

Merni sistemi u računarstvu, <http://automatika.etf.bg.ac.rs/sr/13e053msr>

Analogni merni instrumenti (2023)

Vanredni profesor dr Nadica Miljković, kabinet 68, nadica.miljkovic@etf.bg.ac.rs




Prezentacija za ovo predavanje je delimično pokrivena udžbenikom iz kog su preuzete delovi za pripremu prezentacije: <https://zenodo.org/record/1335250>

30V	100mA	300Ω
12V	100mA	120Ω
6V	100mA	60Ω
3V	200mA	15Ω

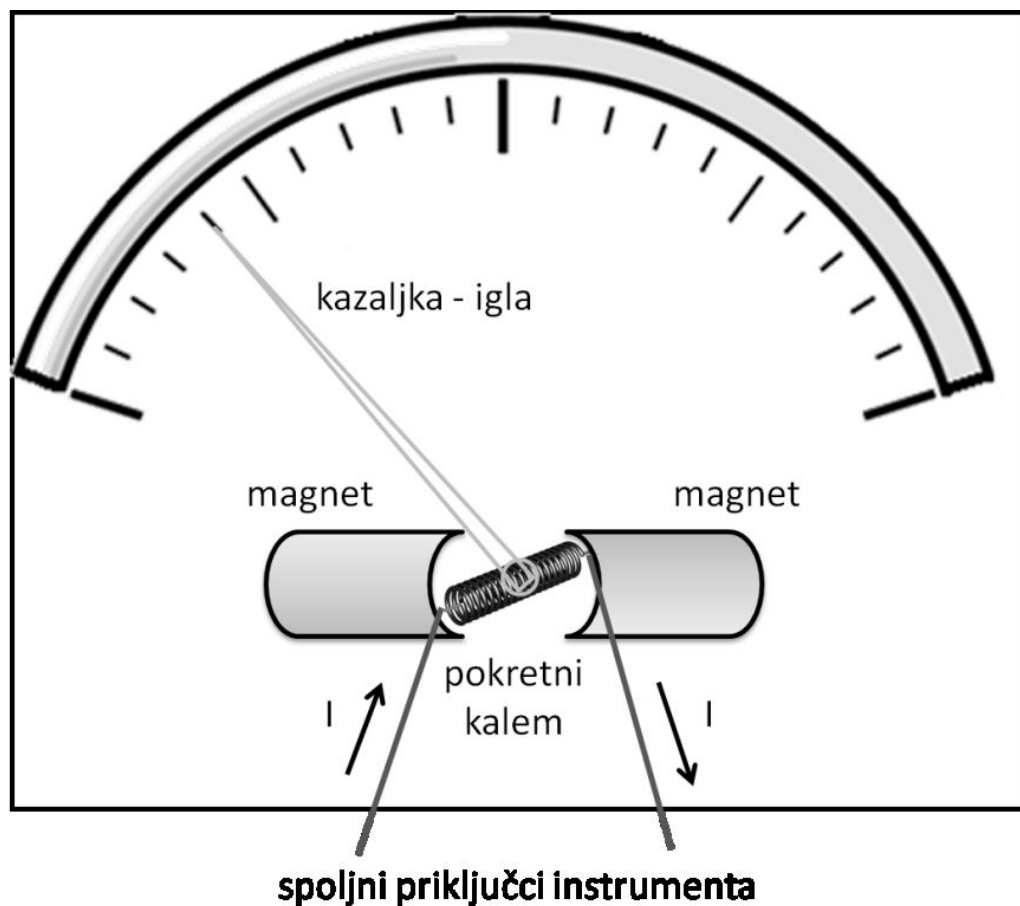


ØFL0125

96212

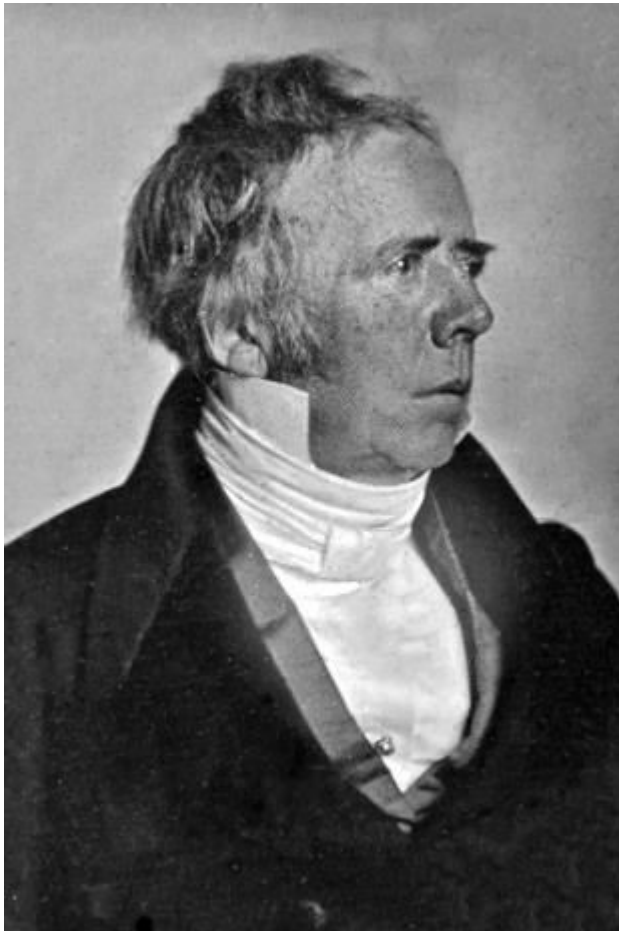
40..60..400H
0.5   

Instrument sa pokretnim kalemom



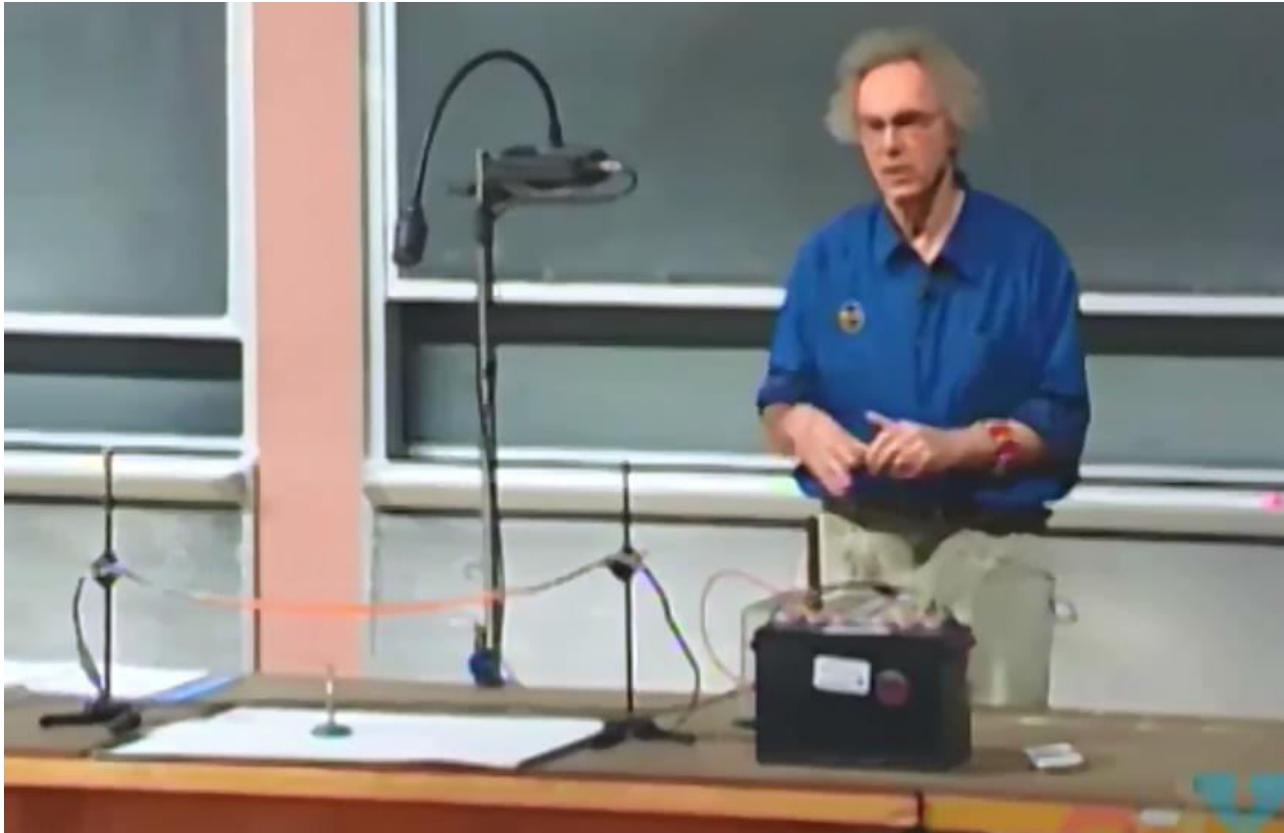
- Slika instrumenta sa pokretnim kalemom iz MIEM udžbenika.
- Pre nego što objasnimo pokretni kalem, prvo Ørsted-ov eksperiment (čita se Erstedov eksperiment).

Hans Christian Ørsted



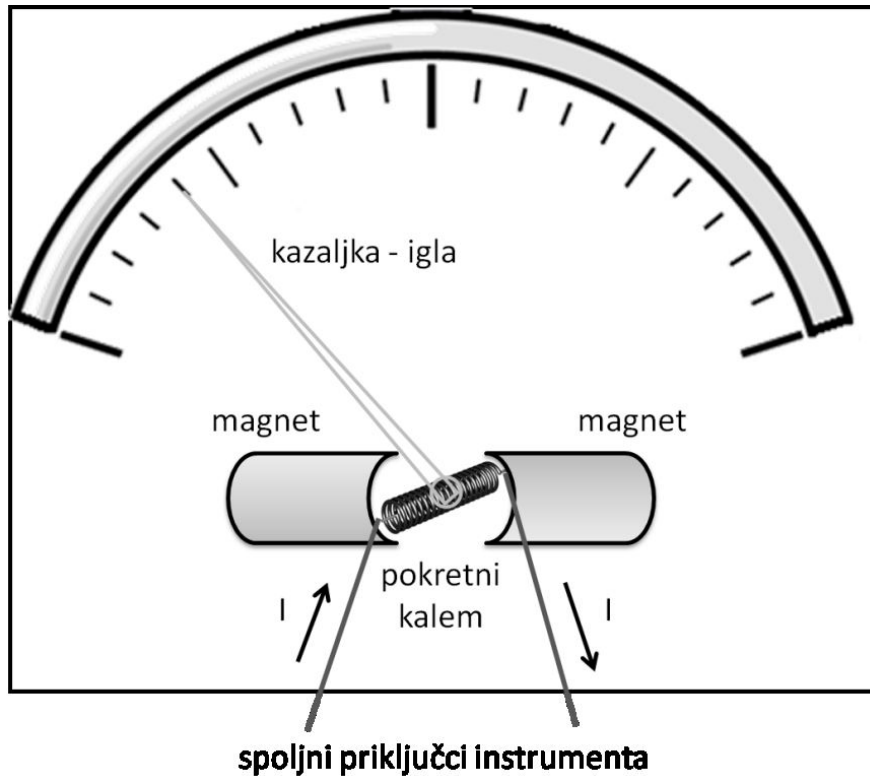
- Hans Christian Ørsted (1777-1851, https://en.wikipedia.org/wiki/Hans_Christian_%C3%98rsted) je bio danski fizičar i hemičar.
- Njegova najveća zasluga je što je prvi dokazao/pokazao vezu između magnetizma i elektriciteta tj. elektromagnetizam.
- 1820. godine, Ørsted je pokazao kako igla kompasa skreće kada se nalazi u blizini provodnika kroz koji teče struja.
- Ubrzo nakon toga, publikovao je rad u kome je opisano kako električna struja koja protiče kroz žicu formira kružno magnetno polje.
- 20 godina pre njega do sličnih tvrdnji je došao i italijan Gian Domenico Romagnosi (1761-1835, https://en.wikipedia.org/wiki/Gian_Domenico_Romagnosi), ali je tek Ørsted-ov opis eksperimenta doživeo uspeh i bio priznat.

Ørsted-ov eksperiment



- Da pogledamo na *youtube*-u: MIT Lec-dem by Prof. Walter Lewin from Electricity and Magnetism 2002, Oersted's experiment, https://www.youtube.com/watch?v=gW-CVQRF_-8 (fotografija je PrtSc snimak sa *youtube* linka, pristupljeno 23.10.2023).
- Odlično izveden eksperiment!

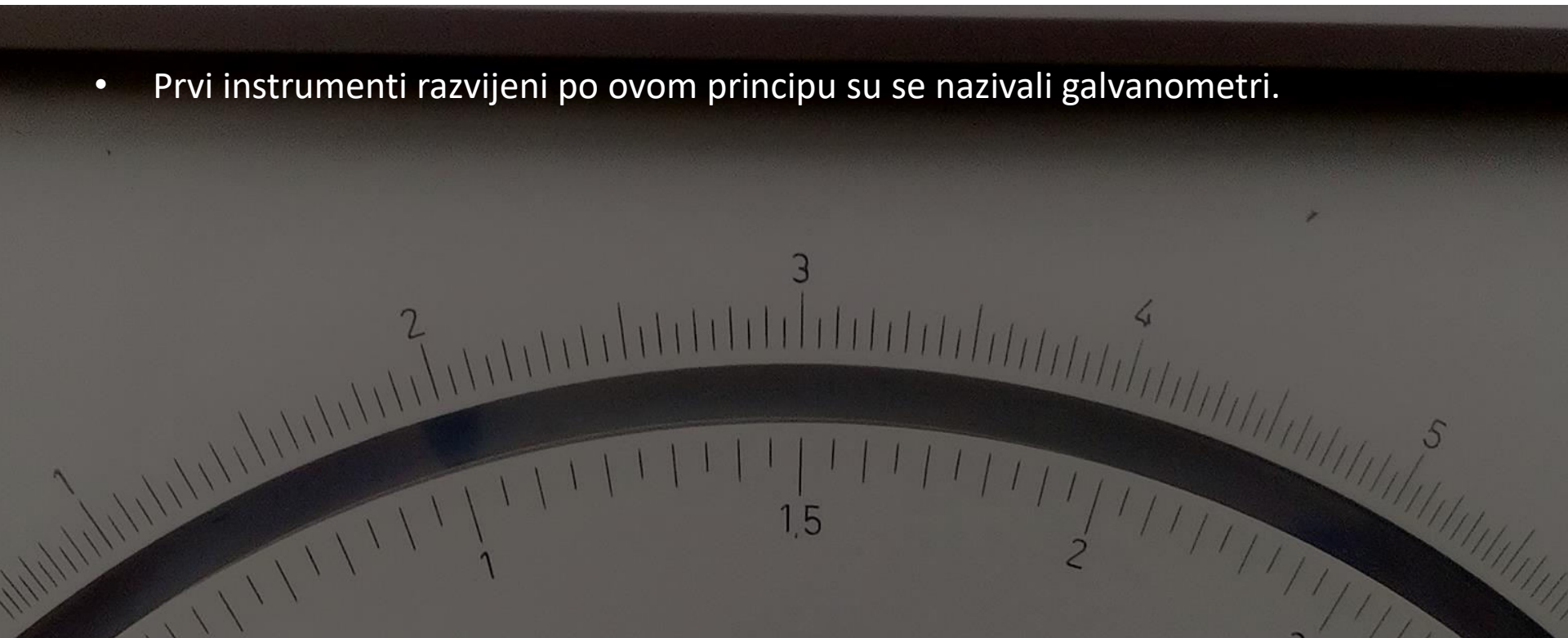
Merni instrument i Ørsted-ov eksperiment



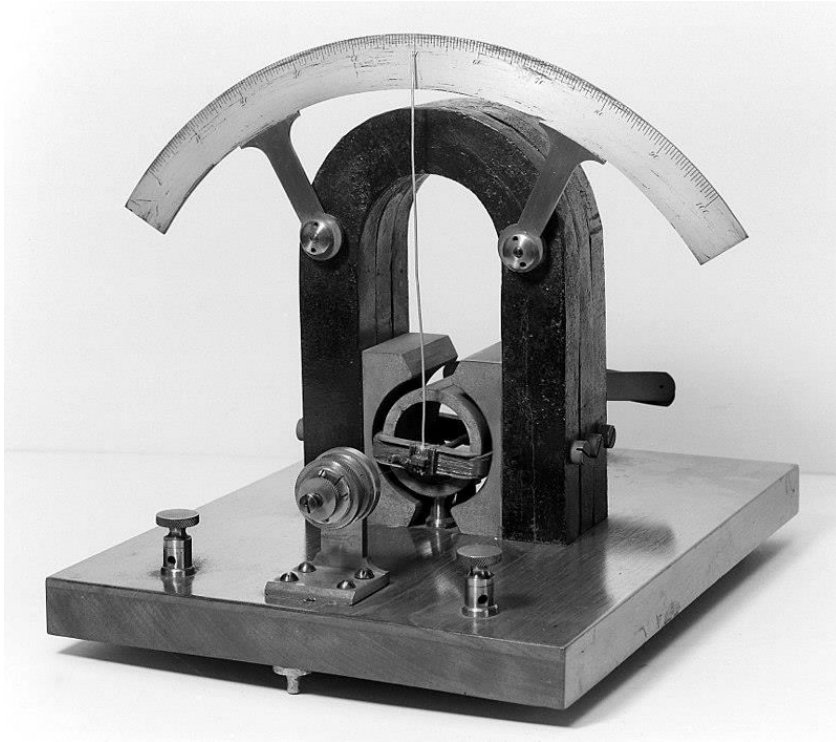
- “Ako se na krajeve metalne žice dovede struja, u tom slučaju će se stvoriti neko magnetsko polje u okolini provodnika (metalne žice) kroz koji teče struja.
- Na ovom principu moguće je meriti struju kroz provodnik.
- Prilikom projektovanja ovih instrumenata se ne koristi metalni provodnik, već kalem koji omogućava indukovanje magnetnog polja veće magnetne indukcije u odnosu na magnetno polje indukovano metalnom žicom.
- Instrumenti koji su projektovani za rad na ovom principu, nazivaju se instrumenti sa pokretnim kalemom. Najčešće se projektuju pomoću bakarne žice koja je obmotana oko jezgra od gvožđa i postavljena između polova magneta.”
 - MIEM UDŽBENIK

Ampermetar i kazaljka

- Kada kroz provodnik prolazi struja, kalem rotira i kazaljka se pomera na skali.
 - Ako je struja veća, onda je i formirano magnetno polje kalema veće, pa je i veći otklon kazaljke na instrumentu.
 - Odgovarajućom kalibracijom, moguće je meriti DC struje.
 - Obratite pažnju da se kazaljka ponaša kao puluga: manji otklon u dnu uzrokuje veći otklon vrha kazaljke, pa je merenje preciznije.
-
- Prvi instrumenti razvijeni po ovom principu su se nazivali galvanometri.



Galvanometri



- Osetljivi su na:
 - dejstvo spoljnih sila i
 - dejstvo magnetnih polja u okruženju
- Danas se realizuju tako da je kalem zaštićen (šildovan) tj. magnetno i električno izolovan
- Ampermetri
- Instrumenti sa pokretnim kalemom

By
http://wellcomeimages.org/indexplus/obf_images/30/af/06570418c9a34ae5c68c689cd90a.jpgGallery:
<http://wellcomeimages.org/indexplus/image/M0016397.html>, CC BY
4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=36372557>.

Ampermetar

- Instrumenti sa pokretnim kalemom su osetljivi na smer (sećate se Ørsted-ovog eksperimenta), pa mogu da mere struju samo u jednom pravcu.
- Kod nekih postoji neutralan položaj kazaljke (na sredini skale), pa mogu da mere i polaritet struje.
- Uz odgovarajuće modifikacije, od ovog ampermetra za merenje DC struje može se konstruisati i voltmetar i ommetar.

(S)kretanje kazaljke

- Kada kroz kalem protiče struja, formira se radijalni vektor magnetne indukcije B i na delove kalema deluje sila F :

$$F = \frac{N}{lB}$$

- U prethodnoj relaciji sa l je označena dužina kalema, a sa N broj namotaja. Na pokretni deo sistema deluje momenat M_1 koji je jednak:

$$M_1 = Fh = \frac{N}{lBh}$$

- U prethodnoj relaciji sa h je označena širina pravougaonog kalema. Javlja se i mehanički protiv momenat M_2 koji je srazmeran skretanju kazaljke za ugao α .

$$M_1 + M_2 = 0$$

$$M_2 = -K\alpha$$

- Konačno, uzimanjem da je $l = C_1\alpha$, dobija se relacija:

$$\alpha = \frac{NBlh}{K} I$$

- Konstrukcija instrumenta za različite maksimalne opsege struja se dobija promenom promenljivih u prethodnoj relaciji.

AC struja na ulazu u DC instrument

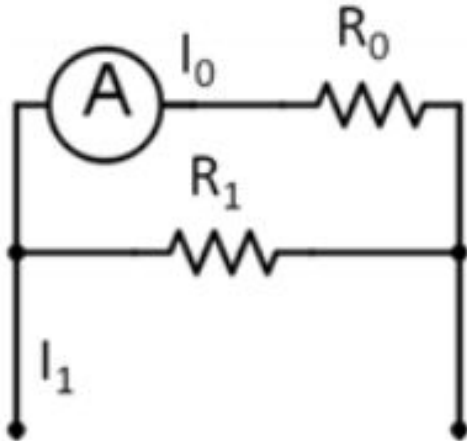


- Kretanje kazaljke nije linearno i ima nekog kašnjenja (kada se dovede struja kazaljka se ne postavlja trenutno u krajnji položaj).
- Za AC struje manjih frekvencija kazaljka bi oscilovala između I_{max} i I_{min} . Međutim, za veće frekvencije (> 10 Hz), kazaljka bi zauzela položaj koji je jednak srednjoj vrednosti struje. OČEKIVANO?
- Dakle, DA. Može se dovesti AC struja na ulaz DC ampermetra, ali će pokazivanje biti jednako jednosmernoj komponenti tj. srednjoj vrednosti.

Unutrašnja otpornost ampermetra

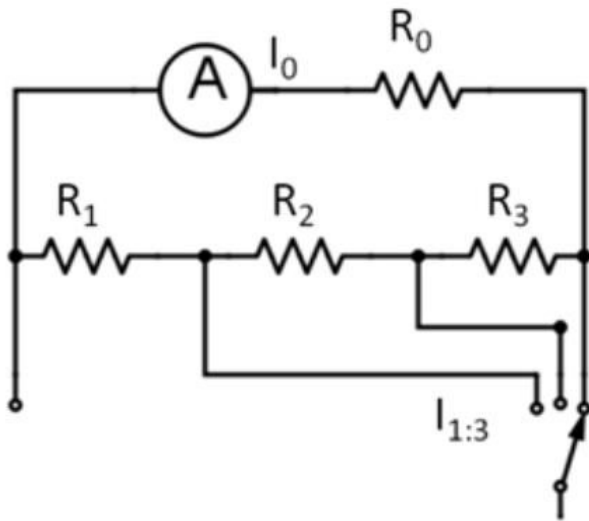
- Unutrašnja otpornost idealnog ampermetra je 0, ali realnog nije.
- Kod instrumenta sa pokretnim kalemom, unutrašnja otpornost zavisi od otpornosti samog kalema i otpornosti opruge preko koje se dovodi struja na kalem.
- Kako je kalem instrumenta sastavljan od bakarne žice, a temperaturni koeficijent bakra je pozitivan ($\alpha = 0.4\%/^{\circ}\text{C}$), to znači da se sa povećanjem temperature od 1°C , povećava otpornost za 0.4%.
- Dalje, to znači da za povećanje temperature, kazaljka pokazuje manju vrednost od stvarne.
- Kako bi se rešio ovaj problem, dodaje se otpornik čija se otpornost ne menja sa promenom temperature, odnosno ima zanemarljiv temperaturni koeficijent i koristi se za temperaturnu kompenzaciju instrumenta.

Instrumenti sa pokretnim kalemom



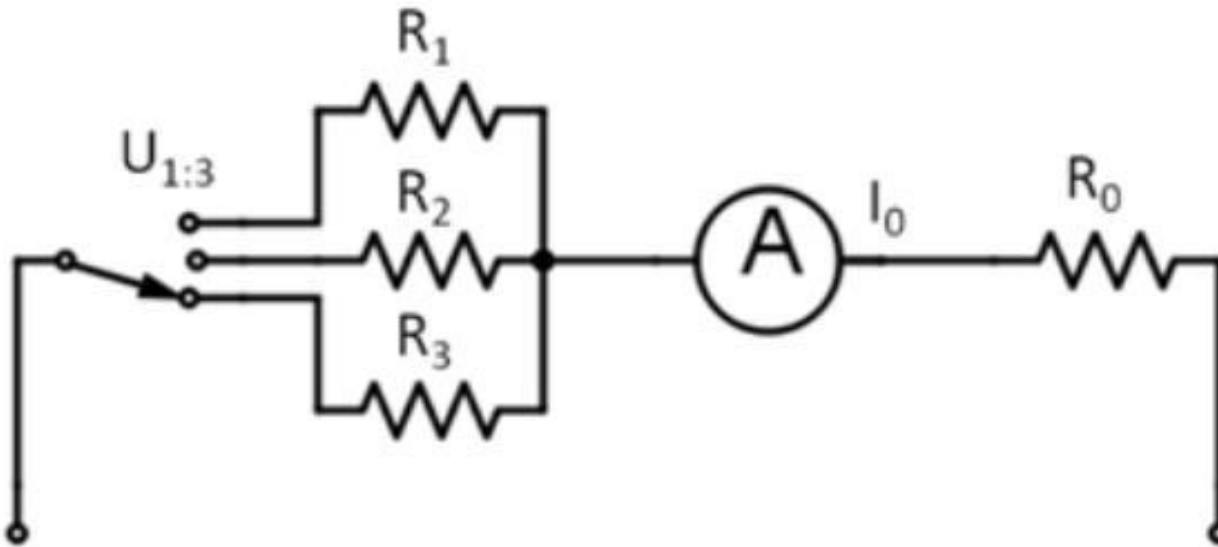
- U brojkama:
 - Ovi instrumenti najčešće mere struju od desetak μA do par mA
 - Unutrašnja otpornost je od $5\ \Omega$ do $5\ \text{k}\Omega$
- Kako bi merili veće struje, moguće im je dodati šant R_1
 - To je otpornik koji se vezuje paralelno sa ampermetrom i ima za cilj povećanje I_{max}
 - Ograničenje ove metode je što se menja unutrašnja otpornost ampermetra R_0

Šantiranje instrumenta



- U praksi se instrumenti projektuju sa sistemom prekidača
- Ovi prekidači omogućavaju odabir opsega, a zapravo se menja samo šant
- Ako se pogledaju podaci za svaki opseg, može se videti da se razlikuju unutrašnje otpornosti na nekom instrumentu
- Na slici je prikazan Ayrton-ov šant (https://en.wikipedia.org/wiki/Ayrton_shunt)
- Ayrton-ov šant je karakterističan po tome što sprečava da instrument bude vezan u kolo bez šanta.

Realizacija voltmetra

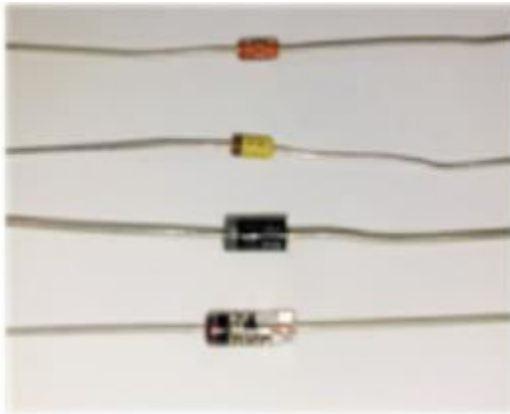


- Osim paralelnog šanta, instrumentu sa pokretnim kalemom, moguće je dodati i redni šant kako bi se omogućilo merenje napona
- Na slici je prikazano kako se dodaje redni šant, ali i kako se realizuje instrument sa više opsega preko prekidača

A merenje AC struje i napona?

- Pokazano je da ako se dovede struja oblika $i(t) = I \sin(\omega t)$, onda će instrument sa pokretnim kalemom pokazati 0, jer je jednosmerna komponenta jednaka nuli
- Međutim, za merenje sa ovakvim signalima, potrebno je dodati ispravljače u kolo
- Kao ispravljački elementi koriste se poluprovodničke diode (<https://en.wikipedia.org/wiki/Diode>)

Dioda



razne diode



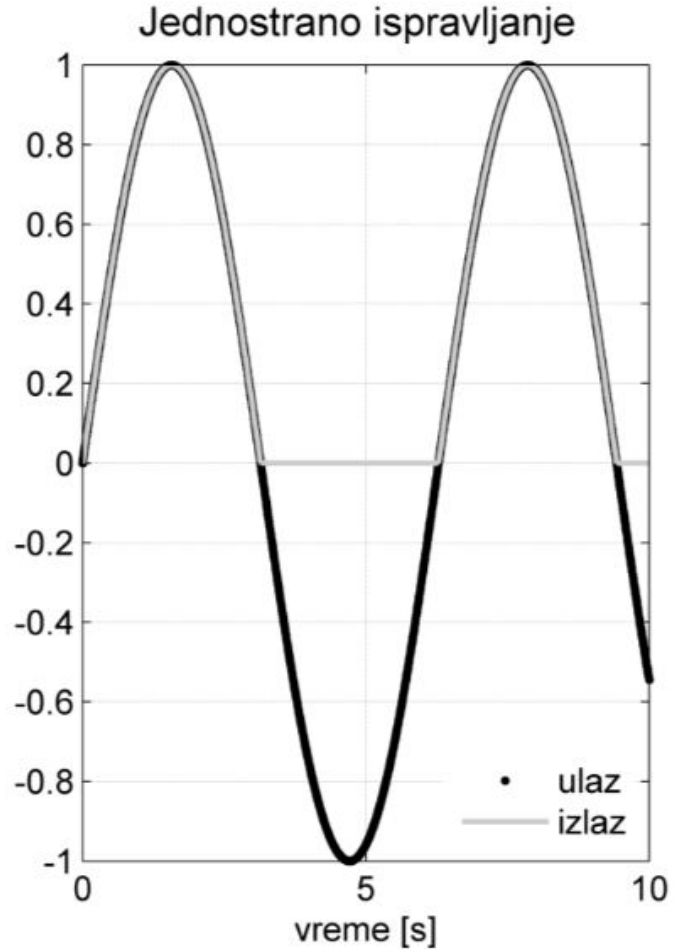
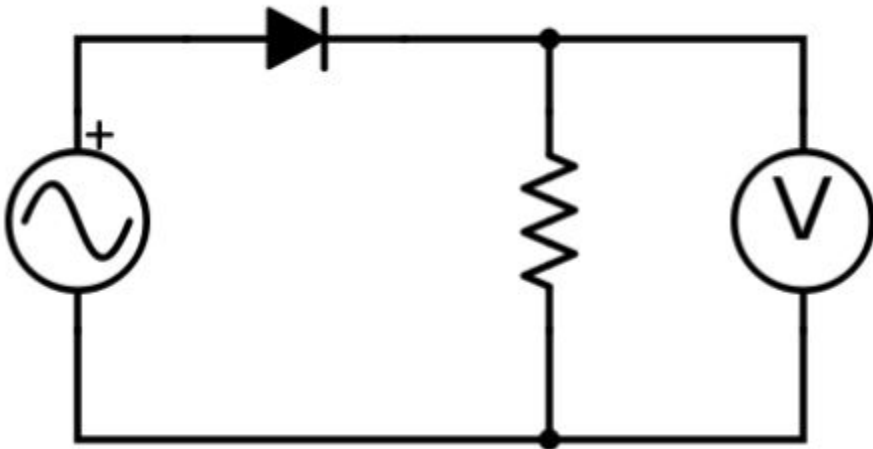
LED



dioda

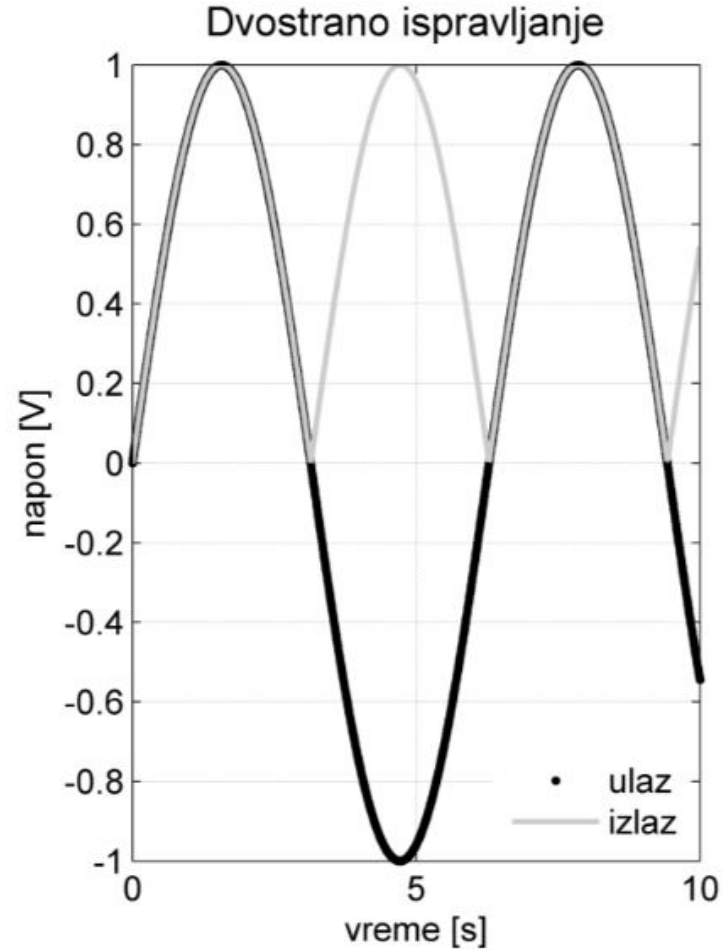
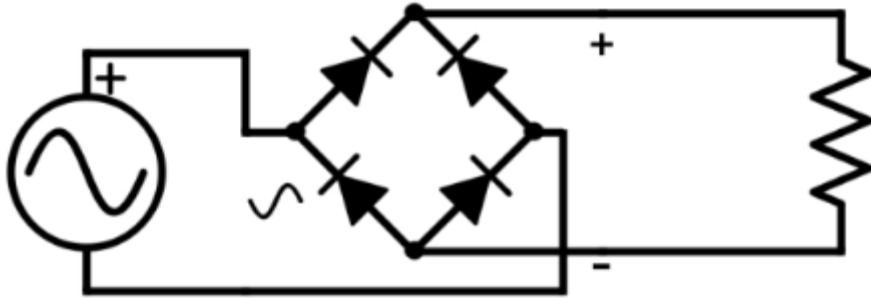
- Razne diode zajedno sa oznakom u električnim kolima su prikazane na slici
- LED (eng. *Light Emitting Diode*) se najčešće koristi kao indikator, a ne koristi se u kolima za ispravljanje signala zbog svojih karakteristika
- Idealna dioda se ponaša kao prekidač

Jednostrano ispravljanje



- Kolo za jednostrano ispravljanje je prikazano na slici levo
- Jednostrano ispravljen signal je prikazan na slici desno

Dvostrano ispravljanje



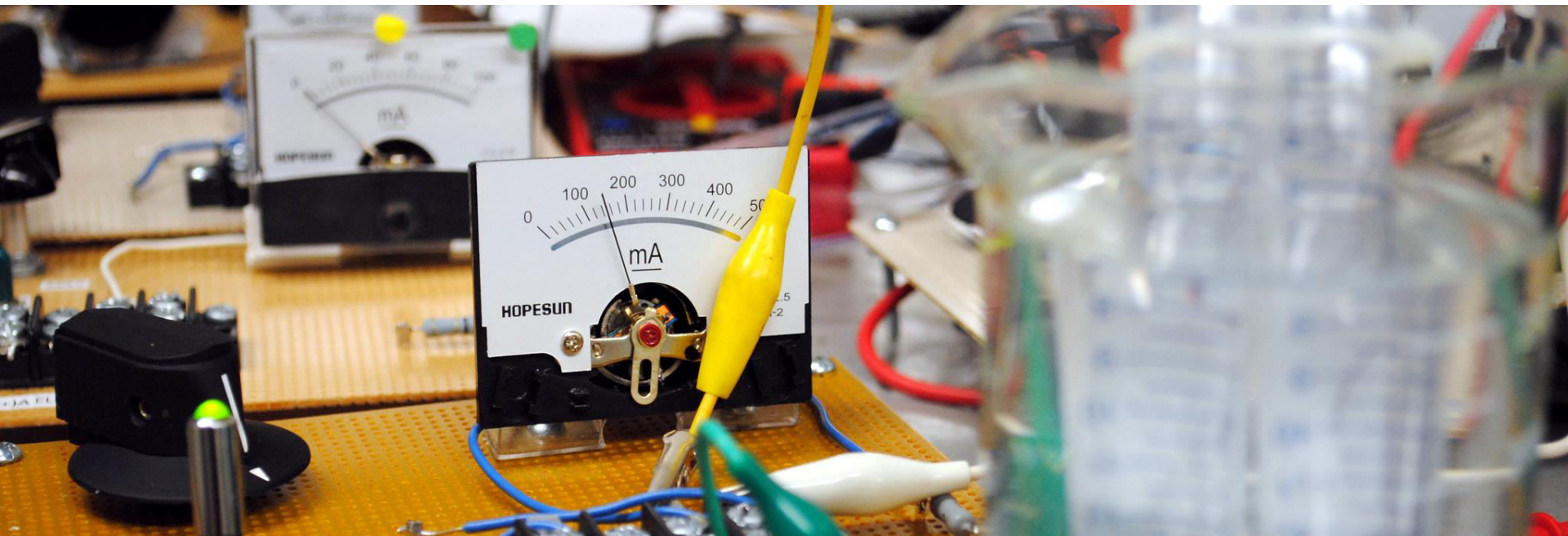
- Kolo za dvostrano ispravljanje je prikazano na slici levo
- Dvostrano ispravljen signal je prikazan na slici desno

Kako ispravljanje utiče na merenje?

- Za signal $u(t) = U_0 \sin(\omega t)$ koji doveden na ulaz ispravljača, pokazivanje instrumenta bi bilo 0, jer je srednja vrednost 0
- Međutim, za jednostrano ispravljen signal srednja vrednost je $U_{sr1} = U_0/\pi$, a za dvostrano ispravljen signal to je $U_{sr2} = 2U_0/\pi$
- Kako je kod naizmeničnih signala od značaja posmatranje efektivne vrednosti, to se definiše faktor oblika (odnos srednje vrednosti i efektivne vrednosti ispravljenih signala) k_f takav da je za jednostrano ispravljanje jednak 2.22, a za dvostrano 1.11
 - Više o tome na vežbama

Galvanometri danas

- Danas se koriste u sistemima za skeniranje (npr. skeniranje bar kodova, CD/DVD čitačima i sl.) u kombinaciji sa primenom lasera
- Češće su u upotrebi galvanometri koji se zasnivaju na principu pokretnog kalema u odnosu na galvanometar na principu pokretnog gvožđa, zbog kraćeg vremena odziva
- Više na: https://en.wikipedia.org/wiki/Galvanometer#Modern_uses



Karakteristike instrumenata

- Sa ciljem smanjenja sistematske greške (o sistematskim greškama ćemo tek da pričamo), važno je poznavati osnovne karakteristike instrumenata
- Neke od tih karakteristika su:
 - tačnost
 - preciznost
 - osetljivost
 - ponovljivost
 - histerezis
 - i druge

Klasa tačnosti

- Prilikom merenja sa analognim instrumentima od značaja je i definisanje klase tačnosti K_T
- Najčešće je klasa tačnosti ispisana na samom instrumentu i daje informaciju o maksimalnoj apsolutnoj grešci Δx na opsegu M
- Računa se kao: $K_T = 100 * \Delta x / M$
- Kako jedan instrument može imati više mernih opsega, to se klasa tačnosti definiše za svaki merni opseg (može biti ista za svaki merni opseg, a ne mora)
- Tipične vrednosti klase tačnosti u praksi su 0.1, 0.2, 0.5, 1, 1.5, 2.5 i 5

Klasa tačnosti i opseg instrumenta



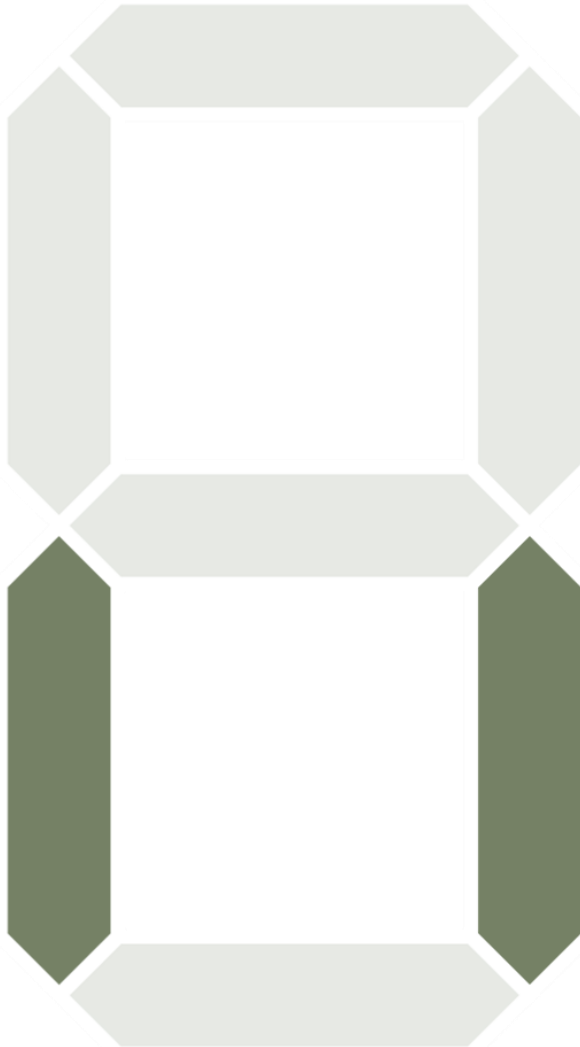
- Na slici je prikazan analogni voltmetar
- Merni opsezi su 3 V, 6 V, 12 V i 30 V
- Primetiti da se i unutrašnje otpornosti razlikuju za pojedinačne opsege
- Kolika je klasa tačnosti ovog instrumenta?
- Kako bi se izračunala?

Odabir opsega kod analognih instrumenata

- Svaki analogni instrument ima tačnost koja se izražava u %. Pretpostavimo da je dat analogni voltmetar koji ima tačnost 3% na opsegu [0 100] V
- Prema tome, greška koja može da nastane u ovom opsegu je ± 3 V
- Ako se meri vrednost od 15 V, onda se izmerena vrednost može kretati u opsegu od 12 do 18 V i ukupna greška bi iznosila 20%
- Ako se meri vrednost od 90 V, onda se merenje može kretati u opsegu od 87 do 93 V i ukupna greška bi bila 3.33%

- UVEK SE MERI U POSLEDNJOJ, ILI BAR U DRUGOJ, TREĆINI SKALE ANALOGNOG INSTRUMENTA
- DODATNO, UVEK SE UKLJUČI NAJVEĆI OPSEG KOJI SE POSTEPENO SMANJUJE KAKO BI SE ISPUNIO PRETHODNI USLOV

DMM



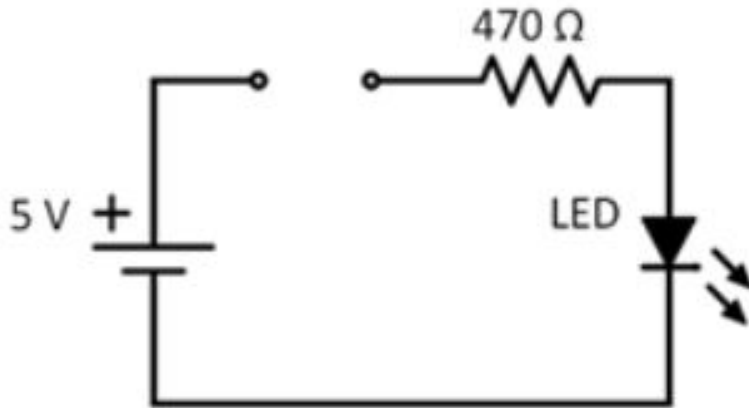
- DMM (eng. *digital multimeter*, https://en.wikipedia.org/wiki/Multimeter#Digital_multimeters_.28DMM_or_DVOM.29) je univerzalni instrument koji objedinjuje više instrumenata: ommetar, voltmetar, ampermetar i dr.
- Za razliku od analognih instrumenata, digitalni instrumenti imaju najčešće automatski odabir opsega (Proverite ekran instrumenta kada radite sa njim!)
- DMM spada u najčešće korišćene laboratorijske instrumente
- Vrednost merene veličine se najčešće ispisuje na 7-o segmentnom displeju

DMM primer interfejsa



- Na slici je prikazan DMM uređaj koji su studentkinje i studenti imali su koristili u periodu od 2017. do 2021. na laboratorijskim vežbama
- Primetiti način vezivanja u kolo (banana konektori su najčešći konektori) i opcije za merenje
- Koje sve opcije poseduje ovaj instrument?

Ispitivanje kratkog spoja



- Na slici je prikazano kolo koje se koristi za ispitivanje kratkog spoja (eng. *continuity test*, https://en.wikipedia.org/wiki/Continuity_test)
- U ovu svrhu može da posluži i ommetar, ali je uobičajeno da se koristi poseban tekst koji na izlazu ima zvučni signal koji obaveštava/upozorava korisnika ili korisnicu o postojanju kratkog spoja
- Osim zvuka, može se koristiti i LED (eng. *Light Emitting Diode*) indikator

Princip rada

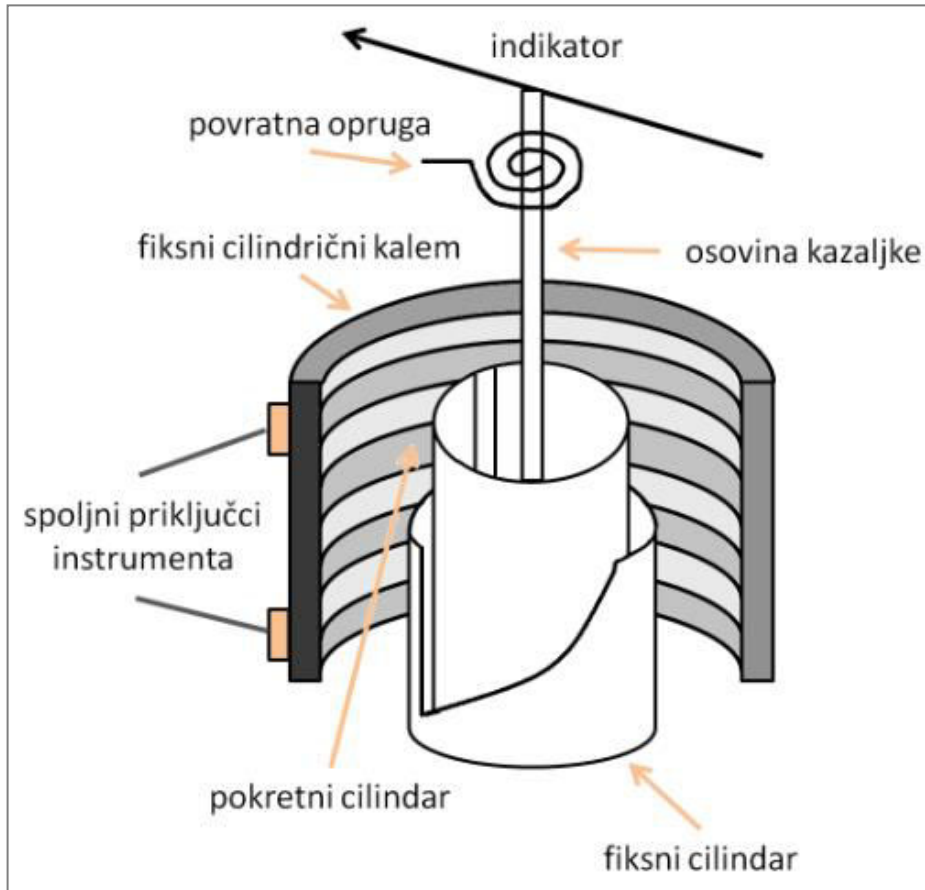
- Dele se u dve grupe po principu rada:
 - princip odbijanja (primena okruglog kalema)
 - princip privlačenja (primena pljosnatog kalema)
- Ovi instrumenti se pretežno koriste za merenje naizmeničnih struja i napona
- Razlika u odnosu na instrumente sa pokretnim kalemom je što je ovde pokretni magnetni izvor gvožđe, a ne kalem
- Skala ovog instrumenta je kvadratna, odnosno ugao skretanja kazaljke zavisi od kvadrata amplitude struje tj. otklon instrumenta je srazmeran efektivnoj vrednosti struje i ovo je najveća i najznačajnija razlika u odnosu na instrument sa pokretnim kalemom

Skretanje kazaljke

- Pomični deo od mekog gvožđa (disk ili štap) se pomera kada struja prolazi kroz provodnik u kalemu
- Pomeranje mekog gvožđa koje je povezano sa kazaljkom zavisi od indukovanog magnetnog polja kroz kalem
- Skretanje kazaljke zavisi od kvadrata struje (efektivna vrednost struje) i ugao skretanja kazaljke se određuje prema sledećoj relaciji:

$$\alpha = \frac{1}{2K} I^2 \frac{dL}{d\alpha}$$

Konstrukcija instrumenta



- Instrument sa pokretnim gvožđem sa okruglim kalemom odbojnog tipa sa označenim delovima je prikazan na slici
- Princip rada ovog instrumenta je:
 - Pri prolasku naizmenečne i jednosmerne struje kroz kalem indukuje se magnetno polje
 - To indukovano magnetno polje magnetiše deo od mekog gvožđa i pokretni deo instrumenta se odbija od nepokretnog (fiksni i pokretni cilindri na slici)
- Magnetno polje koje se indukuje je do 20 mT i treba voditi računa da ne dođe u kontakt sa drugim magnetnim poljima (koriste se oklopljavanja radi zaštite)
- Najčešće mogu, sa zadovoljavajućom tačnošću, da mere AC struje frekvencija do 1000 Hz

Merenje AC napona i struja

- Skala ovog instrumenta nije linearna kao kod instrumenta sa pokretnim kalemom već je kvadratna (otklon kazaljke zavisi od kvadrata struje) => koristi se za merenje naizmenične struje
- Instrumenti mere relativno velike struje i napone (do 50 A i 800 V)
- Za proširenje mernog opsega ne koriste se šantovi, ali se koriste različiti namotaji za proširenje strujnog opsega
- Kada se instrument koristi kao voltmetar dodaje se predotpornik
- Ovim instrumentima moguće je meriti i DC i AC struje i napone
- Instrument meri True RMS (eng. *Root Means Square*) koje je “tačno” za sve oblike naizmeničnih signala
- RMS je vrednost signala/napona/struje koja je srazmerna energiji, pa je zato veoma korisno njeno merenje

True RMS

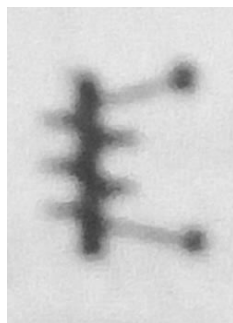
- Merenje True RMS se može realizovati i analogno i digitalno
- Izrazi za analogni i digitalni True RMS su:

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} [u(t)]^2 dt} \quad U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i^2}$$

- U tabeli date su True RMS za neke karakteristične oblike signala

signal	U_{sr}	$ U_{sr} $	U_{eff}	True RMS
sinusoida	0	$2U/\pi$	$U/\sqrt{2}$	U_{eff}
trougaoni	0	$U/2$	$U/\sqrt{3}$	U_{eff}
impuls (50% faktor ispunjenosti)	0	U	U	U_{eff}

Pokretni kalem i pokretno gvožđe



instrument sa pokretnim
gvožđem

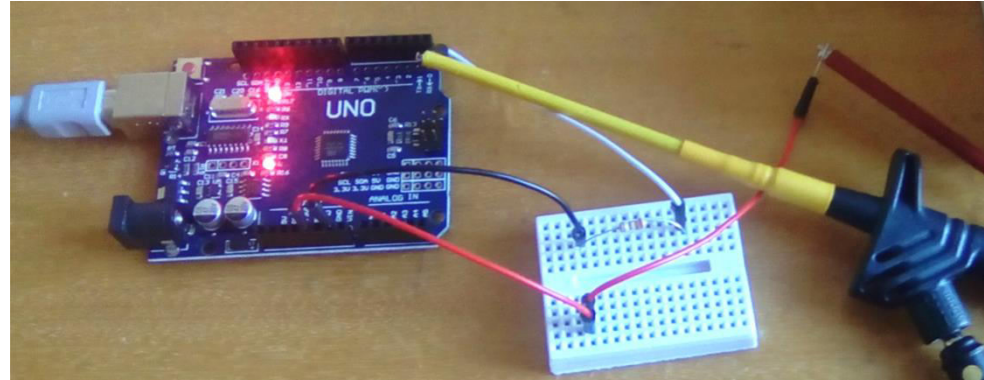
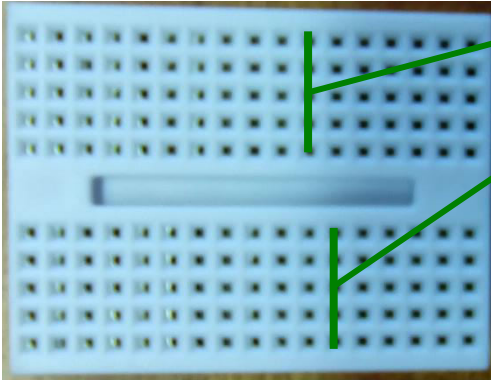
instrument sa pokretnim
kalemom

- Na slikama su prikazane tipične oznake na instrumentima sa pokretnim kalemom i sa pokretnim gvožđem
- Slike su preuzete iz knjige: F. K. Petrović, “Električna merenja: Prvi deo”, Naučna knjiga, Beograd, 1986

LABORATORIJSKE VEŽBE 3 | 4
SADA DEMO VEŽBE

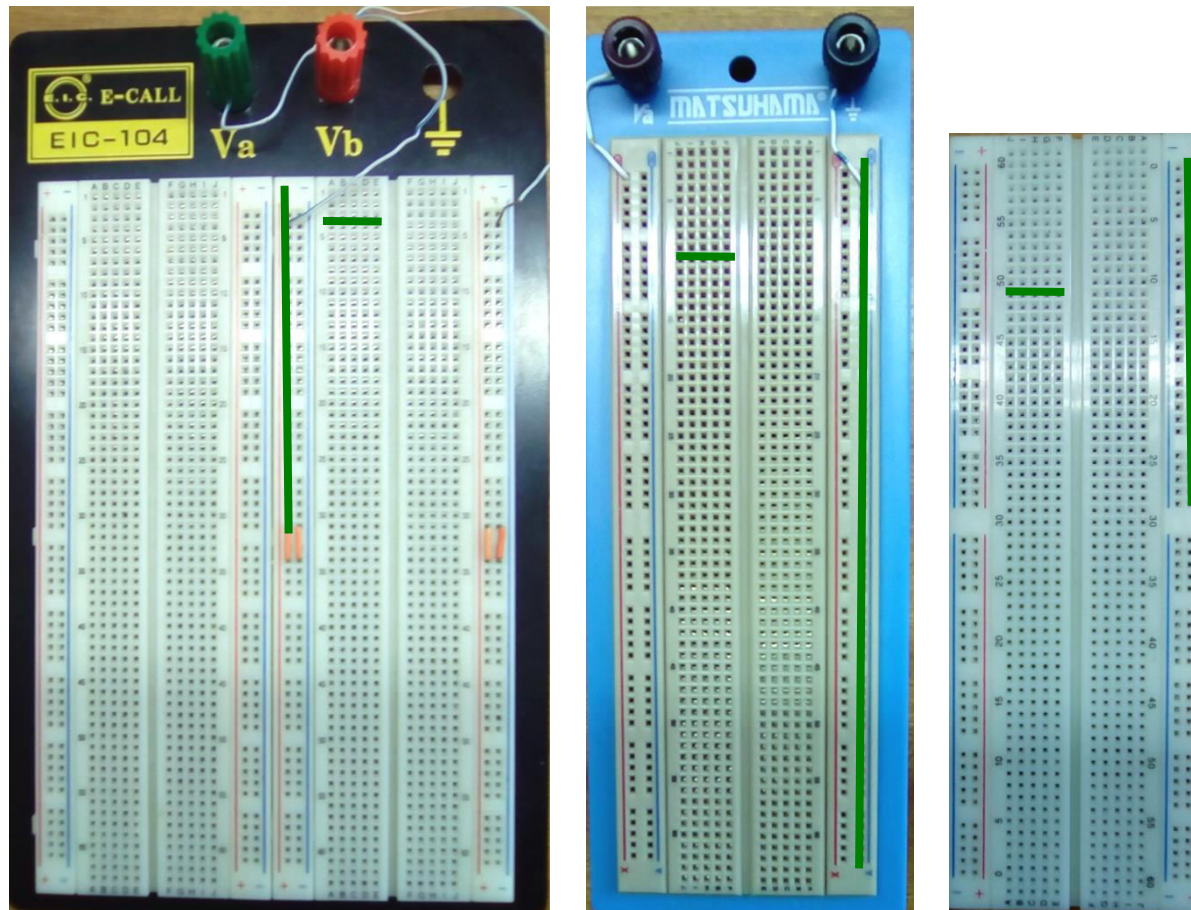
Protobord

pinovi na istom potencijalu



- U 3. i 4. lab. vežbama postojala je realizacija kola na protobordu
- Dodatno, studentkinje i studenti su za potrebe merenja napona, struje i otpornosti koristili analogni voltmetar, analogni ampermetar i digitalni multimeter
- Na vežbama je korišćen protobord sa 170 rupa kao na slici. Označeni su pinovi koji su kratko spojeni na slici i dat je primer vezivanja kola

Protobord (eng. *breadboard*, <https://en.wikipedia.org/wiki/Breadboard>)



- Prikazane su podebljenim linijama tačke koje su na istom potencijalu
- Postoje razne vrste protobordova koje se mogu koristiti za realizaciju električnih kola, a na slici je prikazan izbor od par protobordova