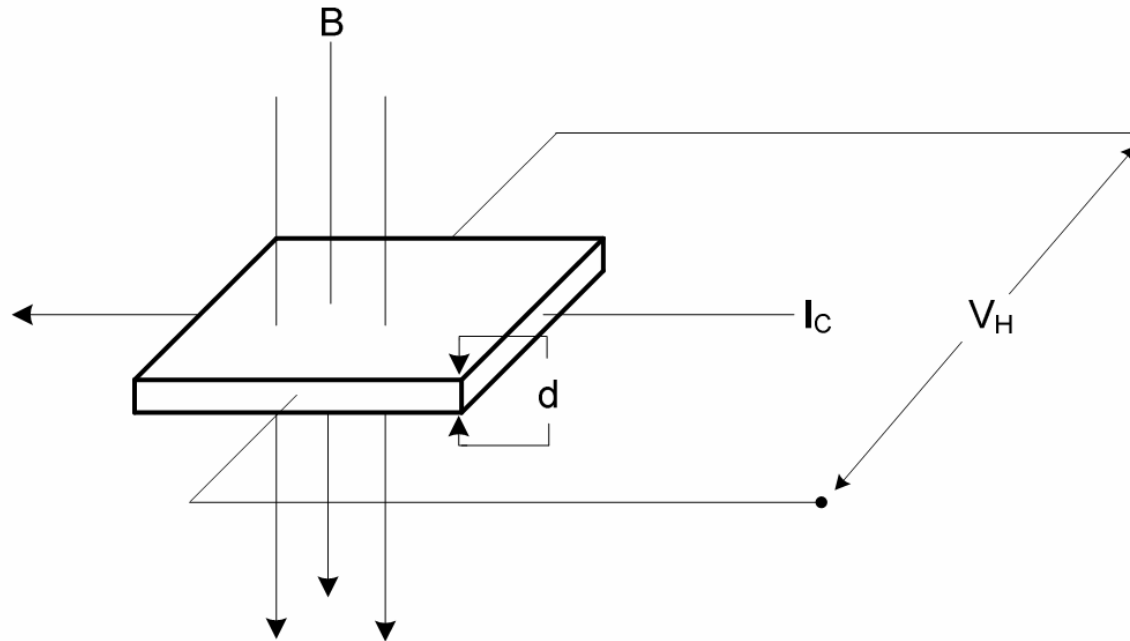
OTVOREN KALEM
sa modulom TRANSMITERA (merne elektronike)



STRUJNE TEHNIKE BAZIRANE NA HOLOVOM EFEKTU

Holov efekat?

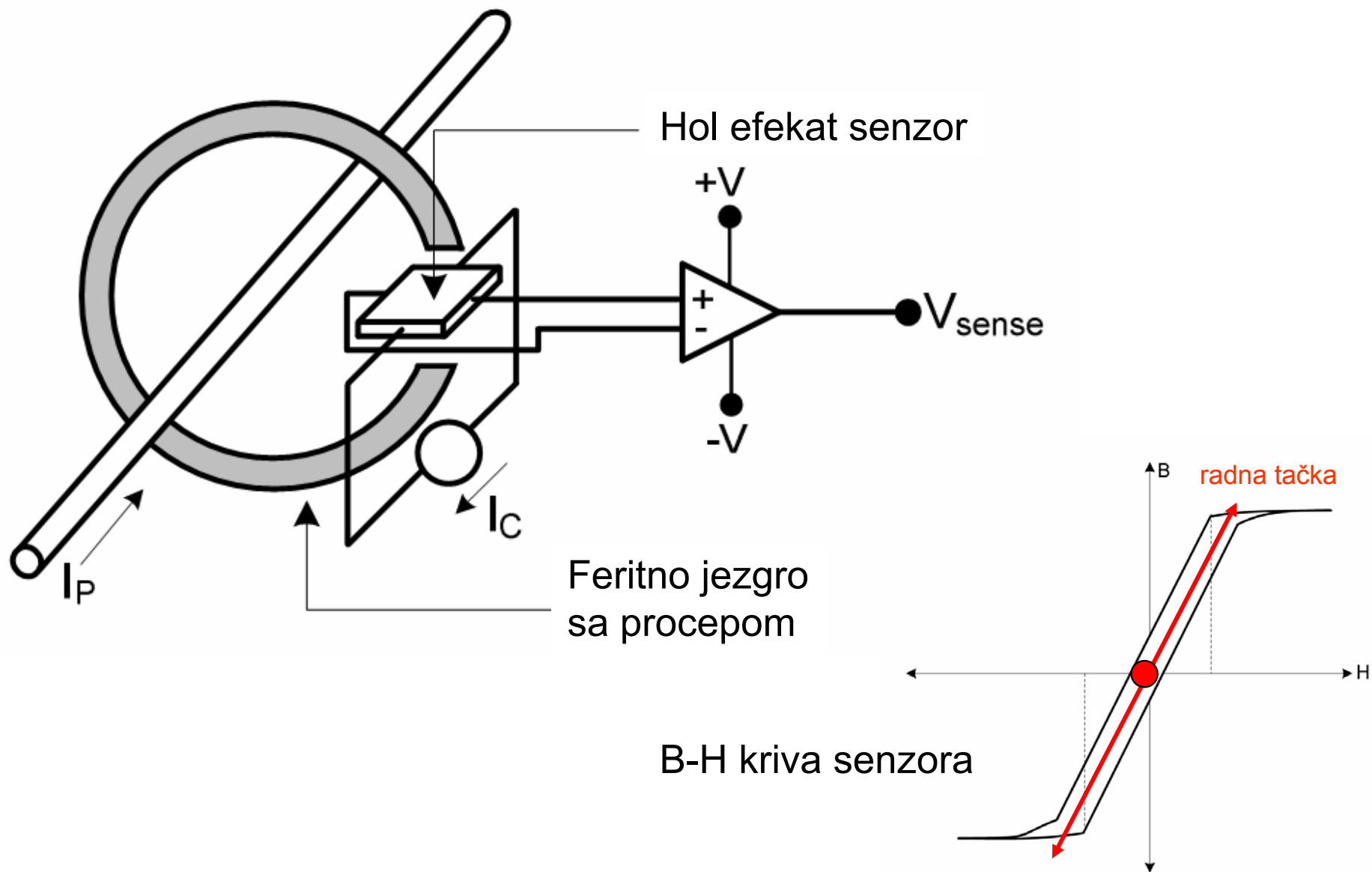
Hall effect?



Holov napon

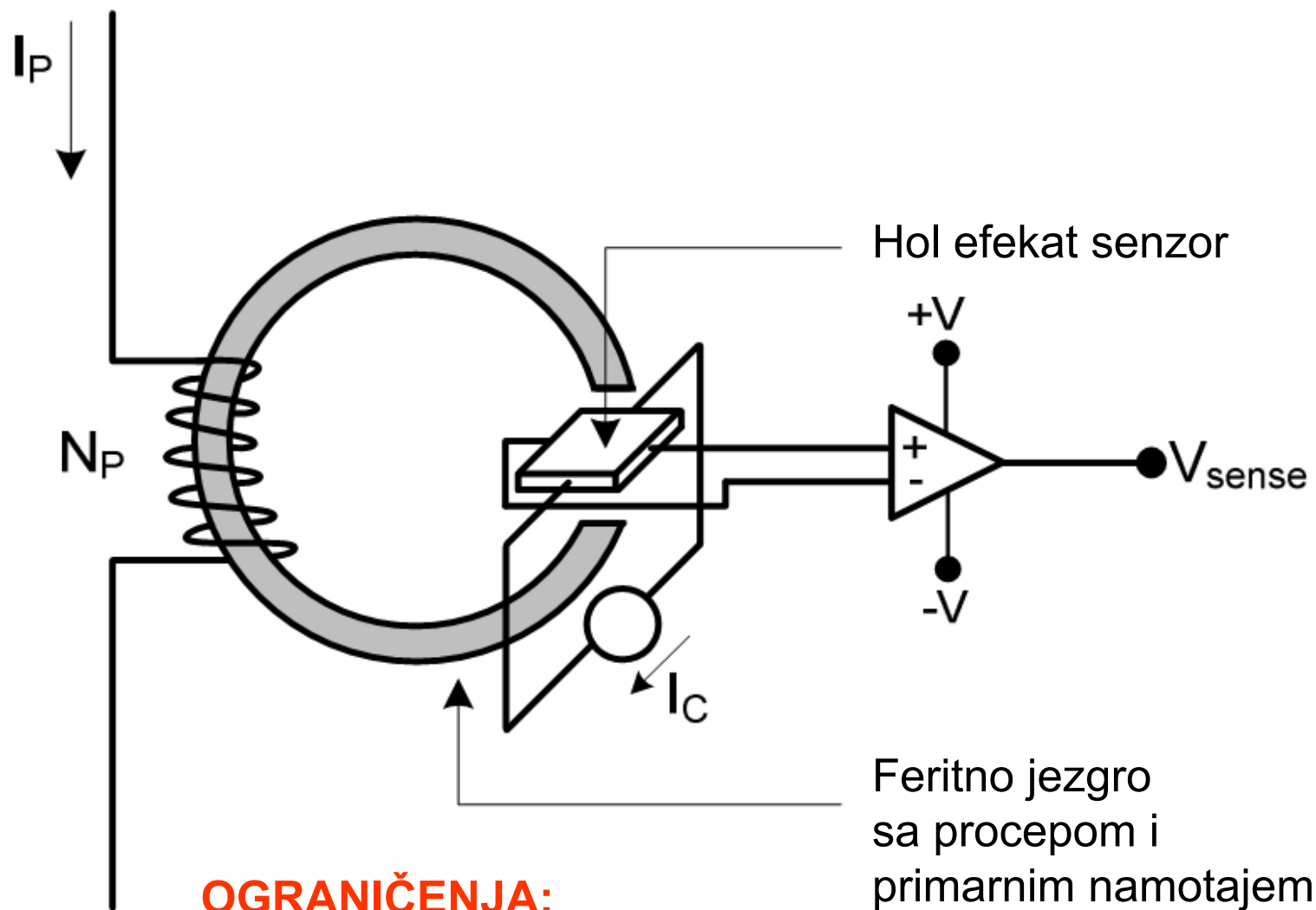
$$V_H = \frac{K}{d} B I_c + V_{OH} \rightarrow \text{Offset napon koji postoji i kada nema eksternog polja}$$

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



MERENJE STRUJE SA HOL EFEKAT SENZOROM ali SA VELIKIM BROJEM NAMOTAJA NA PRIMARU-PROLAZNOM PROVODNIKU

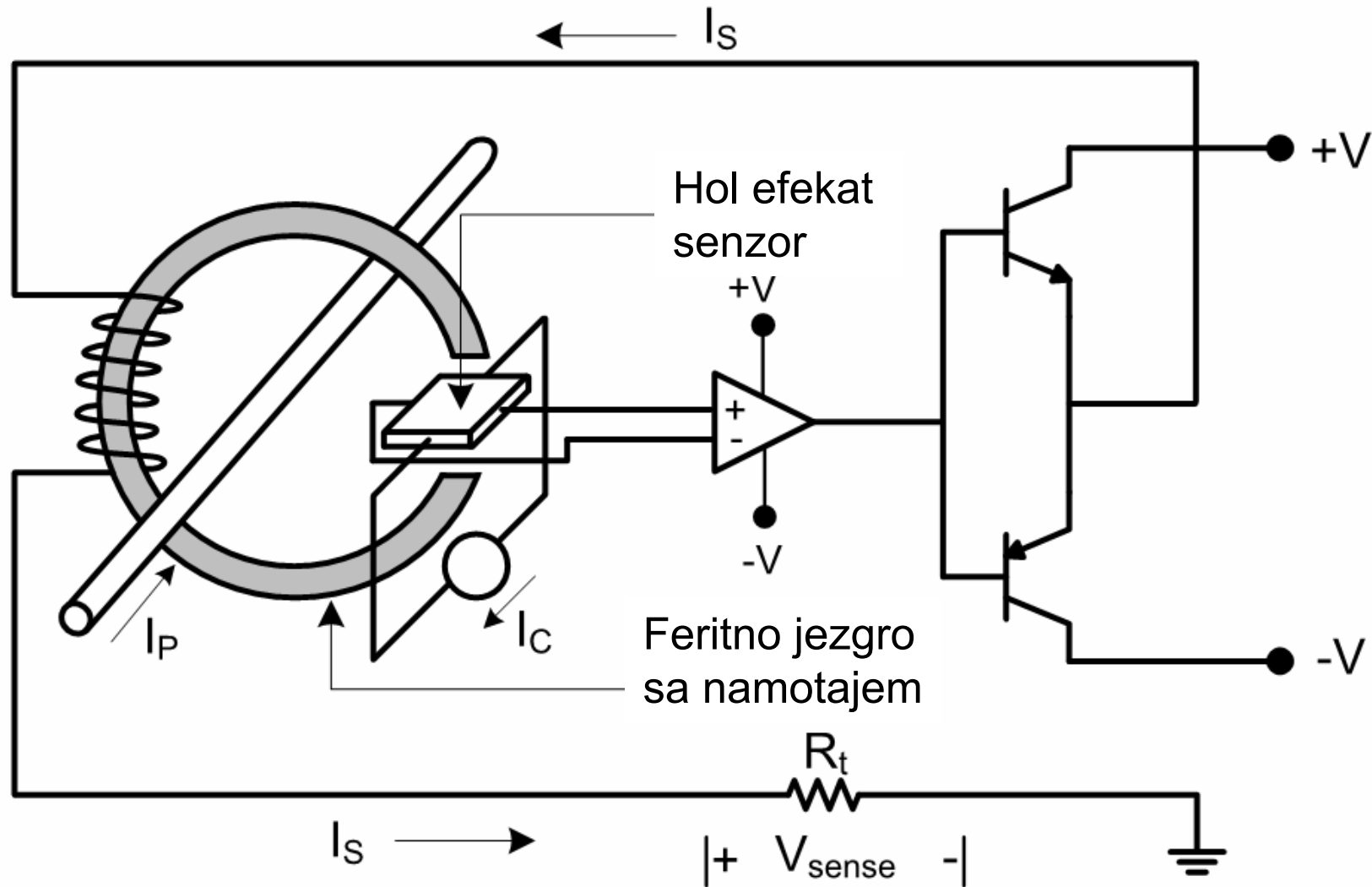
(u otvorenoj povratnoj sprezi)



OGRANIČENJA:

- struje do 50A
- propusni opseg 0-25kHz
- zasićenje magnetnog kola

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

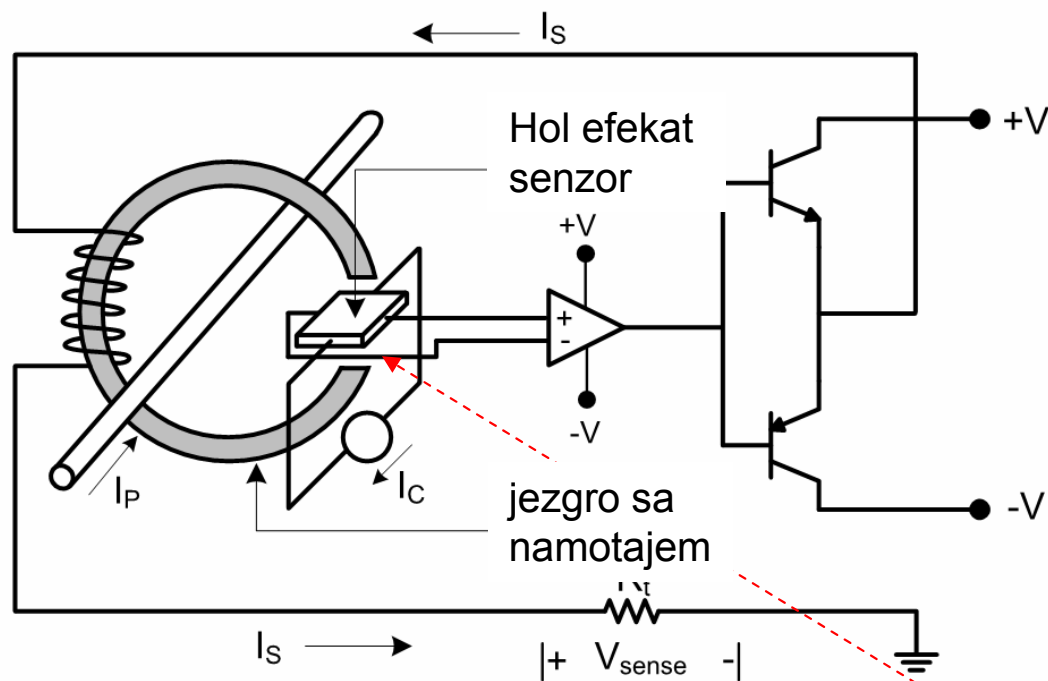


$$N_P I_P = N_S I_S$$

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

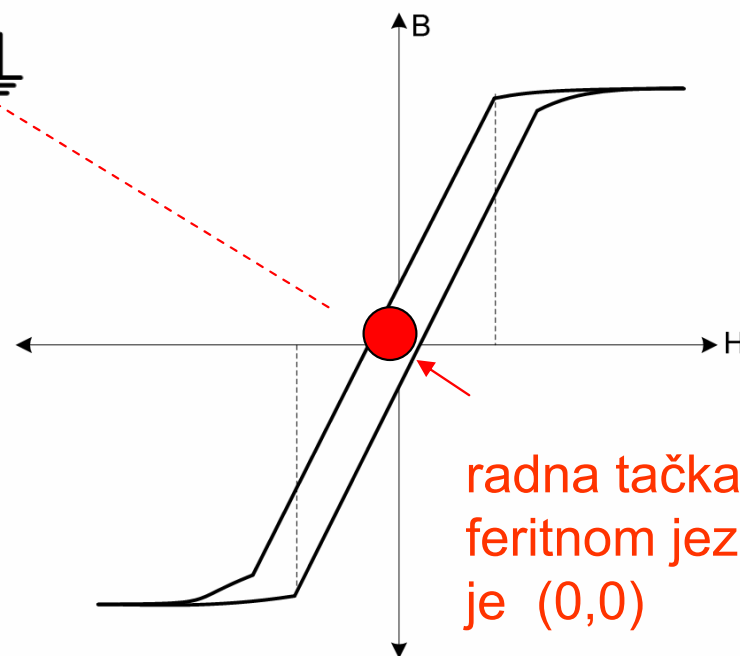
GDE SE NALAZI RADNA TAČKA??

RADNA TAČKA U FERITNOM JEZGRU PRI KOMPENZOVANOM FLUKSU

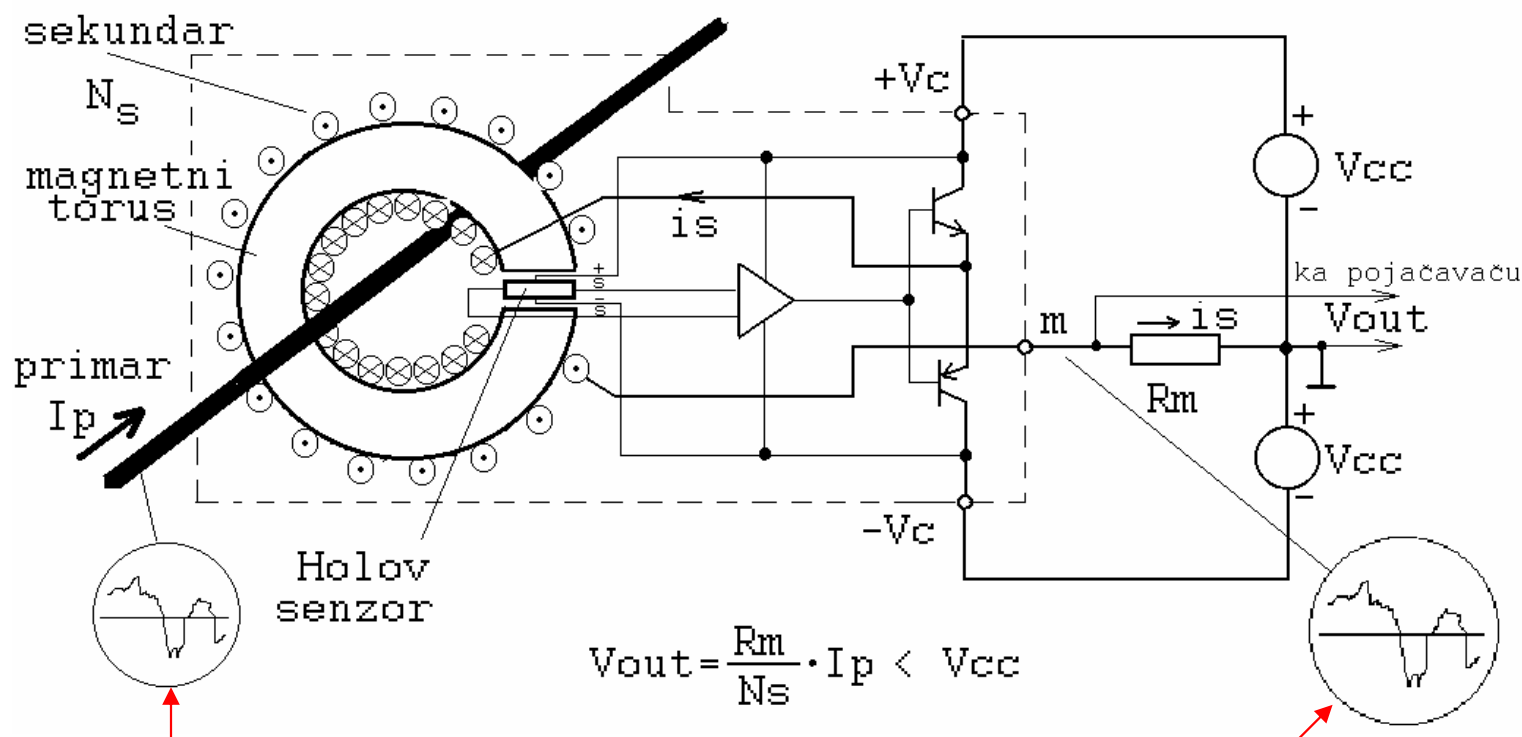


$$N_P I_P = N_S I_S$$

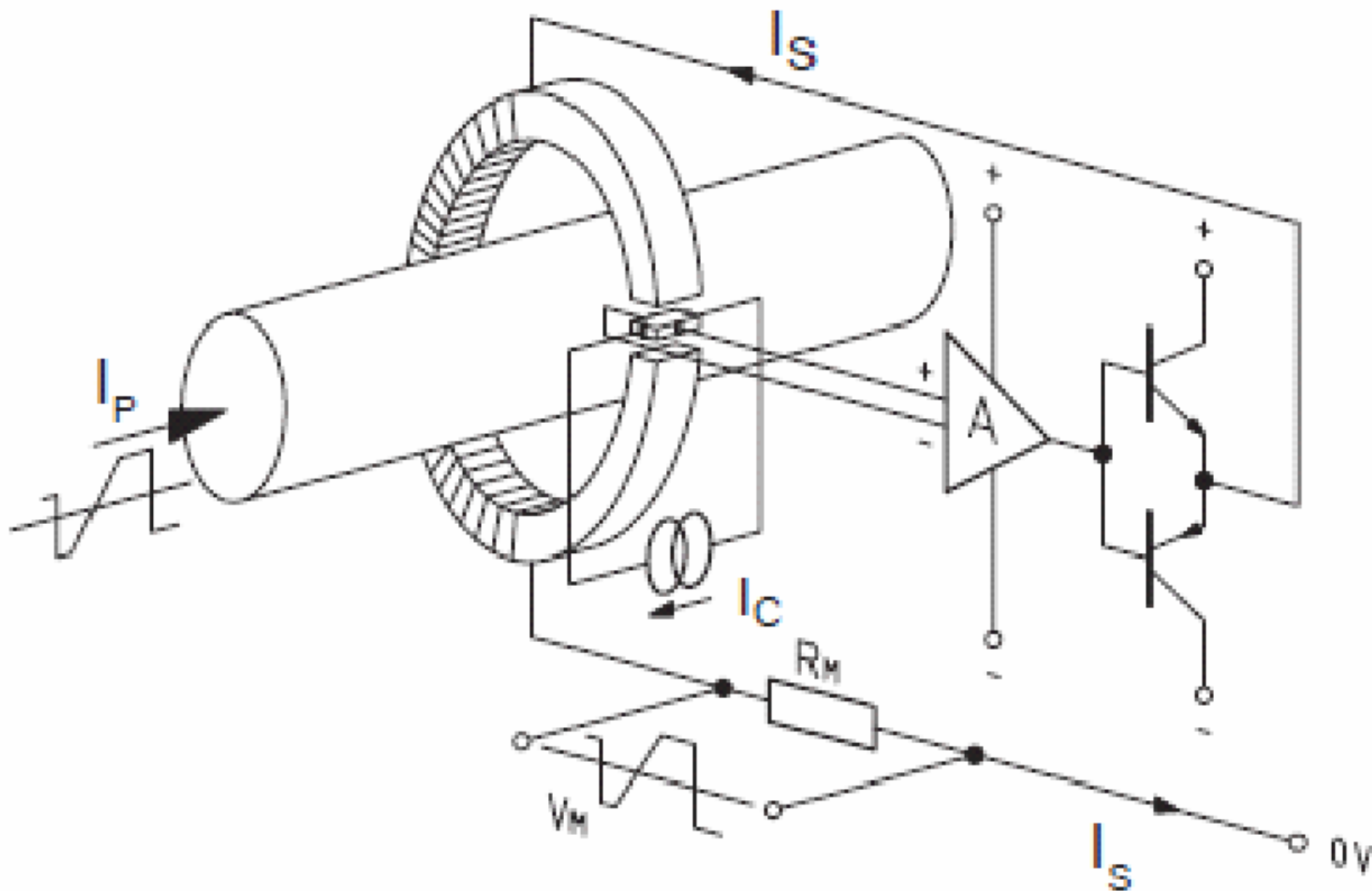
Magnetni fluks u procepu
kompenzovan tj $B=0$, $H=0$



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.**



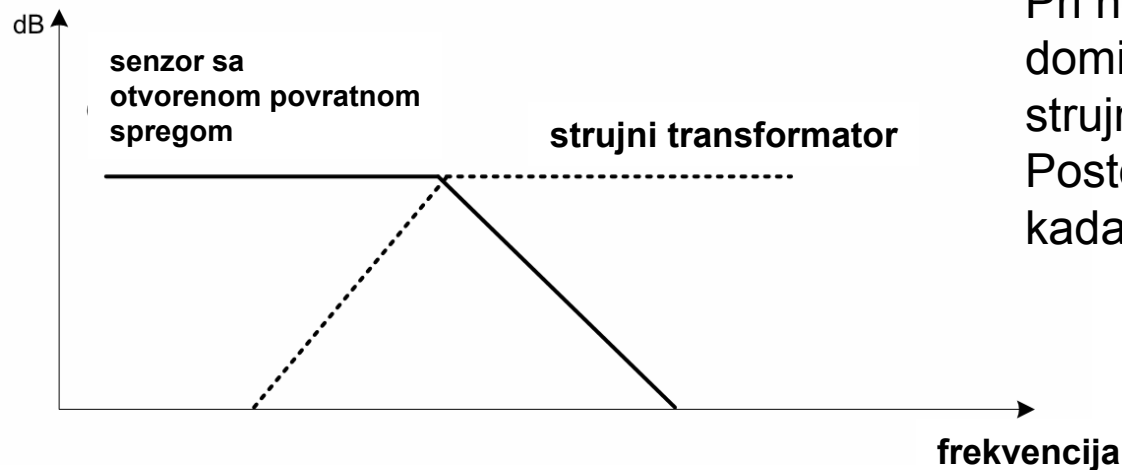
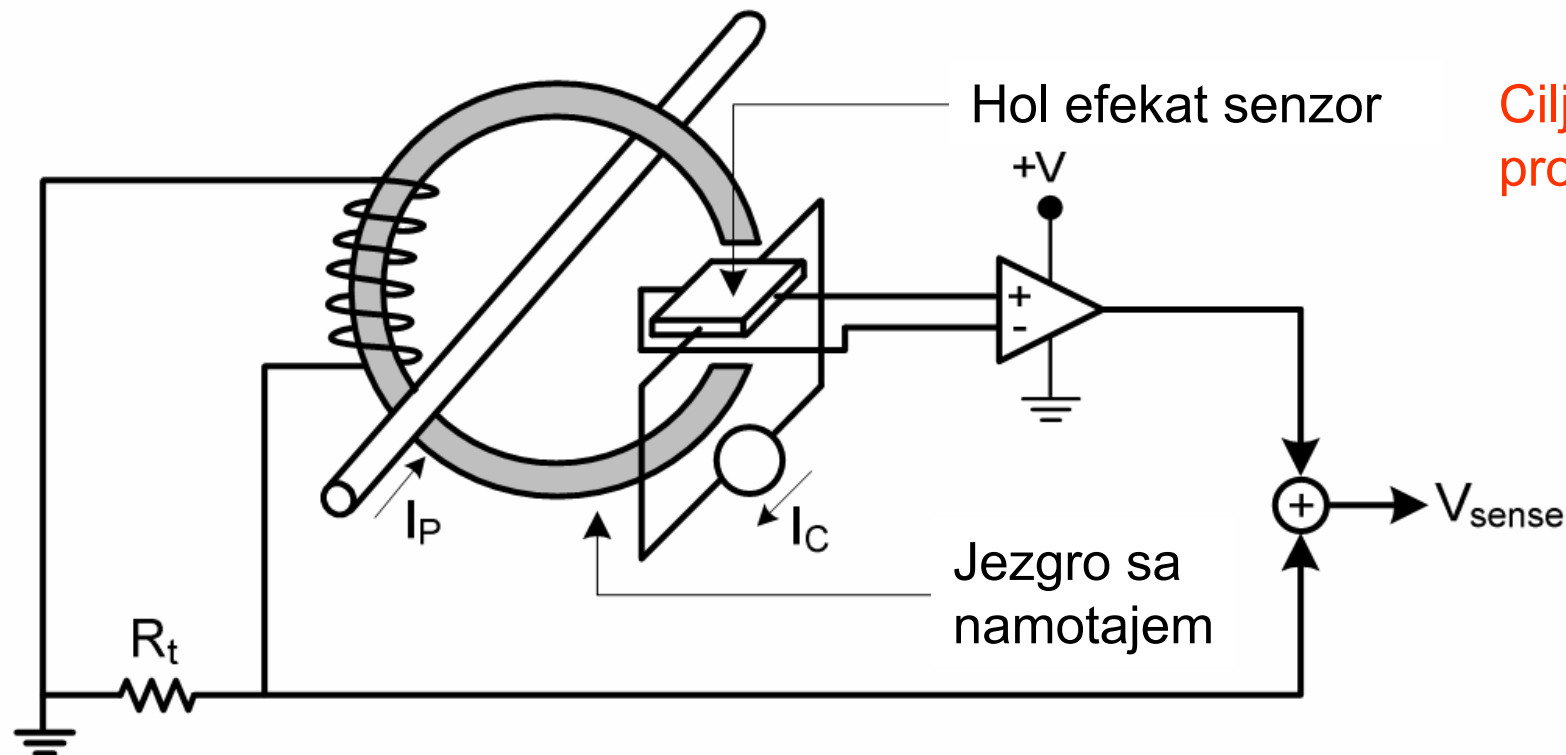
3D prikaz merjenja struje sa strujnim LEM modulom sa povratnom spregom

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



KOMBINACIJA HOLOVOG SENZORA U OTVORENOJ POVRATNOJ SPREZI I OBIČNOG STRUJNOG TRANSFORMATORA

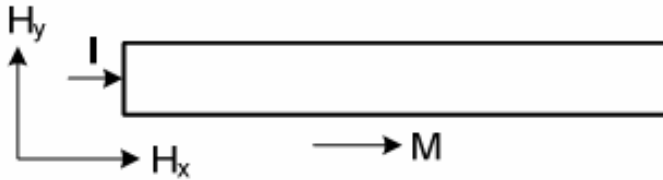


Pri nižim učestanostima dominira senzor a pri višim strujni transformator!!! Postoji i oblast preklapanja kada rade oba

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



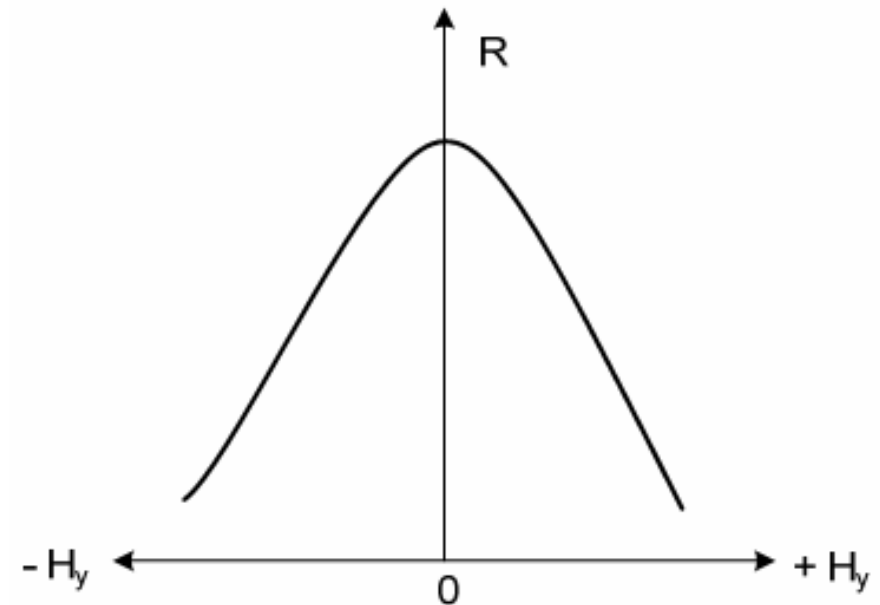
M je rezultatna magnetizacija koja potiče od H_x i H_y .

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.

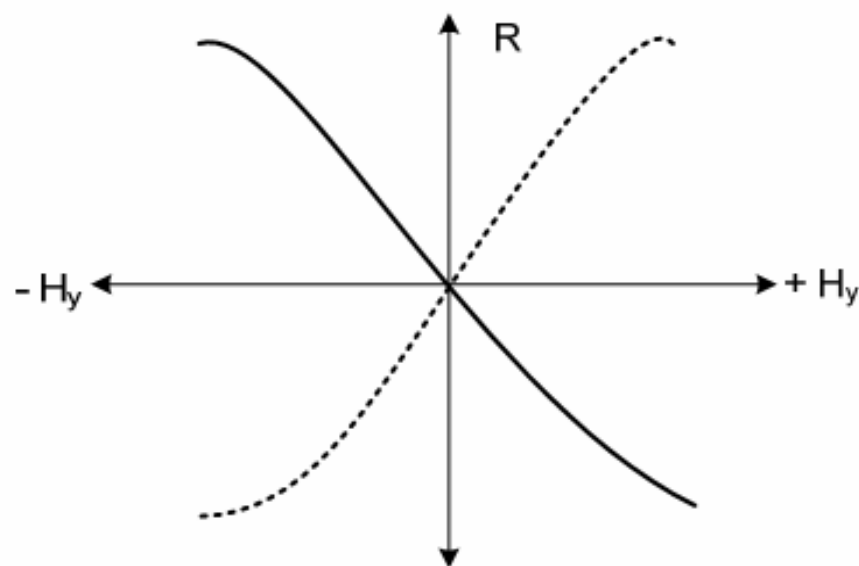
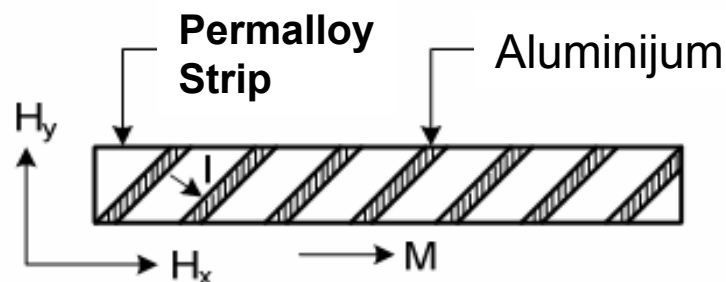
H_y je spregnuto sa materijalom i menja njegovu otpornost koja se meri na osnovu struje I koja protiče kroz njega.

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!!!

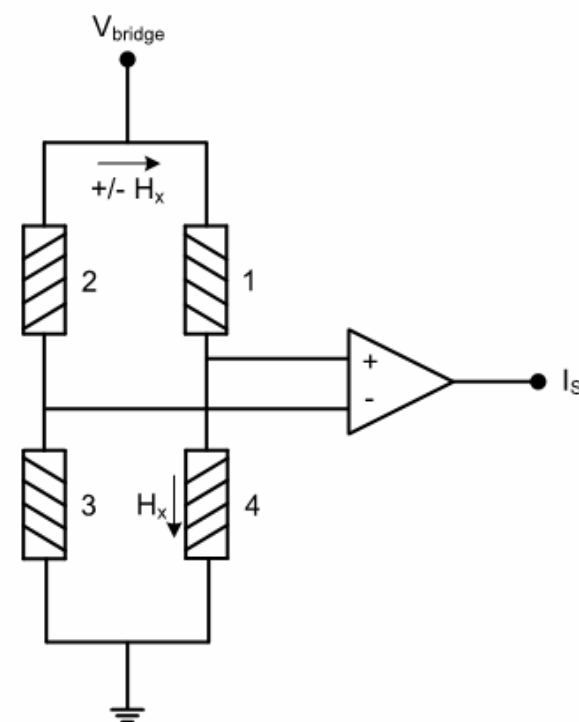


Da bi se detektovala promena smera polja (rešenje u prethodno opisanom slučaju to ne može) primenjuje se tzv. BRBERPOLE konstrukcija sa aluminijumom (Al).

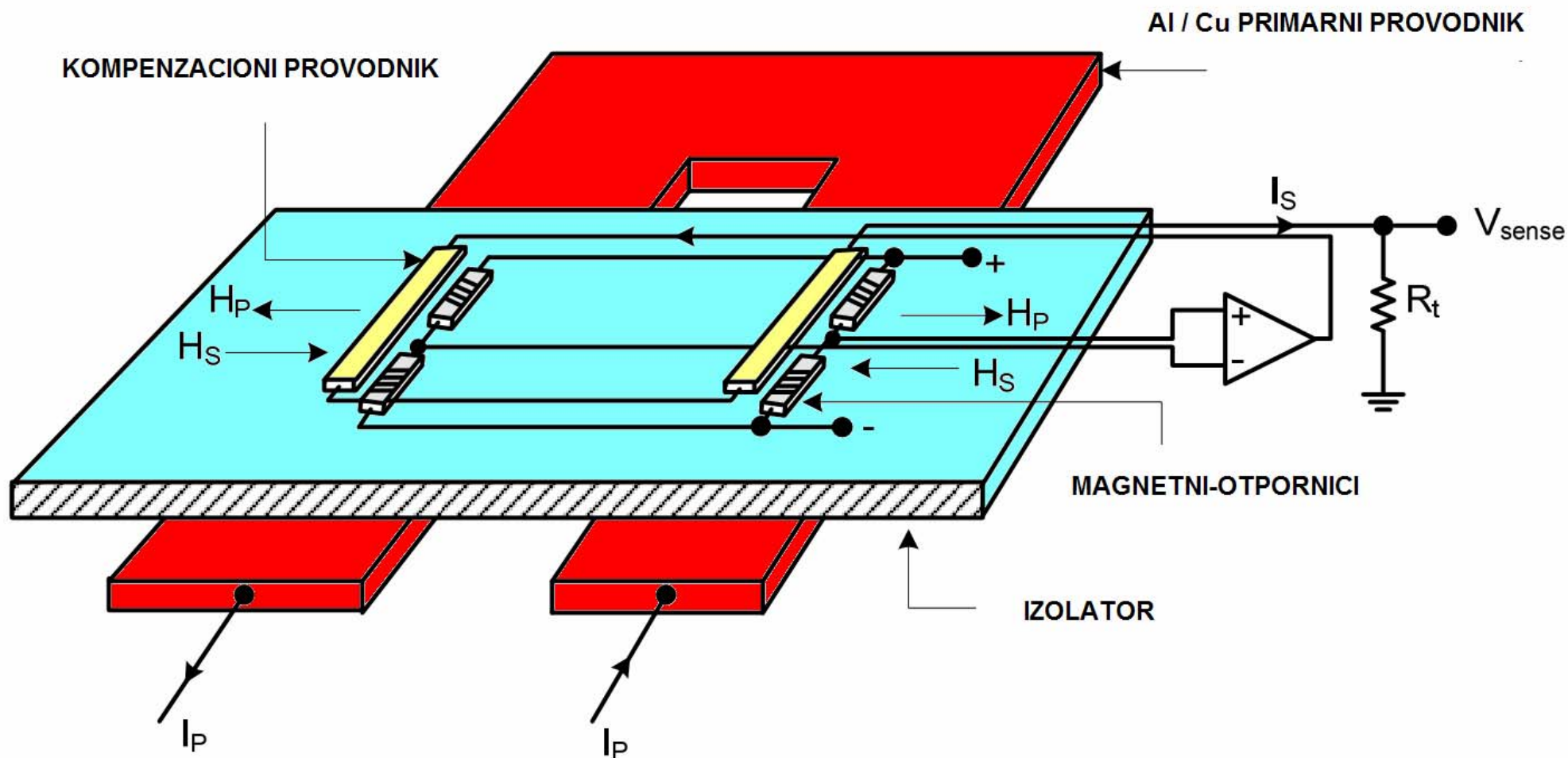
Promena otpornosti za oba smera polja je data na slici desno.

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° .



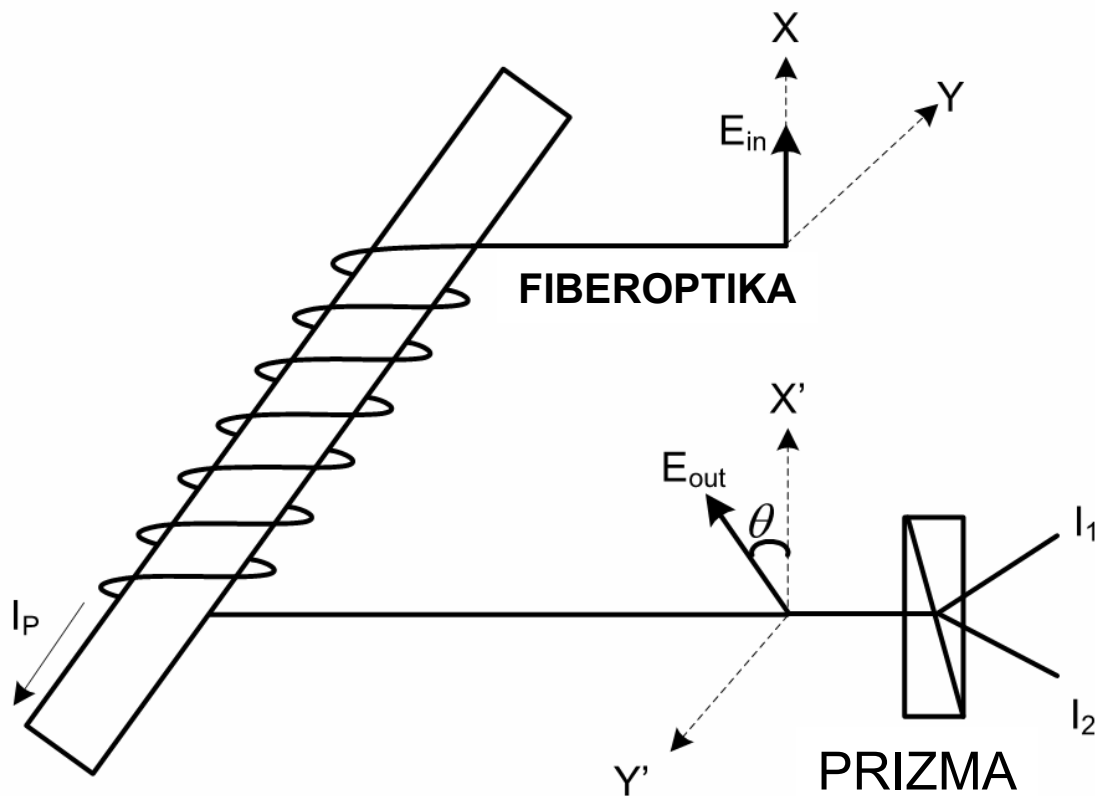
TIPIČAN INDUSTRIJSKI MAGNETO-OTPORNI DAVAČ STRUJE



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 :

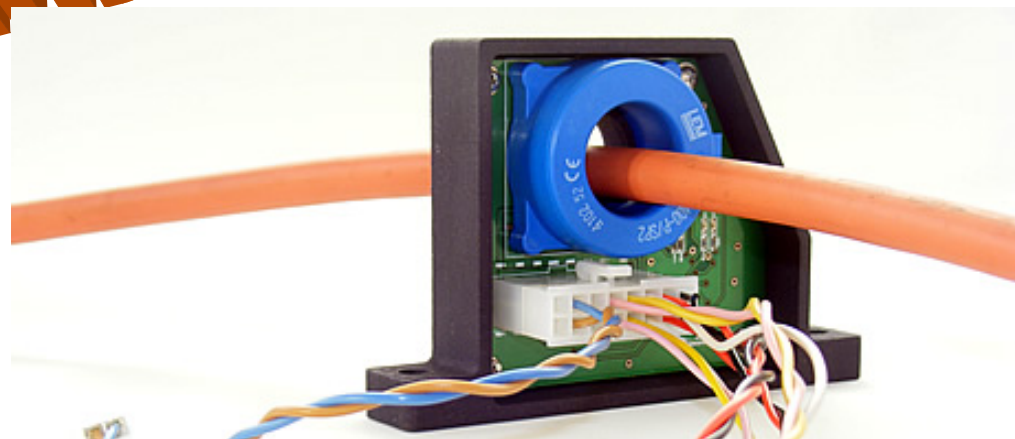
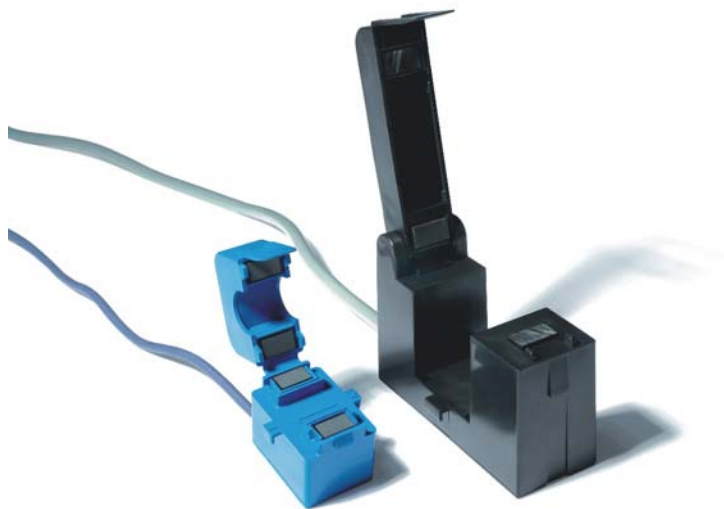
$$\theta = VBl$$

V- Vredetova konstanta (karakteristika materijala)
B-gustina magnetnog fluksa (indukcija)

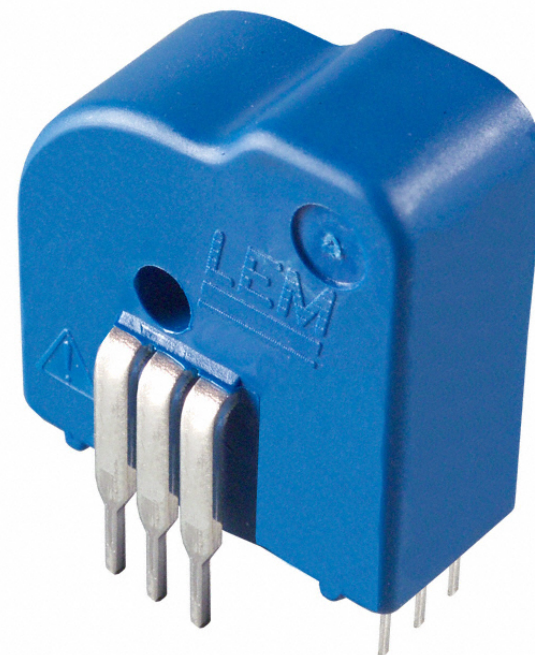
l- dužina fiberoptičkog strujnog senzora izloženog magnetnom polju

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

HVALA NA PAŽNJI !!!!!



PITANJA???



DECEMBAR 2013