

Univerzitet u Beogradu

Petar M. Lukić, Dobrila M. Škatarić, Tomislav M. Stojić

ELEKTROTEHNIKA - MERENJA I OGLEDI
PRAKTIKUM ZA STUDENTE MAŠINSKOG FAKULTETA

Mašinski fakultet
Beograd, 2019.

Univerzitet u Beogradu

Petar M. Lukić, Dobrila M. Škatarić, Tomislav M. Stojić

ELEKTROTEHNIKA - MERENJA I OGLEDI
PRAKTIKUM ZA STUDENTE MAŠINSKOG FAKULTETA

Mašinski fakultet
Beograd, 2019.

ELEKTROTEHNIKA MERENJA I OGLEDI

PRAKTIKUM ZA STUDENTE MAŠINSKOG FAKULTETA

Prvo izdanje

- **Autori:**

Dr Petar M. Lukić, dipl. inž. el.

redovni profesor Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu

Dr Dobrila M. Škatarić, dipl. inž. el.

redovni profesor Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu

Dr Tomislav M. Stojić, dipl. inž. el.

vanredni profesor Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu

- **Recenzenti:**

Dr Dragan Kandić, dipl. inž. el.

redovni profesor Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu u penziji

Dr Nenad Zrnić, dipl. inž. mas.

redovni profesor Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu

- **Izdavač:**

Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu

Kraljice Marije 16, 11120 Beograd 35,

telefon: (011) 3370 350 i 3302 384, faks: (011) 3370 364

Za izdavača: Dekan prof dr Radivoje Mitrović

Glavni i odgovorni urednik: prof. dr Milan Lečić

Štampanje odobrio Dekan Mašinskog fakulteta odlukom br. od

- **Štampa:**

PLANETA PRINT

Tiraž: 1200 primeraka

Autori i Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd 2019.

Preštampavanje i fotokopiranje nije dozvoljeno. Sva prava zadržavaju izdavač i autori.

Školska godina ____ / ____

broj indeksa:

/

Prezime i ime studenta : _____

Redni broj	Naziv vežbe	Datum kada je vežba rađena	Datum odbrane vežbe	Potpis Profesora / Asistenta
1.	Osnovni merni instrumenti u elektrotehnici – principi rada			
2.	Merenje električne struje			
3.	Merenje električnog napona			
4.	Merenje i određivanje električne otpornosti			
5.	Merenje električne snage u kolima jednosmernih struja			
6.	Odabrani ogledi iz elektromagnetike			
7.	Merenje napona i jačine struje u kolima naizmjeničnih struja			
8.	Merenje električne snage monofaznog i trofaznog potrošača			
9.	Kompenzacija reaktivne snage i energije			

Student je stekao uslov za polaganje ispita iz Elektrotehnike.

Beograd, _____

Profesor/Asistent

Pravila za rad u laboratoriji

- 1) Student je obavezan da se pre dolaska na čas upozna sa vežbom koju će raditi tog časa - da iz Praktikumuma pročita tekst vežbe. Ako je potrebno, koriste se i predavanja iz Elektrotehnike.
- 2) Po ulasku u Laboratoriju studenti odlaze na određeno radno mesto. Obilaženje drugih radnih mesta nije dozvoljeno, kao ni uzimanje instrumenata i drugog pribora sa nekog drugog radnog mesta.
- 3) Pošto se od studenata ne očekuje prethodno poznavanje instrumenata, ukoliko se na radnom mestu nađe neki instrument ili tip instrumenta koji nije poznat, obavestiti se kod asistenta o njemu. Vezivanje instrumenata i aparata izvodi se tek pošto su najpogodnije razmešteni, tako da se lako i pregledno mogu pratiti veze i čitati skretanja na instrumentima.
- 4) Priključivanje izvora izvesti tek kada je sve ostalo povezano i kada je asistent pregledao veze i odobrio priključivanje. Studenti moraju imati na umu da za sve štete nastale njihovom krivicom odgovaraju lično i da su obavezni da ih nadoknade.
- 5) Obratiti pažnju da pri vezivanju i odvezivanju ne dođe do oštećenja instrumenata i provodnika. Nikada ne vući provodnik a da se pre toga ne odvrne zavrtnj kojim je vezan. Ako je provodnik sa „bananom“, hvatati pri izvlačenju „bananu“ a ne provodnik.
- 6) Ako su spojevi sa zavrtnjem, potrebno je stegnuti ih tako da veza ne bude labava. Pri tom ne treba preterivati da ne bi izazvali teškoće pri odvezivanju ili oštećenje zavrtnja.
- 7) Ukoliko je potrebno premeštati instrumente, voditi računa da su oni vrlo osetljivi i pažljivo ih postavljati, jer često grubo postavljanje na sto i potresi mogu izazvati njihovo oštećenje.
- 8) Skretanje kazaljke instrumenata u suprotnom smeru treba izbegavati. Kako to neće biti uvek moguće, ne dozvoliti da takvo skretanje dugo traje - odmah zameniti mesta priključima na instrumentu.
- 9) Kod instrumenata sa više opsega merenja, počinjati merenje sa najgrubljim opsegom. Ukoliko je instrument „univerzalni“, tj, može se koristiti kao ampermetar, voltmetar ili ommetar, voditi računa kako se priključuje.
- 10) Ako na instrumentu ima preklopnika, ne prebacivati ih u drugi položaj ako se ne zna tačno čemu oni služe.
- 11) U slučaju da se pojave neke nepravilnosti ili se smatra da nešto nije u redu, pozvati asistenta i ne pokušavati samostalno „popravke“.
- 12) Po završenom ogledu radno mesto ostaviti u onakvom stanju u kakvom je zatečeno. Sve provodnike, instrumente i ostale uređaje ostaviti tamo gde su bili nađeni pri dolasku na čas. Pozvati asistenta i predati mu radno mesto. Nije dozvoljeno otići sa časa a ne pokazati asistentu kako je ostavljen materijal sa kojim je rađeno.
- 13) Student je u obavezi da poseduje Praktikum za laboratorijske vežbe i da sve rezultate i odgovore na postavljena pitanja popunjava u njemu. Nakon odrađenog ciklusa laboratorijskih vežbi, student brani vežbe kod predmetnog profesora ili asistenta. Uredno popunjen Praktikum preduslov je da bi se odbrani pristupilo.
- 14) Odbranjene laboratorijske vežbe uslov su za polaganje pismenog dela ispita iz Elektrotehnike.
- 15) Popuniti podatke u tabeli na prvoj strani Praktikumuma.
- 16) UPOZORAVAJU SE STUDENTI DA SE TOKOM RADA MORAJU OBAVEZNO NALAZITI NA PODOLITU - IZOLOVANOM DELU PODA.

Sadržaj:

1. Osnovni merni instrumenti u elektrotehnici – principi rada	1
2. Merenje električne struje	17
3. Merenje električnog napona	25
4. Merenje i određivanje električne otpornosti	35
5. Merenje električne snage u kolima jednosmernih struja	46
6. Odabrani ogledi iz elektromagnetike	55
7. Merenje napona i jačine struje u kolima naizmjeničnih struja	64
8. Merenje električne snage monofaznog i trofaznog potrošača.....	77
9. Kompenzacija reaktivne snage i energije.....	90
Literatura	99

1. Osnovni merni instrumenti u elektrotehnici -principi rada-

1.1. Uloga mernih instrumenata

Veran prikaz, odnosno tačno određivanje vrednosti veličine koja se meri, ima veliki značaj kako u praktičnim primenama, tako i u naučnim istraživanjima. Vidan napredak čini se uvođenjem u upotrebu novih mernih instrumenata čiji se rad zasniva na savremenim metodama za obradu mernih veličina ili, šire gledano, signala.

Električna merenja prvenstveno podrazumevaju merenje struje, napona, električne snage, električne energije, električne otpornosti, ali i frekvencije, uzemljenja i sl. Treba imati u vidu da se i neelektrične veličine mogu meriti električnim putem, korišćenjem električnih mernih uređaja i sistema. Električni i elektronski instrumenti za merenje različitih veličina danas predstavljaju najsavremenije uređaje i prisutni su u svim segmentima čovekovog delovanja. Imaju zadatak da daju kvantitativnu informaciju o merenoj veličini - vrše merenje i prikazuju vrednost veličine koja se meri.

1.2. Analogni merni instrumenti

Razvoj mernih instrumenata doveo je do usavršavanja i poboljšavanja postojećih kao i stvaranja novih. Tako su pored analognih mernih instrumenata, koji se u elektrotehnici koriste više od jednog veka, već duže u upotrebi i digitalni.

Analogni merni instrumenti po pravilu imaju skalu sa podeocima iznad koje se nalazi kazaljka. Podeoci na skali prikazuju moguće vrednosti merne veličine, počev od nule kada merna veličina ne postoji, do neke maksimalne vrednosti merne veličine koja se može izmeriti. To se naziva opseg merenja. Prilikom merenja, kazaljka zauzima određeni položaj iznad odgovarajućeg podeoka na skali i time pokazuje kolika je vrednost veličine koja se meri. Na početku merenja, kazaljka se kontinualno kreće od nultog podeoka do onog koji

određuje vrednost veličine koja se meri. U suštini, sklop za koji je kazaljka vezana se kreće kontinualno (nema prekida ni po amplitudi ni po vremenu), pa se ovakvi instrumenti nazivaju analognim. Na slici 1.1. prikazan je izgled nekih standardnih analognih mernih instrumenata.



Slika 1.1. Izgled nekih analognih mernih instrumenata
(ampermetar, voltmetar u četvrtastom i voltmetar u okruglom kućištu,
univerzalni merni instrument – unimer, vatmetar)

Precizno govoreći, savremeni analogni merni instrumenti se mogu realizovati kao elektromehanički ili kao elektronski.

Postoje različiti tipovi elektro-mehaničkih analognih mernih instrumenata: sa pokretnim (kretnim) kalemom, sa pokretnim gvožđem, sa unakrsnim kalemovima, elektrostatički, elektrodinamički, termoelektrični.

Prednosti klasičnih elektro-mehaničkih instrumenata su:

- nema potrebe za napajanjem instrumenta u slučajevima kada se meri struja ili napon;
- u nekim slučajevima prikazivanje rezultata merenja pomoću skale i kazaljke ima prednost;

Nedostaci klasičnih elektro-mehaničkih instrumenata su:

- nekada nezadovoljavajuća tačnost merenja;
- problemi sa tačnim očitavanjem izmerene vrednosti;
- nemogućnost (elektronskog) očitavanja, obrade rezultata i povezivanja u složeniji sistem.

Elektronski analogni instrumenti predstavljaju „prelazno rešenje“ između analognih i digitalnih mernih uređaja. Za indikaciju merene veličine koriste standardni elektro-mehanički sklop (po pravilu sa kretnim kalemom). Međutim, rešenje je osavremenjeno korišćenjem elektronskih kola. Zato se ovom vrstom instrumenata obezbeđuju poboljšane karakteristike pri merenju naizmeničnih struja i napona. Takođe, poboljšavaju se karakteristike instrumenta za merenje napona (povećava se unutrašnja otpornost) u odnosu na klasične elektro-mehaničke instrumente.

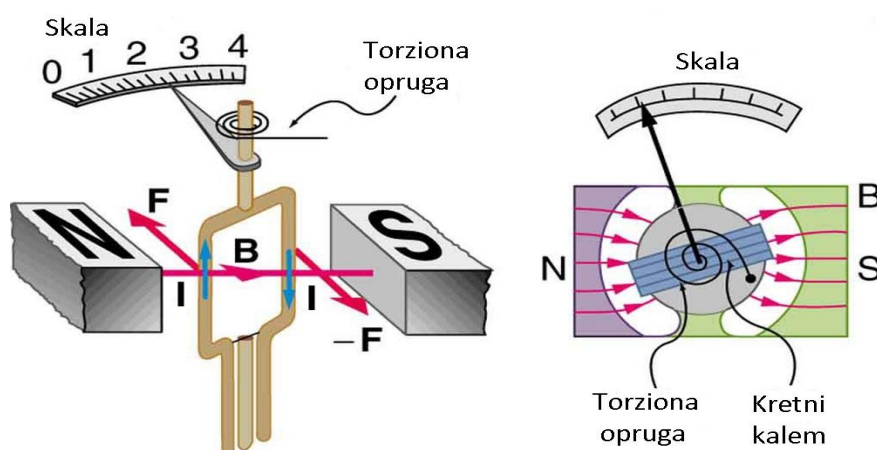
1.3. Analogni merni instrument sa kretnim kalemom -osnovni delovi i princip rada-

Osnovni delovi instrumenta sa kretnim kalemom su:

- kretni kalem;
- stalni (permanentni) magnet;
- osovina;
- torzione opruge;
- skala;
- kazaljka;
- priključci;
- kućište instrumenta.

Magnetno kolo instrumenta formira stalni magnet sa polovima koji su zakrivljeni ka unutrašnjosti (izdubljeni). U prostoru između polova, koji se naziva međugvožđe, nalazi se kretni kalem. Kretni kalem čine namotaji tanke izolovane bakarne žice, a preko torzionih opruga je pričvršćen na osovinu oko koje može da se okreće u ležištu. Kazaljka instrumenta je fiksirana za kretni kalema. Kada dođe do okretanja kretnog kalema, dolazi i do okretanja

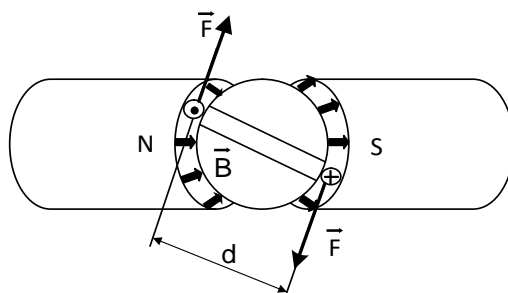
kazaljke instrumenta. Torzione opruge služe za napajane kretnog kalema električnom strujom (preko njih se u namotaje kalema dovodi električne struja); ove opruge se završavaju sa dva mehanička roga koja uravnotežavaju kazaljku u polju Zemljine teže. Osnovni delovi i šematski prikaz principa rada instrumenta sa kretnim kalemom prikazani su na slikama 1.2. i 1.3.



Slika 1.2. Osnovni delovi instrumenta sa kretnim kalemom sa ucrtanim linijama magnetnog polja i silama koje deluju na kretni kalem, i koje dovode do njegovog okretanja, kada kroz kretni kalem protiče električna struja

Princip rada instrumenta sa kretnim kalemom zasniva se na činjenici da na provodnik kroz koji protiče električna struja, a koji se nalazi u stranom magnetnom polju, deluje sila - elektromagnetna sila.

U slučaju instrumenta sa kretnim kalemom, u prostoru između polova permanentnog magneta, a u kome je smešten kretni kalem, uvek postoji vremenski konstantno radijalno magnetno polje. Dok kroz kretni kalem ne protiče struja, na namotaje kretnog kalema ne deluje elektromagnetna sila. Kada se kroz priključke instrumenta sa kretnim kalemom, a time i kroz kretni kalem, propušta električna struja, na svaki namotaj kalema kroz koji protiče električna struja deluje elektromagnetna sila, s obzirom da se ovi namotaji sa strujom nalaze u magnetnom polju koje stvara stalni magnet. Ovo je prikazano na slici 1.3.



Slika 1.3. Prikaz preseka polova stalnog magneta i kretnog kalema, sa ucrtanim linijama magnetnog polja i silama koje deluju na kretni kalem kada kroz njegove namotaje protiče električna struja

Analiza opisane fizičke pojave dovodi do zaključka da je ugao skretanja kretnog kalema, a time i ugao skretanja kazaljke instrumenta koja je pričvršćena za kretni kalem, direktno proporcionalan struji koja protiče kroz kretni kalem odnosno kroz instrument, a to je struja koja se meri instrumentom. Naime, elektomagnetna sila koja deluje na jedan namotaj kalema je:

$$\vec{F} = \int_l I d\vec{l} \times \vec{B},$$

gde je: I jačina električne struje koja protiče kroz namotaj kretnog kalema, $d\vec{l}$ elementarna dužina namotaja kroz koji protiče struja i koji se nalazi u magnetnom polju, \vec{B} vektor magnetske indukcije u međugvožđu.

S obzirom da se magnetska indukcija \vec{B} ne menja duž stranice kalema dužine l (\vec{B} je konstantno duž cele stranice dužine l , a integracija se vrši duž iste te stranice dužine l), izraz za elektromagnetnu silu se može pisati u obliku:

$$\vec{F} = I\vec{l} \times \vec{B}.$$

\vec{l} je vektor čiji je intenzitet jednak dužini onog dela namotaja koji se nalazi u magnetnom polju, pravac je određen pravcem namotaja, a smer smerom struje kroz namotaj. Kako su vektori \vec{l} i \vec{B} međusobno upravni, a s obzirom da je intenzitet vektorskog proizvoda dva vektora jednak proizvodu intenziteta oba vektora i sinusa ugla između ova dva vektora, intenzitet sile koja deluje na jednu stranicu kalema je:

$$F = I \cdot l \cdot B.$$

U magnetnom polju nalaze se samo dve naspramne stranice svakog namotaja i to ne celom svojom dužinom već samo visinom kalema l , pa je intenzitet sile koja deluje na jednu stranicu dat prethodnim izrazom. Na drugu stranicu namotaja deluje sila istog intenziteta i pravca, a suprotnog smera. Ove sile obrazuju elektromagnetni spreg intenziteta:

$$M = d \cdot F,$$

gde je d širina kretnog kalema. Spreg teži da zarotira kretni kalem. S obzirom da kalem ima N namotaja, ukupan elektromagnetni spreg koji deluje na ceo kretni kalem je:

$$M_{el} = N \cdot M = N \cdot d \cdot F = N \cdot d \cdot I \cdot l \cdot B.$$

Kretanju kalema pod dejstvom elektromagnetnog sprega suprotstavlja se spreg torzionih opruga, čiji je intenzitet srazmeran uglu otklona kazaljke α : $M_T = k_T \cdot \alpha$, gde je k_T torziona konstanta. Kada se kazaljka instrumenta umiri, uspostavljeno je ravnotežno stanje, pa je tada:

$$M_{el} = M_T,$$

odnosno:

$$\alpha = \frac{NdlB}{k_T} \cdot I.$$

To znači da je skretanje kazaljke instrumenta sa kretnim kalemom direktno srazmerno struji koja protiče kroz kretni kalem:

$$\alpha = k_\alpha \cdot I.$$

Navedena relacija omogućava da se instrument sa kretnim kalemom koristi za merenje jačine električne struje. Skala instrumenta se, naravno, direktno baždari u amperima [A] (amper je jedinica za jačinu električne struje).

Nedostatak opisanog instrumenata sa kretnim kalemom je osetljiva konstrukcija, prvenstveno tanka bakarna žica. Zato se kretni kalem instrumenta ne sme opteretiti strujama velikih jačina. Pomoću prethodno opisanog instrumenta moguće je meriti struje malih jačina, reda [mA], što ga čini nepodesnim za praktičnu primenu s obzirom na veoma mali merni opseg. U praksi se koriste instrumenti sa kretnim kalemom koji uz kretni kalem koji ima opisanu ulogu, dodaju i komponente koje obezbeđuju mogućnost merenja struja većih intenziteta kakve se sreću u praksi.

- ✓ **Zadatak 1.1.:** Opisati ukratko princip rada analognog mernog instrumenta sa kretnim kalemom.
-
-
-

1.4. Digitalni merni instrumenti

Digitalni merni instrumenti predstavljaju savremene merne uređaje. Njihov nastanak i razvoj direktno je vezan za brz napredak elektronike, posebno digitalne elektronike. Ovi merni uređaji po pravilu imaju displej sa npr. višecifarskim indikatorom na kome se prikazuje vrednost merene veličine. Na slici 1.4. prikazani su neki digitalni merni instrumenti.



Slika 1.4. Izgled nekih digitalnih mernih instrumenata (digitalni unimeri)

U digitalnim mernim instrumentima, merena veličina, koja je najčešće analogna, se digitalizuje i njena vrednost se zatim prikazuje na displeju.

Prednosti digitalnih mernih instrumenata su:

- mogućnost preciznog očitavanja izmerne vredosti;
- mogućnost lakog očitavanja izmerne vrednosti;
- mogućnost obrade dobijenih vrednosti u toku samog merenja tj. u realnom vremenu, tako da se odmah mogu preduzimati odgovarajuće aktivnosti (analiza greške ili stanja i delovanje na osnovu dobijenih podataka);

- mogućnost istovremenog merenja i prikazivanja rezultata za više različitih veličina;
- mogućnost „automatskog“ pamćenja odnosno memorisanja veoma velikog broja izmerenih vrednosti (u internoj memoriji instrumenta); mogućnost stalnog (naknadnog) pristupa izmerenim vrednostima i naknadne obrade rezultata merenja;
- mogućnost povezivanja digitalnog mernog uređaja u složeniji elektronski sistem i sl.

Nedostaci digitalnih mernih instrumenata su:

- potrebno je obezbediti stalno napajanje mernog instrumenta;
- s obzirom na elektronske sklopove koje sadrže, mogu biti osetljiviji na promenu temperature i uopšte parametre sredine (ambijenta).

Analogni signal je za čoveka lakše shvatljiv. Zato je u praksi, prilikom prikazivanja dobijenih podataka, nekada potrebno digitalni signal pretvoriti u analogni (nakon digitalne obrade). Ovaj postupak se obavlja u elektronskim kolima koja se nazivaju digitalno-analogni konvertori (D/A konvertori, DAC).

Uslovi merenja i karakteristike električnih kola, sklopova i sistema obezbeđuju da se u najvećem broju slučajeva mogu koristiti i analogni i digitalni instrumenti.

1.5. Digitalni signali, analogno digitalna konverzija

Šta su digitalni signali, kako od analognog dobiti digitalni signal?

Signali u okruženju su najčešće analogni što znači kontinualni po amplitudi i u vremenu.

Digitalni signali su diskretni i po amplitudi i u vremenu.

Najčešće se koriste binarni digitalni signali. Binarni digitalni signali imaju samo dva dozvoljena nivoa (stanja):

- nivo logičke nule ili tzv. logičku nulu, i
- nivo logičke jedinice ili tzv. logičku jedinicu.

Binarni zapis je niz koji čine na određen način raspoređene logičke nule i logičke jedinice.

Od analognih signala se mogu napraviti digitalni u dva koraka:

1. Korak: uzimanje odbiraka analognog signala u određenim vremenskim trenucima – to je proces tzv. odabiranja ili uzorkovanja („semplovanja“) signala; postupak se još naziva i diskretizacija u vremenu;
2. Korak: kvantizacija signala po amplitudi; postupak se naziva diskretizacija po amplitudi; digitalizacija – pravljenje digitalnog zapisa za svaki odbirak.

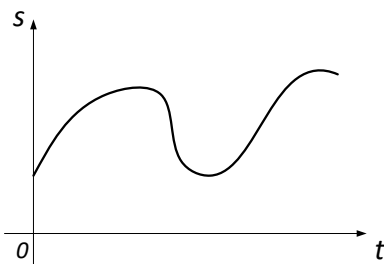
Opisani postupak se naziva analogno-digitalna konverzija (A/D konverzija).

Pri analogno-digitalnoj konverziji, cilj je napraviti konvertovani digitalni signal koji pruža vernu sliku originalnog analognog signala. Drugim rečima, potrebno je obezbediti mogućnost da se iz digitalnog zapisa verno rekonstruiše prvobitni analogni signal.

1. Korak Diskretizacija u vremenu

Jasno je da je signal vernije predstavljen većim brojem odbiraka (većim brojem uzetih „uzoraka“ u toku određenog vremenskog intervala), ali je takođe jasno da je, sa druge strane, pogodnije imati manji broj odbiraka za rad (nije isto vršiti kvantizaciju npr. sto hiljada odbiraka ili deset hiljada odbiraka). Zato se teži da frekvencija odabiranja bude što manja ali istovremeno da budu obuhvaćene sve značajne spektralne komponente analognog signala koji treba diskretizovati. Koliki je broj odbiraka koje treba uzeti? Precizan odgovor na prethodno pitanje daje Teorema odabiranja u kojoj se kaže da frekvencija odabiranja treba da bude veća od dvostruke maksimalne frekvencije analognog signala koji treba diskretizovati.

Primer analognog signala s prikazan je na slici 1.5.



Slika 1.5. Analogni signal s (kontinualan u vremenu i po amplitudi)