

1.1. Definicije osnovnih pojmova o mjerenju

U mjernoj se tehnici upotrebljava niz pojmova kojima se opisuju različite pojave, sredstva i postupci s kojima se susrećemo pri mjerenju. Važniji pojmovi su u nastavku navedeni i ukratko objašnjeni.

Mjerena veličina je fizikalna veličina kojoj mjerenjem određujemo vrijednost.

Mjerenje je skup djelovanja radi određivanja vrijednosti fizikalne veličine.

Električna mjerenja su mjerenja fizikalnih veličina koje nastaju uslijed djelovanja elektromagnetskih pojava. Te veličine su: jakost električne struje, količina elektriciteta, električni napon, električni otpor, električna snaga, električna energija, električni kapacitet, induktivitet i dr.

Mjerni instrument je naprava ili uređaj kojim se provodi postupak mjerenja fizikalne veličine.

Električni mjerni instrument je naprava ili uređaj kojim se provodi postupak mjerenja električne veličine.

Primjer:

Električni se otpor na otporniku može izmjeriti neposredno, primjenom omometra kad otpornik nije spojen u strujni krug ili posredno, mjerenjem struje kroz otpornik ampermetrom i pada napona na krajevima otpornika voltmetrom, te proračunom prema Ohmovom zakonu gdje je $R = U/I$.

U mjernoj tehnici služimo se **mjerilima** i **mjerama**.

Mjerilo je naprava ili instrument kojim provodimo mjerenje (npr. vaga i omometar).

Mjera je element koji utjelovljuje neku mjernu veličinu (npr. uteg).

Da bi mjerenje električnih veličina bilo uspješno, potrebno je poznavati načelo rada i karakteristike mjernih instrumenata i mjerne metode koje je potrebno provesti tijekom mjernog postupka.

Neke neelektrične veličine mjere se tako da se najprije pretvore u električne. To se izvodi mjernim pretvornicima neelektričnih veličina u električne. Svaka neelektrična veličina koja se mjeri na taj način posebnim se pretvornikom pretvori u istosmjerni napon, te se dalje mjeri preciznim istosmjernim voltmetrom. Taj voltmetar može biti poseban dio mjernog kruga ili je ugrađen u mjerni instrument koji mjeri neelektričnu veličinu.

Ovisno o odabranoj mjernoj metodi, u mjernom se postupku do mjernog rezultata može doći tako da ga jednostavno očitamo s instrumenta ili da ga izračunamo iz drugih izmjerenih veličina.

Mjerna jedinica je dogovorena jedinična količina fizikalne veličine s kojom se uspoređuje mjerna veličina kako bi se saznala njezina vrijednost. Možemo je definirati kao dogovorom prihvaćenu posebnu veličinu koja služi za kvantitativno iskazivanje veličina iste dimenzije.

Mjerna metoda je način kojim se u postupku mjerenja dolazi do vrijednosti mjerne veličine. Možemo je definirati kao logički općenito opisan slijed djelovanja, koji se rabi za provedbu mjerenja.

Mjerne metode, a time i **mjerni postupci** mogu biti **neposredni** (izravni, direktni) i **posredni** (neizravni, indirektni).

U **neposrednom** mjernom postupku **mjerni se rezultat dobiva očitavanjem** pokazivanja instrumenta kojim se provodi mjerenje.

U **posrednom** mjernom postupku **mjerni se rezultat dobiva računom** iz dviju ili više izmjerenih veličina.

Mjerni rezultat je brojčana vrijednost koja opisuje koliko je puta mjerena veličina veća ili manja od mjerne jedinice.

Mjerni rezultat = brojčani iznos · mjerna jedinica

Oznake mjernih, tj. fizikalnih veličina i mjernih jedinica sastoje se od kombinacija slova i simbola koji često potječu od početnih slova njihovih naziva, te su utvrđene normama. Može se dogoditi da neka fizikalna veličina ima istu oznaku kao naziv neke mjerne jedinice koja najčešće nema nikakvu vezu s navedenom fizikalnom veličinom (pogledati primjere sa strane). Oznaka mjerne jedinice mora biti razmaknuta za mjesto jednog znaka od njezine brojčane vrijednosti (primjer: 4 A, 2 m, 13,2 V).

Primjeri istih oznaka fizikalnih veličina i mjernih jedinica:

- F** – oznaka za fizikalnu jedinicu sila
- F** – oznaka za farad, mjernu jedinicu kapaciteta
- W** – oznaka za fizikalnu jedinicu energije, rad
- W** – oznaka za vat, mjernu jedinicu snage

Iz povijesti...

Dogovor o metru

Sredinom 19. stoljeća, posebno tijekom Prve svjetske izložbe u Londonu 1851. godine, pokazala se potreba za univerzalnim desetičnim metričkim sustavom. 1875. godine u Parizu održana je konferencija na kojoj je 17 vlada potpisalo sporazum, tzv. **Dogovor o metru**. Potpisnici su osnovali i nastavili financirati znanstvenu ustanovu Međunarodni ured za utege i mjere (francuski *Bureau International des Poids et Mesures, BIPM*) u Sèvresu kraj Pariza sa zadaćom osiguranja jedinstvenosti mjerenja širom svijeta te sljedivosti prema Međunarodnom sustavu jedinica (SI). Danas **Dogovor o metru** ima 51 država članica.

Iz povijesti...



Blaise Pascal

Francuski fizičar (1623. – 1662.), izumio je prvi računski stroj u povijesti, koji je mogao obavljati četiri osnovne računske operacije, bavio se i teorijom vjerojatnosti. Objavio je niz radova o prenošenju tlaka kroz tekućine.



Isaac Newton

Engleski fizičar (1642. – 1727.), najpoznatiji je po svojoj teoriji djelovanja gravitacije. Pronašao je formulu koja je opisivala kolikom se silom privlače neka dva tijela. Svoju matematičku teoriju objasnio je utjecajima Sunca, Mjeseca i Zemlje. Sva svoja velika otkrića smjestio je unutar 18 mjeseci, između 1665. i 1667. godine, ali svoj rad na teoriji djelovanja gravitacije nije objavio sve do 1687. godine. Knjiga se zvala *The Principia* i mnogi je smatraju najvećom znanstvenom knjigom ikada napisanom.

1.2. Mjerne jedinice

Mjerne jedinice u Republici Hrvatskoj uređene su **Zakonom o mjernim jedinicama** ("Narodne novine" 58/93, 74/14) i **Pravilnikom o mjernim jedinicama** ("Narodne novine" 88/15, 16/20) te "Hrvatskim normama" (HRN ISO 1000 i niz HRN ISO 31), sve slijedom međunarodnih dogovora temeljenih na **Dogovoru o metru** iz 1875. god. Zakonite se jedinice razvrstavaju u sljedeće skupine:

1. Jedinice Međunarodnog sustava, tzv. jedinice SI:

- osnovne
- izvedene bez posebnih naziva i znakova
- izvedene s posebnim nazivima i znakovima
- iznimno dopuštene jedinice izvan SI.

2. Decimalne jedinice (tvore se s pomoću decimalnih predmetaka)

- od jedinica SI, izuzev Celzijeva stupnja i kilograma (vidi točku 1.)
- od sljedećih iznimno dopuštenih jedinica izvan SI: litra, teks, bar, elektronvolt i var (vidi točku 2.).

3. Složene izvedene jedinice.

- od izvedenih i osnovnih SI jedinica (npr. V/m, $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ i dr.)

Popisi su jedinica prilagođeni posljednjem (sedmom) izdanju **Le Système international d'unités** (SI). *Organization intergouvernementale de la Convention du Metre – Bureau international des poids et mesures*, Sevres 1998., prema kojem će se usklađivati norme i državni zakoni o mjernim jedinicama, pa tako i hrvatski **Zakon o mjernim jedinicama**. Takve su jedinice popraćene bilješkama ispod tablica.

1.2.1. Osnovne fizikalne jedinice SI

Međunarodni sustav jedinica čini sedam osnovnih fizikalnih jedinica.

To su:

metar, kilogram, sekunda, amper, kelvin, mol, kandela.

Definicija osnovnih jedinica SI:

1. Jedinica duljine metar (**m**) je dužina puta koju u vakumu prijeđe svjetlost u trajanju $1/299\,792\,458$ sekunde.
2. Jedinica mase kilogram (**kg**) definiran je s pomoću energije fotona emitiranoga iz osnovnoga stanja atoma cezija (^{133}Cs), tj. s pomoću Planckove konstante, koja je određena da iznosi točno $h = 6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34} \text{ kgm}^2\text{s}^{-1}$, frekvencije prijelaza hiperfine strukture osnovnoga stanja atoma cezija $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, koja iznosi točno $9\,192\,631\,770 \text{ Hz}$, i brzine svjetlosti c , koja po definiciji iznosi točno $299\,792\,458 \text{ m/s}$.

$$1 \text{ kg} \approx 1,475\,5214 \times 10^{-40} h\Delta\nu_{\text{Cs}} / c^2$$
3. Jedinica vremena sekunda (**s**) je trajanje $9\,192\,631\,770$ perioda zračenja koje odgovara prijelazu između dviju hiperfinskih razina osnovnog stanja atoma cezija ^{133}Cs . Definicija je usvojena na 13. općoj konferenciji za utege i mjere 1967. godine.
4. Jedinica jakosti električne struje amper (**A**) je jakost istosmjerne električne struje koja odgovara tijeku od $1 / (1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19})$ elementarnih naboja u sekundi.
5. Jedinica termodinamičke temperature, kelvin (**K**) definira se kao $273,16$ -ti dio temperature trojne točke vode.
6. Jedinica količine tvari, mol (**mol**) predstavlja količinu tvari onog sustava koji sadrži broj jedinki koliko se nalazi atoma u 12 grama ugljika C_{12} (taj broj jedinki jednak je *Avogadrovom broju* $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$).

Iz povijesti...



**Charles Augustin
Coulomb**

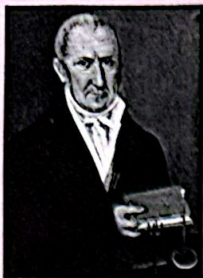
Francuski fizičar (1736. – 1806.), za vrijeme Napoleonove vlasti generalni inspektor obrazovanja. Bavio se istraživanjem na polju statičkog elektriciteta, trenja i torzije.



James Watt

Škotski fizičar (1736. – 1819.), slavan je po usavršavanju parnog stroja. Nakon utvrđivanja i uzimanja u obzir svojstava pare, Watt je dizajnirao posebnu odvojenu komoru za parni stroj koja je sprečavala ogromne gubitke pare u cilindru i unaprijedio zračne uvjete.

Iz povijesti...



**Alessandro Giuseppe
 Antonio Anastasio
 Volta**

Talijanski fizičar (1745. – 1827.) izumio je galvanski članak, prvu električnu bateriju. 1775. g. izumio je elektrofor, uređaj koji se trljanjem napunio i mogao je prenositi električni naboj na druge objekte. Kada je objavljen Luigi Galvaniev pokus sa životinjskom strujom, Volta je počeo s pokusima koji su ga doveli do spoznaje da životinjsko tkivo nije potrebno za vođenje elektriciteta. Dokaz te teorije bila je baterija, koju je izumio 1800. g.



André-Marie Ampère

Francuski fizičar (1775. – 1863.) koji je otkrio da vodič protječan istosmjernom strujom oko sebe stvara magnetsko polje, te da se paralelni vodiči, kroz koje protiču dvije struje istog smjera privlače, dok se isti prilikom protoka struje suprotnog smjera odbijaju, silom razmjernom jačini struje i obrnuto razmjernom razmaku između žica. Proučavao je također načelo mjerenja jakosti struje, a na temelju njegovih istraživanja kasnije je razvijen instrument sa zakretnom svitkom.

- 7.** Jedinica svjetlosne jakosti, kandela (**cd**), predstavlja onu svjetlosnu jakost zračenja izvora jednobojnog svjetla frekvencije $540 \cdot 10^{12}$ Hz koja u danom smjeru iznosi $1/683$ W/sr (vata po steradianu – steradian je jedinica za ugao, tj. prostorni kut).

Osnovne jedinice SI prikazane su u tablici:

Naziv fizikalne veličine	Simbol fizikalne veličine	Naziv mjerne jedinice	Znak mjerne jedinice
duljina	<i>l</i>	metar	m
masa	<i>m</i>	kilogram ¹⁾	kg
vrijeme	<i>t</i>	sekunda	s
jakost električne struje	<i>I</i>	amper	A
termodinamička temperatura	<i>T</i>	kelvin	K
množina (količina) tvari	<i>n</i>	mol	mol
svjetlosna jakost	<i>I</i>	kandela	cd

¹⁾ Decimalne jedinice za masu ne tvore se od kilograma, nego od grama.

1.2.2. Izvedene jedinice SI

Izvedene SI jedinice nastale su množenjem i dijeljenjem osnovnih SI jedinica. Neke od njih izražavaju se samo kao količnik ili umnožak osnovnih SI jedinica, a neke su dobile posebne nazive i zovemo ih **imenovane izvedene SI jedinice**.

Neke od izvedenih SI jedinica bez posebnih naziva i znakova prikazane su u tablici

UVOD U MJERNU TEHNIKU

Naziv fizikalne veličine	Simbol fizikalne veličine	Naziv mjerne jedinice	Znak mjerne jedinice	Izvod osnovnih fizikalnih veličina SI	Izvod složene mjerne jedinice iz osnovnih SI jedinica
sila	F	njutn (newton)	N	$F = m \cdot a$	$N = \text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}$
energija, rad, toplina	W	džul (joule)	J	$W = F \cdot s$	$J = N \cdot \text{m} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{m} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}$
snaga	P	vat (watt)	W	$P = \frac{W}{t}$	$W = \frac{J}{s} = \frac{\frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}}{s} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^3}$
tlak	p	paskal (pascal)	Pa	$p = \frac{F}{S}$	$\text{Pa} = \frac{N}{\text{m}^2} = \frac{\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}}{\text{m}^2} = \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}$
električni naboj	Q	kulon (coulomb)	C	$Q = I \cdot t$	$C = A \cdot s = As$
električni napon	U	volt	V	$U = \frac{P}{I}$	$V = \frac{W}{A} = \frac{\frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^3}}{A} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{A \cdot \text{s}^3}$
električni otpor	R	om (ohm)	Ω	$R = \frac{U}{I}$	$\Omega = \frac{V}{A} = \frac{\frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{A \cdot \text{s}^3}}{A} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{A^2 \cdot \text{s}^3}$
električna vodljivost	G	simens (siemens)	S	$G = \frac{1}{R} = \frac{I}{U}$	$S = \frac{A}{V} = \frac{A}{\frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{A \cdot \text{s}^3}} = \frac{A^2 \cdot \text{s}^3}{\text{kg} \cdot \text{m}^2}$
električni kapacitet	C	farad	F	$C = \frac{Q}{U}$	$F = \frac{C}{V} = \frac{A \cdot s}{\frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{A \cdot \text{s}^3}} = \frac{A^2 \cdot \text{s}^4}{\text{kg} \cdot \text{m}^2}$
magnetski tok	Φ	veber (weber)	Wb	$\Phi = U \cdot t$	$\text{Wb} = V \cdot s = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{A \cdot \text{s}^3} \cdot s = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{A \cdot \text{s}^2}$
induktivitet	L	henri (henry)	H	$L = \frac{\Phi}{I}$	$H = \frac{\text{Wb}}{A} = \frac{\frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{A \cdot \text{s}^2}}{A} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{A^2 \cdot \text{s}^2}$
magnetska indukcija	B	tesla	T	$B = \frac{\Phi}{S}$	$T = \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} = \frac{\frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{A \cdot \text{s}^2}}{\text{m}^2} = \frac{\text{kg}}{A \cdot \text{s}^2}$
frekvencija	f	herc (hertz)	Hz	$f = \frac{1}{T}$	$\text{Hz} = \frac{1}{s}$
svjetlosni tok	Φ	lumen	lm	$\Phi = J \cdot \phi$	$\text{lm} = \text{cd} \cdot \text{sr}$
osvjetljenje	E	luks	lx	$E = \frac{\Phi}{S}$	$\text{lx} = \frac{\text{lm}}{\text{m}^2} = \frac{\text{cd} \cdot \text{sr}}{\text{m}^2}$

1.4. Mjerne pogreške i iskazivanje mjernog rezultata

Cilj mjerenja je što točnije odrediti vrijednost veličine koju mjerimo. Iz-mjerena vrijednost praktički nikada nije prava vrijednost, kojoj u praksi težimo, već od nje odstupa u većoj ili manjoj mjeri. Iznos odstupanja ovisi o primijenjenoj mjernoj metodi, o točnosti mjerne opreme koja nam je na raspolaganju i o stručnosti samog mjeritelja, tj. osobe koja provodi mjerenje i obrađuje mjerne rezultate.

U mjeriteljstvu se pod **pravom vrijednošću** kod mjerila najčešće po-drazumijeva dogovorna prava vrijednost. To je ona vrijednost mjerene veličine koja je dobivena najtočnijim dostupnim mjernim postupkom ili računskim putem. Kod mjera se prava vrijednost utvrđuje mjerenjem jer se često razlikuje od vrijednosti naznačene na samoj mjeri.

Izmjerena vrijednost je **vrijednost mjerene veličine koju smo dobili mjerenjem**. Izbor mjerne metode, mjerne opreme i pažljivost pri radu mjeritelja može je više ili manje približiti njezinoj pravoj vrijednosti.

Mjerna pogreška je **odstupanje izmjerenog rezultata od prave vrijed-nosti mjerene veličine**.

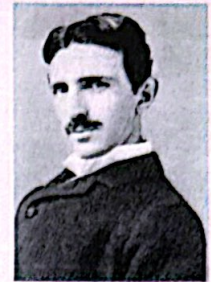
1.4.1. Grube, sustavne i slučajne mjerne pogreške

Prema uzroku nastajanja mjerne se pogreške mogu podijeliti na **gru-be, sustavne i slučajne**. Te pogreške dio su svakodnevnog posla mje-ritelja i važno je znati ih prepoznati, izbjeći ili umanjiti njihov utjecaj na mjerni rezultat. One izravno utječu na kakvoću mjernog rezultata, a time i na kakvoću one djelatnosti u kojoj taj rezultat treba biti ispravno protumačen i primijenjen.

Grube pogreške nastaju nepažnjom mjeritelja, primjenom neodgo-varajuće mjerne opreme ili neprimjerene mjerne metode (uporaba neispravnog instrumenta, očitavanje na pogrešnoj ljestvici, pogrešno mjerno područje i sl.). One mjerni rezultat čine neispravnim, a nakon njihovog nastajanja mjerenje treba ponoviti na ispravan način.

Sustavne pogreške nastaju zbog niza malih, predvidljivih promjena koje se događaju u mjernom objektu, okolini ili mjeritelju, a poznate su i moguće je uzeti u obzir njihov utjecaj na mjerni rezultat. Uvijek su istog

Iz povijesti...



Nikola Tesla

Pronalazač, elektrotehničar i fizičar Nikola Tesla (1856. – 1943.), rođen u Hrvatskoj, zaslužan je za uvođenje izmjenične struje u široku uporabu. Ostvario je mnogo pronalazaka i patenata. Već kao mlad znanstvenik izumio je rotacijsko magnetsko polje i induksijski motor koji pokreću višefazne izmjenične struje, visokonaponski transformator za prijenos električne energije na daljinu, te niskonaponski transformator.

1884. godine odlazi u Sjedi-njene Države, postaje američki državljanin i nastavlja s radom. Izumio je generator i transformator za struje visoke frekvencije, sustav za bežično upravljanje i davanje znakova na daljinu. Pronašao je novi sustav osvjjetljenja (lučne žarulje), napravio niz izuma iz područja radio-tehnike (1943. godine priznat mu je i patent za radio), vakuumsku foto-grafsku cijev, bežičan prijenos električne energije, izložio ideju o međuplanetarnim telekomuni-kacijama s pomoću ultrakratkih valova, a zamislio je u cjelini radarski sustav. Objavljivao je radove iz fizike u kojima je iznosio originalne ideje koje su se kasnije ostvarile.

predznaka i poznatog iznosa. Njihovo se djelovanje smanjuje tako da se mjernom rezultatu dodaje ispravak ili korekcija.

Ispravak I je po vrijednosti jednak poznatoj pogrešci, ali je suprotna predznaka:

$$I = -p_a \quad (1)$$

Ispravljeni rezultat X_i je zbroj izmjerene (očitanje) vrijednosti X_{mj} i ispravka I :

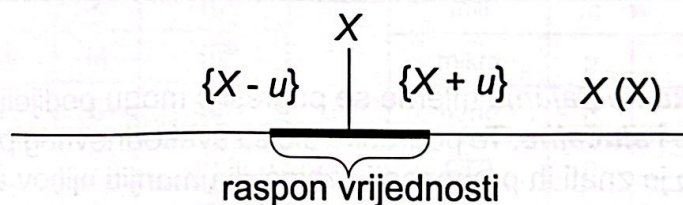
$$X_i = X_{mj} + I \quad (2)$$

Slučajne pogreške nastaju zbog niza malih, neizbježnih i neobuhvatnih promjena u mjernom objektu, okolini ili mjeritelju (promjena temperature u laboratoriju, utjecaj magnetskog polja ako se laboratorij nalazi u blizini tramvajske pruge i sl.). Zbog njih dolazi do rasipanja mjernih rezultata pri uzastopno ponovljenim mjerenjima. Mjerni rezultat čine nesigurnim.

Mjerna nesigurnost

Mjerna nesigurnost računa se primjenom statističkih metoda, a može se definirati kao procjena širine raspona oko izmjerene vrijednosti u kojem očekujemo da se s nekom vjerojatnošću nalazi prava vrijednost mjerene veličine. Ona brojčano iskazuje kakvoću mjernog rezultata.

Mjerna se nesigurnost označava oznakom u i iskazuje se jedinicom mjerene veličine.



Što je mjerna nesigurnost manja, mjerni je rezultat veće kakvoće.

Da bi se smanjio utjecaj sustavnih i slučajnih pogrešaka na mjerne rezultate, na istom se uzorku pod jednakim uvjetima provodi više uzastopnih istovrsnih mjerenja i određuje se aritmetička sredina. Naprimjer, mjerenje se može ponavljati ili s više različitih instrumenata u potpuno istim električkim uvjetima ili istim instrumentom na različitim naponima na istom mjernom objektu. Rezultate svih mjerenja zbrojimo i podijelimo brojem mjerenja da bismo dobili **aritmetičku sredinu** kao konačnu

vrijednost mjerenja:
$$X_{mj} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n}, \quad (3)$$

1.6. Etaloni električnih veličina

Etaloni su uzorci jedinice neke osnovne ili izvedene mjerne jedinice, prema kojima se izrađuju, umjeravaju i ovjeravaju instrumenti za praktičnu i znanstvenu primjenu.

Potrebni su za umjeravanje laboratorijskih instrumenata, te za provođenje točnih laboratorijskih mjerenja. S obzirom na fizikalnu veličinu koju predstavljaju, dijele se na:

- etalone napona
- etalone otpora
- etalone induktiviteta
- etalone kapaciteta.

Etaloni mogu biti primarni i sekundarni. Primarni etaloni su složeni za rukovanje i izrađuju se s velikom točnošću, a služe za umjeravanje sekundarnih etalona. Sekundarni etaloni imaju primjenu u znanstvenim i tvorničkim laboratorijima.

1.6.1. Etaloni napona

Etalon napona ne izrađuje se u skladu s definicijom jedinice volt. Već smo prije spomenuli da je volt električni napon između dviju točaka homogenog žičanog vodiča u kojem je stalna električna struja od jednog ampera, a utrošena snaga između tih dviju točaka iznosi jedan vat. Kako je vrlo teško precizno izmjeriti amper i vat, mjerenja etalona volta provode se u dobro opremljenim nacionalnim laboratorijima.

Kao sekundarni etalon primjenjuje se kemijski izvor vrlo stabilnog napona, **Westonov element**. Njegov napon iznosi 1,01865 V pri temperaturi od 20 °C. Njegov je nedostatak da mu je najveća dozvoljena kratkotrajna struja opterećenja 0,1 μ A.

Ranije se primjenjivao **Daniellov element**, koji je naponski stabilan na 16 °C samo dok je nov, i čija elektromotorna sila iznosi 1,072 V.

Westonov element danas se rjeđe upotrebljava, a zamijenjen je elektroničkim etalomom sa Zenerovom diodom, kod kojih je izlazni napon do 10 V.

Zenerova dioda je poluvodička dioda koja se primjenjuje kao stabilizator napona visoke kakvoće. Njezino je svojstvo da na svojim priključnicama u zapornom smjeru zadržava stalnu vrijednost napona, U_z . Izrađuje se od silicija za izlazne napone od 1 V do 100 V, a i više napone, i za snage od 100 mW pa do 10 W i više. Stabilnost napona vrlo je malo ovisna o temperaturi, pa su to svojstvo i dobro podnošenje preopterećenja glavne prednosti elektroničkog etalona u odnosu na Westonov element. Stabilnost izlaznog napona iznosi od 0,1 % do 0,2 % izlaznog napona, a može se povećati i do 0,004 % povezivanjem Zenerovih dioda u kaskadu. Kod najboljih etalona izlazni napon se tijekom jedne godine ne promijeni za više od 30 μ V.

1.6.2. Etaloni otpora

Već smo spomenuli da je om jedinica otpora. On predstavlja električni otpor vodiča koji ne sadrži nikakvu elektromotornu silu, a u kojem stalna razlika potencijala od jednog volta dovedena na njegove krajeve, prouzroči struju od jednog ampera.

Za vrlo točna laboratorijska mjerenja upotrebljavaju se etalonski otpornici. Obično se izrađuju u dekadski stupnjevanim iznosima između 1 m Ω i 1 M Ω . Etaloni čiji je otpor manji od 0,1 Ω izrađuju se od manganinskog lima, a ostali od manganinske žice. Manganin je legura koja sadrži bakar, mangan i nikal, u omjeru 86 : 12 : 2. Taj materijal ima vrlo mali temperaturni koeficijent otpora koji iznosi $1 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

Način namatanja žice odabire se tako da se izbjegne samoinduktivitet i kapacitet etalona. Kraće se žice namataju bifilarno pa bliske struje suprotnih smjerova poništavaju jedna drugoj magnetno polje.

Žica se u otpornicima do 100 Ω namata bifilarno, dok se za veće vrijednosti otpora (za dulje žice u namotu) upotrebljava Chaperonov namot. Pri tome se postižu vremenske konstante od otprilike +10 ns kod 1 Ω , do -180 ns kod 10 k Ω .

Za etalone malih otpora primjenjuju se vodljive trake, a za veće otpore žice različitih presjeka.

Etalon otpora sadrži dva para priključaka. Jedan par priključaka služi za dovod i odvod struje, a drugi par za mjerenje napona.

Granice pogrešaka nekih etalonskih otpornika iznose $\pm 0,01 \%$, a nekih izvedbi čak $\pm 0,001 \%$. Relativne godišnje promjene otpora etalonskih otpornika koji se čuvaju u metrološkim ustanovama ne prelaze, npr., $1 \cdot 10^{-6} \%$.

S obzirom na točnost razlikujemo slijedeće razine etalona:

- **međunarodni etalon** – etalon priznat međunarodnim dogovorom da bi služio kao međunarodna osnova za dodjeljivanje vrijednosti drugim etalonima iste veličine
- **primarni etalon** – etalon koji je određen ili za koji je priznato da ima najveću mjeriteljsku kakvoću i čija se vrijednost potvrđuje bez upućivanja na druge etalone iste veličine
- **državni ili nacionalni etalon** – etalon priznat odlukom države kao osnova za dodjeljivanje vrijednosti drugim etalonima određene veličine u toj državi
- **sekundarni etalon** – etalon kojemu je vrijednost dodjeljena usporedbom s primarnim etalom iste veličine
- **referencijski etalon** – etalon najviše mjeriteljske kakvoće na danom mjestu ili danoj organizaciji, iz kojeg se izvode mjerenja koja se tamo provode
- **radni etalon** – etalon koji se redovito upotrebljava za umjeravanje mjerila i mjera

1.6.3. Etaloni induktiviteta

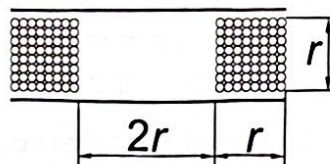
Etaloni induktiviteta mogu biti izvedeni kao **etaloni samoinduktiviteta** ili **etaloni međuinduktiviteta** za primjenu u izmjeničnim i balističkim mjerenjima.

Prema načinu izvedbe mogu biti **računski** i **uporabni**.

Etaloni samoinduktiviteta izvode se s pomoću tanke izolirane žice namotane različitim tehnikama na porculansko ili mramorno tijelo, da se izbjegne pojava kapaciteta. Tanki vodiči primjenjuju se zato da se izbjegne pojava potiskivanja struje na površinu vodiča (površinski efekt), a mramor i porculan jer su potpuni izolatori. Izrađuje se samo za niže frekvencije, reda veličine miliherca.

Računski etaloni samoinduktiviteta imaju primjenu u posebnim mjeriteljskim ustanovama, jer zbog svojih velikih dimenzija nisu prikladni za svakodnevnu uporabu u laboratorijima. To su mjerni svitci čiji se samoinduktivitet određuje računski na osnovu broja zavoja i vrlo precizno izmjerenih dimenzija. Jednostavnog su oblika, koji omogućuje precizno mjerenje onih dimenzija koje ulaze u proračun induktiviteta. To je najčešće jednoslojni cilindrični svitak namotan na tijelo od kvarca, mramora, steatita itd... Ti se materijali odlikuju velikom vremenskom postojanošću i malim temperaturnim koeficijentom istezanja.

Vrijednost uporabnih etalona samoinduktiviteta nije moguće točno odrediti računski, već se određuje na osnovu usporedbe s računskim etalonima. To su najčešće višeslojni okrugli svitci kvadratična presjeka, stranica jednakih unutarnjem polumjeru svitka, kako je prikazano na slici 1.1.



Slika 1.1. Uporabni etalon samoinduktiviteta – tako odabranim dimenzijama postiže se najveća vremenska konstanta L/R uz zadanu količinu bakra.

Na keramičko tijelo svitka namotana je žica ispletana od mnogo izoliranih niti. Gotov namot impregniran je parafinom pod vakuumom. Na njegovom vanjskom rubu svitka, gdje je najslabije magnetsko polje, nalaze se stezaljke. Kako bi se otklonili gubitci zbog vrtložnih struja, one moraju biti što manjih dimenzija, pa se izvode čak i od otpornih materijala. Takvi se etaloni izrađuju u dekadskim stupnjevima od 0,1 mH do 1 H. Ovisno o dimenzijama, njihova vremenska konstanta iznosi od 0,5 ms do 10 ms, rezonantna frekvencija od 20 kHz do nekoliko MHz, te godišnja vremenska stabilnost od 0,001 % do 0,005 %.

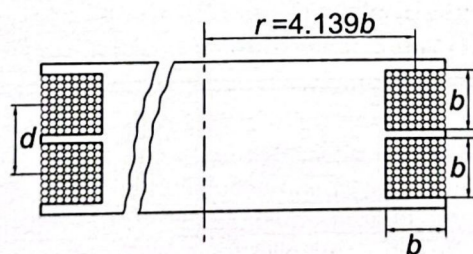
Kako bi se postigle veće vremenske konstante i veći iznosi induktiviteta, upotrebljavaju se jezgre od feromagnetnih materijala. Utjecaj nelinearnosti krivulje magnetiziranja na iznos induktiviteta smanjuje se odgovarajućim zračnim rasporedom. Takvim se izvedbama postižu granice pogrešaka od 0,5 % do 2 %, vremenske konstante preko 20 ms i temperaturni koeficijent oko $2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

Računski etaloni međui nduktiviteta izvode se tako da se one dimenzije koje utječu na međui nduktivitet mogu što preciznije izmjeriti, kako bi se uz njihovu pomoć mogao računski odrediti međui nduktivitet.

Poznata je izvedba računskog etalona međui nduktiviteta po Campbellu. Na tijelo od kvarca promjera 290 mm namotan je primarni namot koji se sastoji od dvaju jednoslojnih jednakih dijelova koji sadrže po 100 zavoja neizolirane bakrene žice promjera 0,6 mm, a s korakom zavoja 1 mm. Sekundarni je namot višeslojno namotan s 495 zavoja žice promjera 0,5 mm. Presjek tog namota iznosi 150 mm^2 , a srednji promjer 508 mm. Takvim se rasporedom smanjuje utjecaj pogreške prilikom proračuna srednjeg promjera sekundarnog namota, jer se on nalazi na mjestu gdje je jakost magnetskog polja vrlo malena.

Na točnost određivanja međui nduktiviteta bitno utječu dimenzije primarnog namota, no one se zbog njegove jednoslojne izvedbe mogu vrlo točno izmjeriti. Relativna nesigurnost u određivanju međui nduktiviteta iznosi oko $2 \cdot 10^{-6}$.

Uporabni etaloni međui nduktiviteta su istog oblika kao i etaloni samoinduktiviteta. Obično se izrađuju tako da se žice primarnog i sekundarnog svitka namataju zajedno, te su po čitavoj dužini svitka položene jedna pored druge. Zbog toga je međui nduktivitet posve jednak samoinduktivitetu primarnog, odnosno sekundarnog svitka. Ovim se načinom namatanja dobiva veliki kapacitet između primarnog i sekundarnog namota, pa se ovakvi etaloni mogu upotrijebiti samo na niskim frekvencijama ili pri balističkim mjerenjima. Njihov međui nduktivitet obično iznosi 0,01 H. Etaloni međui nduktiviteta mogu se primijeniti do frekvencija koje ne prelaze 2 kHz.



Slika 1.2. Uporaba etalona međui nduktiviteta

1.6.4. Etaloni kapaciteta

Etaloni kapaciteta izrađuju se kao nepromjenjivi kondenzatori u obliku valjka. Da se izbjegne utjecaj kapaciteta okolnih tijela, zatvaraju se u metalne kutije. Kao dielektrik primjenjuje se zrak. Vrijednosti kapaciteta tih etalona su reda mikrofaraada.

1.7. Laboratorijski elementi i oprema

U svim područjima gospodarstva, od nastanka ideje nekog proizvoda, razvoja prototipa, pa do njegove konačne izrade, proizvodnje i kontrole kakvoće, potrebno je provoditi raznovrsna mjerenja.

Mjerenja se obično izvode u prostoru koji se zove **ispitivalište** ili **mjerilište** (laboratorij).

Primjer 1.

Uzmimo za primjer jedan proizvod – neka to bude voćni sirup bez aditiva. U proizvodnom procesu neka mjerenja podliježu tehničkom mjeriteljstvu, a neka zakonskom.

Tehničko se mjeriteljstvo u ovom slučaju bavi mjerenjima količina različitih sirovina tijekom procesa proizvodnje koje ne utječu na okoliš i zdravlje ljudi (šećer, količina voća, itd).

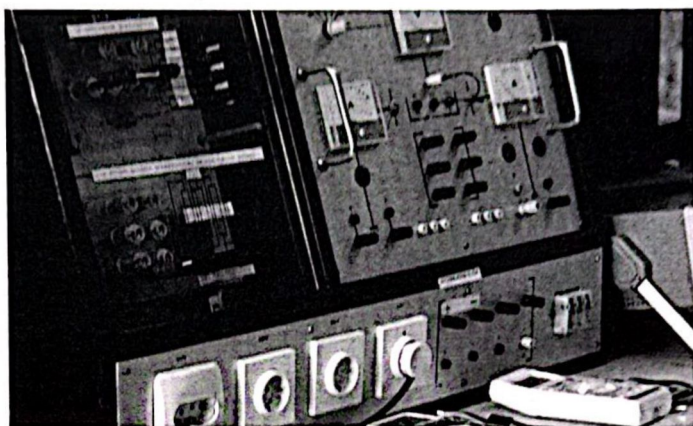
Što je sustav kontrole kakvoće razvijeniji, više je kontrolnih mjerenja u međufazama proizvodnog procesa. Okus i kakvoća proizvoda, a time i uspjeh na tržištu ovisi o tumačenju mjernih rezultata prikupljenih u proizvodnom procesu. Kakvoća mjernog rezultata ovisna je i o mjernom instrumentu. U razvijenim sustavima instrumenti se redovito umjeravaju, premda ta obveza nije propisana zakonom. Umjeravanje se provodi tvorničkim ili vanjskim etalonima koji imaju točno poznatu sljedivost prema točnijem instrumentu kojim je provedeno njihovo umjeravanje.

U ovom slučaju zakon propisuje jedino umjeravanje instrumenta kojim se određuje obujam (npr. 1 l koja se nalazi kao natpisni podatak na proizvodu i predstavlja jedinicu o kojoj izravno ovisi cijena. Dakle, zakonskom mjeriteljstvu podliježe onaj segment proizvodnog procesa gdje je potrebno izravno zaštititi potrošača. Ako će taj sok biti kiseo ili gorak, potrošači ga jednostavno neće kupovati i propast će na tržištu. No, on mora imati obujam naveden na ambalaži. Naravno, ako proizvod sadrži razne aditive, instrumenti kojima se određuje njihova količina također podliježu zakonskom mjeriteljstvu, kao i svi mjerni instrumenti kojima se prati proizvodni proces u proizvodnji lijekova ili nekih drugih kemikalija koje mogu utjecati na zdravlje ljudi i okoliš.

U tvornicama električnih proizvoda to su obično mjesta susreta znanosti i problema iz prakse. Ovisno o vrsti mjerenja koja se tamo obavljaju, svaki je laboratorij opremljen različitom opremom. Postoje specijalizirani laboratoriji za visokonaponska ispitivanja, za elektroniku i sl.

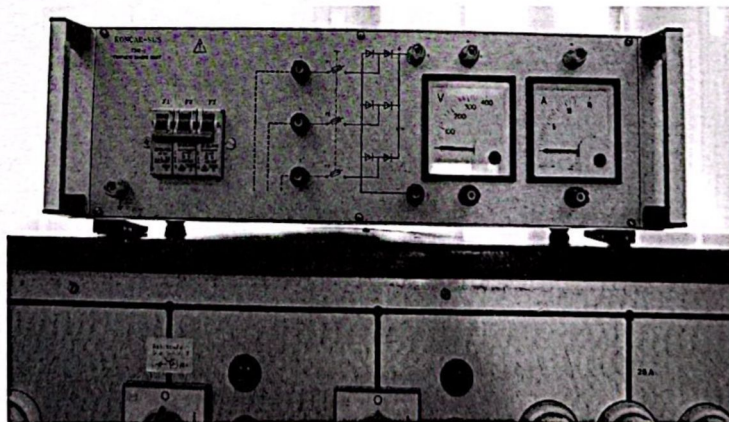
Ispitivači u **laboratoriju** u kojem se obavljaju niskonaponska i opća električna mjerenja obično se služe različitom mjernom opremom:

- ispitnim pultovima sa zakretnim transformatorima i priključnicama za istosmjerna i izmjenična napajanja, te indikatorima električnih veličina. Na slici 1.3 prikazan je ispitni pult kakav se primjenjuje u školskom laboratoriju



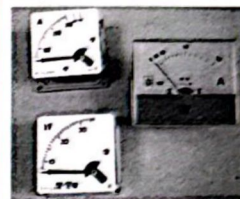
Slika 1.3. Ispitni pult

- različitim laboratorijskim izvorima napajanja na slici 1.4 prikazan je istosmjerni laboratorijski izvor napajanja, poluvodički ispravljač, koji se često primjenjuje kao izvor napajanja poluvodičkih komponenata;



Slika 1.4. Laboratorijski izvor napajanja – poluvodički ispravljač

Indikatori električnih veličina su mjerni instrumenti niske preciznosti, koji mjeritelju služe samo kao indikatori. Ugrađuju se u ispitne pultove kako bi ukazali na prisutnost neke električne veličine, te zbog mogućnosti orijentacije mjeritelja o redu veličine struje ili napona napajanja. Na slici 1.7 prikazani su različiti indikatori struje i napona.



Slika 1.7. Indikatori struje i napona

Manje zahtjevana, jednostavna mjerenja mogu se izvoditi u radionicama i servisima. Pritom radionica ili servis moraju biti opremljeni specijaliziranim instrumentima i mjernom opremom iz područja kojim se bave, a serviseri osposobljeni za provedbu mjerenja, obradu i tumačenje mjernih rezultata.

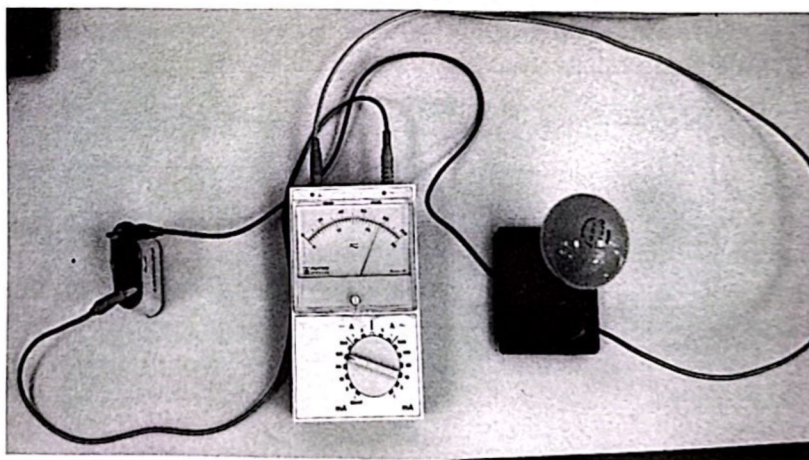
- mjernim priborom (spojni vodiči, sklopke, prekidači, ispitne stezaljke, paralelni otpornici (shuntovi), mjerni transformatori, mjerni otpornici, kondenzatori, svitci, klizni otpornici, otporničke dekade, kapacitivne dekade, razna trošila i dr.)
- sredstvima za provođenje mjerenja (mjere i mjerni pretvarači, mjerni instrumenti)

Na slici 1.5 prikazani su analogni i digitalni mjerni instrumenti.



Slika 1.5. Mjerni instrumenti

Najjednostavniji mjerni krug prikazan na slici 1.6 sastoji se obično od laboratorijskog izvora, mjernog instrumenta, spojnih vodiča i trošila. On može sadržati više instrumenata, mjerne pretvarače, različiti mjerni pribor i dr.



Slika 1.6. Mjerni krug

1.7.1. Mjerni instrumenti i uređaji

Mjerni instrumenti i uređaji su mjerna sredstva kojima se provodi mjerenje fizikalne veličine.

Mjerni sustav je dio instrumenta ili uređaja koji određuje njegovo načelo rada. Svaki mjerni instrument ili uređaj sadrži mjerni sustav.

Mjerni kanal je niz elemenata mjernog sustava instrumenta uz čiju se pomoć prati mjerna veličina od mjernog mjesta (senzora), do indikatora (prikaza). Svaki mjerni kanal počinje senzorom, a završava analognim ili digitalnim prikazom. Nakon senzora mjerna veličina dolazi na elemente mjernog sustava koji određuju načelo rada instrumenta.

Podjela mjernih instrumenata i uređaja.

Mjerne instrumente i uređaje može se podijeliti na više načina. Ovisno o izvedbi mjernog sustava instrumenta, instrumenti općenito mogu biti:

- mehanički
- elektromehanički
- elektronički (analogni i digitalni).

Mehanički instrumenti načelo rada temelje na fizikalnim pojavama i sadrže samo mehaničke dijelove.

Elektronički instrumenti uz mehaničke dijelove sadrže poluvodičke elemente (diode, tranzistore, integrirane sklopove i dr.).

Jednim se mjernim kanalom prati i mjeri samo jedna mjerna veličina.

S obzirom na mjerni sustav, svi se instrumenti i uređaji mogu podijeliti na četiri osnovne skupine:

1. **instrumenti s otvorenim mjernim sustavom**
2. **instrumenti sa zatvorenim mjernim sustavom**
3. **instrumenti s automatiziranim mjernim sustavom**
4. **mjerni izvori.**

1. **Otvoreni mjerni sustavi** su najjednostavniji mjerni sustavi. Glavna im je značajka da veličina koju mjeritelj očita na prikazu nema utjecaja na mjernu veličinu na ulazu u instrument.

Za mehaničke električne instrumente koristimo izraz elektromehanički, kad im se načelo rada temelji na električnim i magnetskim fizikalnim pojavama.

Dakle, mehaničke instrumente čiji mjerni sustav pokreće električna veličina nazivamo **elektromehanički instrumenti**.

Instrumente koji mjere električne veličine (struju, napon, otpor, snagu...) nazivamo **električni mjerni instrumenti**.

Električni instrumenti prema izvedbi mjernog sustava dijele se na

- elektromehaničke i
- elektroničke.

Primjer:

Mehaničku vagu kakva se primjenjuje na tržišnici, smatramo mehaničkim instrumentom. No, mehanički ampermetar, voltmetar i vatmetar su elektromehanički instrumenti.

Kod modernih, elektroničkih instrumenata nelinearne se veličine na ulazu u mjerni kanal instrumenta pretvaraju u električnu veličinu uz pomoć mjernog pretvornika.

Za razliku od analognog dvodimenzionalnog prikaza, digitalni instrument iz obrađenih brojčano prikazanih vrijednosti naknadno simulira dijagram ili kazaljku s ljestvicom na grafičkom digitalnom zaslonu. Poznati primjer za tu vrstu prikaza je simulirani analogni brojčanik sata na digitalnom grafičkom zaslonu kod nekih tipova mobilnih telefona.

To znači da kod njih nema povratne veze. Postupak mjerenja takvim instrumentom završava očitanjem vrijednosti na prikazu, koju mjeritelj nakon matematičke obrade (zaokruživanje, aritmetička sredina, proračun mjerne pogreške itd.) prikazuje kao mjerni rezultat.

Ovisno o broju mjernih kanala, mjerni instrumenti s otvorenim mjernim sustavom dijele se na

- instrumente s jednodimenzionalnim prikazom mjerne veličine i
- instrumente s dvodimenzionalnim prikazom mjerne veličine.

Instrumenti s jednodimenzionalnim prikazom mjerne veličine imaju samo jedan mjerni kanal, što znači da se njima istovremeno mjeri samo jedna fizikalna veličina (npr., masa, električni napon). Mjerni se rezultat očitava na prikazu u jednoj dimenziji, kao položaj kazaljke na ljestvici ili kao broj na digitalnom zaslonu.

Instrumenti s dvodimenzionalnim prikazom mjerne veličine imaju dva mjerna kanala, što znači da se njima istovremeno mjere dvije fizikalne veličine. Često je jedna od tih veličina vrijeme ili frekvencija. Ako je prikaz zaslon katodne cijevi ili digitalni grafički zaslon, funkcijska ovisnost mjernih veličina može se prikazati dvodimenzionalno (npr., katodni osciloskop, digitalni elektrokardiograf – medicinski uređaj za praćenje rada srca na digitalnom zaslonu)

2. Zatvoreni mjerni sustavi mjere nepoznatu fizikalnu veličinu uspoređujući je s poznatom, referentnom veličinom. Oni sadrže povratnu vezu, odnosno mjerna se veličina ispravlja ovisno o veličini na prikazu instrumenta. To su tzv. *servo sustavi*. Primjer je sustav navigacije u brodu ili avionu. I jednom i drugom prijevoznom sredstvu na početku putanje se odredi smjer od kojeg se ne smije odstupiti bez obzira na utjecajne veličine (npr., vjetar). Kormilar ili pilot samo održavaju i malo ispravljaaju zadani smjer. Drugi je primjer servo uređaj kod automobila koji daje informaciju upravljaču o uvjetima rada kotača na cesti.

3. Automatizirani mjerni sustavi su najsloženiji, najskuplji i najtočniji. Služe za brzu obradu i pohranjivanje velikog broja podataka. Osnovni dio mjernog kanala automatiziranog mjernog sustava je mikroračunalo, i o njegovim tehničkim karakteristikama i mogućnostima ovisi i broj fizikalnih mjer-

nih veličina koje takav sustav može pratiti, mjeriti, obraditi i pohraniti, te brzina tih postupaka. Automatizirani mjerni sustav može istovremeno imati više raznovrsnih analognih i digitalnih indikatora.

4. Mjerni izvori su uređaji koji na svojim priključnicama ostvaruju i nadomještaju mjerne signale različitih valnih oblika, amplituda i frekvencija. Tijekom mjerenja pomažu i nadopunjuju rad svih ostalih vrsta mjernih sustava. Njihove tehničke karakteristike i način primjene imaju veliku ulogu u kakvoći mjernog rezultata.

S obzirom na vrstu fizikalne veličine koju mjerimo, mjerni se instrumenti dijele na:

- električne mjerne instrumente i
- instrumente za mjerenje neelektričnih veličina.

Električnim mjernim instrumentima promatraju se i mjere električne fizikalne veličine: jakost električne struje, električni napon, električni otpor, električna snaga, frekvencija itd. To su ampermetri, voltmetri, ommetri, vatmetri, frekvencimetri i dr.

Instrumentima za mjerenje neelektričnih veličina promatraju se i mjere neelektrične fizikalne veličine i pojave: masa, brzina, temperatura itd. To su vage, brzinomjeri, termometri i dr.

Prema načinu prikaza mjernog rezultata izlazne veličine, mjerni se instrumenti i uređaji dijele na analogne i digitalne.

Kod instrumenata i uređaja s analognim prikazom izlazna veličina se određuje procjenom položaja kazaljke na ljestvici ili procjenom vrijednosti proučavanjem dijagrama na zaslonu katodne cijevi.

Kod instrumenata i uređaja s digitalnim prikazom izlazna se veličina očitava izravno kao broj ili se prikazuje dijagramom na grafičkom digitalnom zaslonu.

U svakodnevnim se električnim mjerenjima uz mjerne izvore još uvijek najčešće primjenjuju instrumenti s otvorenim mjernim sustavima: analogni i digitalni instrumenti s jednodimenzionalnim prikazom, te analogni instrumenti s dvodimenzionalnim prikazom, pa ćemo ih u sljedećim poglavljima detaljnije upoznati.

Električni se instrumenti mogu podijeliti na više načina, na temelju:

1) **električne veličine koju mjere**

- ampermetri
- voltmetri
- vatmetri, itd

2) **vrste struje ili napona**

- istosmjerne
- izmjenične

3) **stupnja točnosti**

- pogonske
- laboratorijske

4) **načela rada.**

1.7.2. Propisi i norme (standardi) za mjerne instrumente

Što znači da neki instrument podliježe zakonskom mjeriteljstvu?

To znači da ga se mora održavati u skladu s propisanim zakonom.

Državni zavod za normizaciju i mjeriteljstvo na temelju Zakona o mjeriteljskoj djelatnosti ("Narodne novine", br. 11/94) donio je

Naredbu

o razdobljima za ponovno umjeravanje etalona i ovjernim razdobljima za ponovno ovjeravanje mjerila.

No da bismo shvatili što znači ovjera instrumenta, potrebno je objasniti pojam **razreda točnosti**.

1.7.3. Razred točnosti instrumenta

Već smo ranije spomenuli da je glavni cilj mjerenja postići što točniji mjerni rezultat. Isto smo tako rekli da je jedan od uzroka netočnosti mjernog rezultata pojava sustavnih pogrešaka, koje uvijek imaju poznat iznos i predznak.

Sustavne pogreške redovito nastaju zbog nesavršenosti mjernog instrumenta, odnosno zbog njegovih dozvoljenih **granica pogrešaka**.

Dozvoljene granice pogrešaka instrumenta iskazuju se najčešće kao dozvoljeno postotno odstupanje izmjerene vrijednosti fizikalne veličine od njezine stvarne vrijednosti u odnosu na puni mjerni opseg.

Granice pogreške instrumenta određene su njegovim **razredom točnosti**.

Razredi točnosti zapravo predstavljaju postotak dozvoljenog odstupanja instrumenta u odnosu na mjerni opseg na kojem se provodi mjerenje. Iskazuju se samo kao brojčana vrijednost i natpisni su podatak na analognom instrumentu. Ako su na različitim mjernim opsezima analognog instrumenta dozvoljene različite granice pogrešaka, time i različiti mjerni opsezi imaju i različite razrede točnosti, za natpisni se podatak uzima najniži postignuti razred točnosti s najvećim dozvoljenim granicama pogrešaka.

Kod digitalnih instrumenata nema definiranih razreda točnosti, već se njihova točnost iskazuje u tehničkim podacima za svaki mjerni opseg zasebno.

Analogni instrumenti su podijeljeni u 8 razreda točnosti. Razredi točnosti i dozvoljene granice pogrešaka u odnosu na puni mjerni opseg prikazane su u tablici 1.1.

Razred točnosti	0,05	0,1	0,2	0,5	1	1,5	2,5	5
Dozvoljene postotne granice pogrešaka	±0,05 %	±0,1 %	±0,2 %	±0,5 %	±1 %	±1,5 %	±2,5 %	±5 %
Kategorija instrumenata	ETALONSKI LABORATORIJSKI				POGONSKI			

Tablica 1.1. Razredi točnosti i dozvoljene granice pogrešaka instrumenata

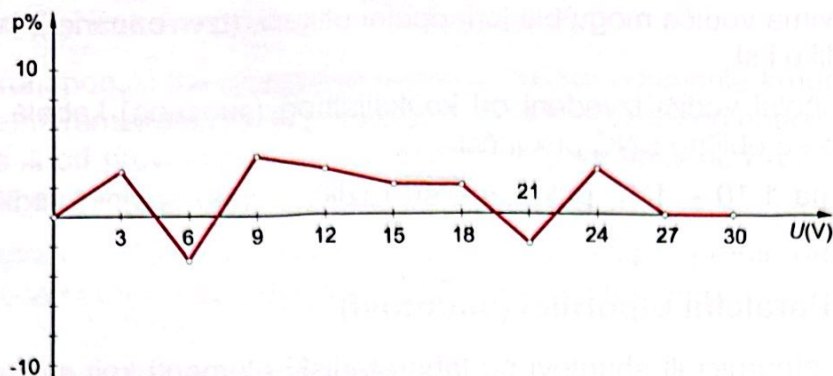
Instrumenti razreda točnosti 0,05; 0,1; 0,2 i 0,5 ubrajaju se u laboratorijske instrumente, a prva dva od njih su etalonske točnosti. Instrumenti razreda točnosti 1; 1,5; 2,5 i 5 pripadaju kategoriji pogonskih instrumenata.

Tako, npr. voltmetar razreda točnosti 0,5 na mjernom opsegu 300 V ima dozvoljene granice pogrešaka $\pm 0,5\% \cdot 300 \text{ V}$, što iznosi

$$\pm \frac{0,5}{100} \cdot 300 \text{ V} = 1,5 \text{ V}.$$

Da bi mjeritelj bio u mogućnosti kod prikaza mjernog rezultata umanjiti sustavnu pogrešku nastalu zbog nesavršenosti mjerila (odnosno zbog njegovih dozvoljenih granica pogrešaka, ispravkom ili korekcijom), najprije treba saznati koliko na pojedinom mjernom opsegu pokazivanje instrumenta odstupa od točnog.

Ako se utvrdi da su granice pogreške mjerila veće od dozvoljenih razredom točnosti, mjerilo je neispravno, te mora na popravak!



Slika 1.9. Krivulja pogreške

Kod mjerenja umjeravanim instrumentom, navedena se apsolutna pogreška sa suprotnim predznakom u pojedinom dijelu mjernog opsega pripisuje mjernom rezultatu kao ispravak, čime se umanjuje utjecaj sustavnih pogrešaka na mjerni rezultat.

Za svaki mjerni opseg mogu se nacrtati **korekcijske krivulje**, gdje je ispravak u pojedinoj točki mjernog opsega jednak pogrešci po apsolutnom iznosu, a suprotnog je znosa.

1.7.4. Mjerni pribor

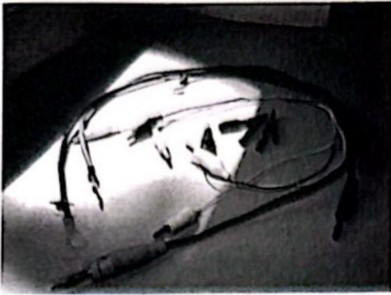
Da bi se neka fizikalna veličina mogla uspješno izmjeriti, osim laboratorijskog izvora i mjernog instrumenta, potrebno je u strujni krug priključiti i različiti mjerni pribor.

Mjernim se priborom smatraju dijelovi strujnog kruga koji služe kao pomoć pri mjerenju. Spomenut ćemo laboratorijske elemente koji se najčešće primjenjuju kao mjerni pribor u svakodnevnim mjerenjima.

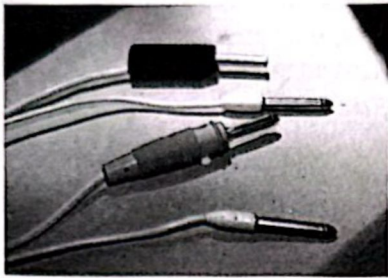
1.7.4.1. Spojni vodiči i priključci

Spojni vodiči su elementi koji služe za provođenje električne struje u mjernom krugu. Oni mogu biti različitih presjeka. Obično su izvedeni od izolirane bakrene žice (jednožične ili višežične, tzv. *licnaste*, koja je otpornija na smetnje). Izolacija je najčešće izvedena od materijala polivinil-klorida (PVC), a njezin je nedostatak da ne može trajno podnijeti temperature veće od sedamdesetak Celzijevih stupnjeva. Za mjerenja pri kojima se u okolini razvijaju više temperature primjenjuju se spojni vodiči sa silikonskom izolacijom.

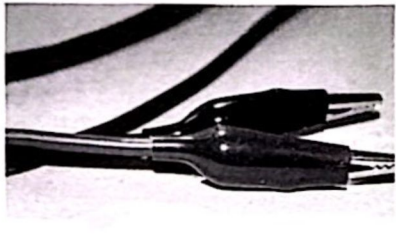
Krajevi vodiča mogu biti slobodni ili učvršćeni lemom, te prilagođeni za priključak pod vijak ako se radi o savitljivom višežičnom vodiču. Mogu na kraju imati savijenu ušicu, što se primjenjuje za priključak krutog, jednožičnog vodiča na jednopolnu priključnicu (**stezaljku**).



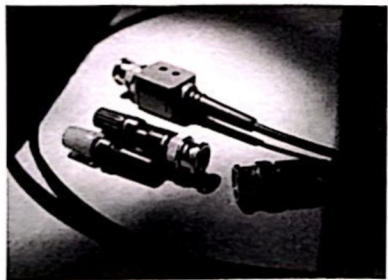
Slika 1.10. Različiti spojni vodiči i priključci



Slika 1.11. Jednopolni utikači



Slika 1.12. Ispitne hvataljke



Slika 1.13. Suosni (koaksijalni) kabeli s BNC priključcima

Na krajevima vodiča mogu biti jednopolni utikači, (tzv. 'banane'), ispitne stezaljke i sl.

Ako su spojni vodiči izvedeni od koaksijalnog (suosnog) kabla, na krajevima su obično BNC priključci.

Na slikama 1.10 – 1.13 prikazane su različite vrste spojnih vodiča i priključaka.

1.7.4.2. Paralelni otpornici (shuntovi)

Paralelni otpornici ili shuntovi su laboratorijski elementi koji služe za proširenje istosmjernog i izmjeničnog strujnog mjernog opsega. Mogu biti vanjski i ugradbeni.

Ugradbeni paralelni otpornici ili shuntovi su dio mjernog instrumenta i služe za postizanje različitih mjernih opsega.

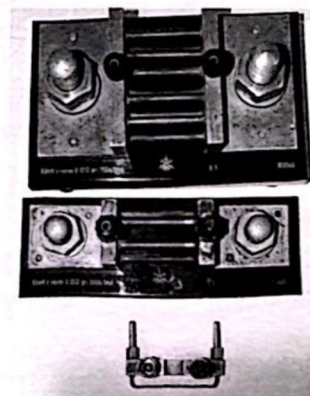
Vanjski paralelni otpornici ili shuntovi su masivni, obično su načinjeni od manganina zbog njegovog niskog termoelektričnog napona.

Izrađuju se za dva načina priključka:

- neposredno na stezaljke instrumenta (ampermetra)
- posredno, preko spojnih vodiča.

Kod mjerenja jačih struja preporučuje se priključak preko spojnih vodiča, kako bi se izbjegao utjecaj magnetskog polja na instrument. No tada kod proračuna izmjerene struje treba uzeti u obzir otpor spojnih vodiča i pad napona na njima, koji se javlja kao posljedica protjecanja struje kroz instrument.

Na slici 1.14 prikazani su vanjski paralelni otpornici ili shuntovi.



Slika 1.14. Vanjski paralelni otpornici ili shuntovi

1.7.4.3. Niskonaponski transformatori

Niskonaponski transformatori služe za fizičko odvajanje krugova i zaštitu instrumenata i elektroničkih sklopova ili od visokog napona sekundara ili od prevelike struje primara, na koji su spojeni. Prema funkciji dijele se na zaštitne i mjerne.

Zaštitni transformatori služe za zaštitu mjeritelja i opreme od visokog napona i struje, kao i za galvansko odvajanje napona.

1.7.4.4. Mjerni transformatori

Mjerni transformatori su laboratorijski elementi koji služe za proširenje strujnog i naponskog mjernog opsega i za galvansko odvajanje. Primjenjuju se najčešće u izmjeničnom mjernom području, premda postoje posebne izvedbe i za istosmjerno područje.

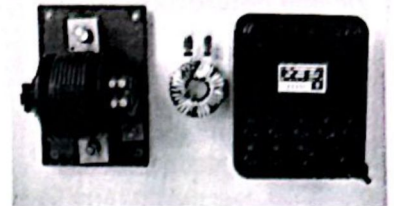
Postoje dvije osnovne izvedbe mjernih transformatora:

- strujni i
- naponski.

1.7.4.5. Mjerni otpornici, kondenzatori i svitci

Mjerni otpornici, kondenzatori i svitci su laboratorijski elementi sa širokom primjenom u električnoj mornoj tehnici. Kao predotpornici, paralelni otpornici, tj. zakretači faze ugrađuju se u gotovo sve električne mjerne instrumente i uređaje. Temeljem usporedbe s njima često se određuju nepoznati otpori, kapaciteti i induktiviteti.

O točnosti upotrijebljenih mjernih otpornika, kondenzatora ili svitaka ovisi i točnost mjerenja. Za potrebe najpreciznijih mjerenja izrađuju se čak u granicama pogrešaka od $\pm 0,001\%$. Karakteristike mjernih otpornika, kondenzatora ili svitaka moraju biti vremenski stabilne, što znači da moraju biti nepromjenjive tijekom vremena. Nadalje, moraju biti što manje podložni utjecaju temperature okoline, vlage, vanjskih električnih i magnetskih polja itd. Od mjernih se otpornika zahtijeva da njihov vlastit induktivitet, vlastit kapacitet i kapacitet prema Zemlji budu što manji, tj. da predstavljaju što 'čišće' aktivne otpore. Time se znatno pojednostavljuje mjerenje, a pogotovo proračun mjerne veličine. Slično se od mjernih kondenzatora i svitaka zahtijeva da predstavljaju što 'čišći' kapacitet, odnosno induktivitet.



Slika 1.15. Mjerni transformatori

**Legure za izradu namota
žičanih otpornika**

- Vrlo dobra svojstva ima manganin, legura bakra i mangana s malim dodatkom nikla, koji je vrlo rano uveden u upotrebu. Njegov otpor iznosi $0,43 \Omega \text{mm}^2/\text{m}$, a temperaturni koeficijent otpora $1 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1}$.
- Svojstva vrlo slična manganinu imaju legure poznate pod nazivom izabelin, novo-konstantan, te legure zlata i kroma, pa se i one upotrebljavaju za izradu najpreciznijih otpornika.
- Često se primjenjuju i razne legure nikla i kroma koje imaju specifični otpor otprilike tri puta veći od manganina (oko $1,3 \Omega \text{mm}^2/\text{m}$), a time i znatno veću mehaničku čvrstoću. Dok najtanje manganinske žice imaju promjer $0,02 \text{ mm}$, iz tih legura izrađuju se žice promjera $0,012 \text{ mm}$, pa se od tih legura mogu izraditi visokoomski otpornici, znatno manjih dimenzija od manganinskih.

1.7.4.6. Mjerni otpornici

Materijali za izradu mjernih otpornika, naročito onih vrlo preciznih, moraju zadovoljavati sljedeće kriterije:

- visoki otpor
- neznatan temperaturni koeficijent otpora
- neznatan termoelektrički napon prema bakru
- konstantnost kroz desetke godina
- nepromjenjivost otpora uslijed mehaničkih naprezanja što nastaju od vibracija i udaraca.

Mjerni se otpornici izrađuju kao:

- žičani otpornici
- slojni otpornici
- otporničke dekade
- regulacijski (klizni) otpornici.

Žičani se otpornici sastoje od tijela izrađenog od različitih vrsta keramike, tvrdog papira ili tinjca, te namota od otporne legure.

O odabiru materijala od kojeg je načinjen namot otpornika ovisi otpor i mehanička čvrstoća otpornika, a o načinu namatanja i obliku tijela ovisi njegov induktivitet i kapacitet, a time i područje primjene.

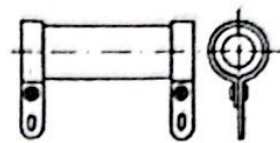
Pored žičanih otpornika upotrebljavaju se **slojni** otpornici kod kojih se na tijelo od porculana, keramike ili stakla odgovarajućim tehnološkim postupcima nanosi tanki sloj metala, metalnih oksida ili ugljika.

S pomoću slojnih otpornika ostvaruju se otpori od 1Ω do $100 \text{ M}\Omega$, pa čak i do $10 \text{ G}\Omega$, i nazivne snage od $0,025 \text{ W}$ do 100 W . Odlikuju se vrlo malom vremenskom konstantom, što omogućuje njihovu primjenu i na najvišim frekvencijama. Neke njihove izvedbe točne su poput najboljih izvedbi žičanih otpornika.

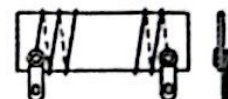
Načini namatanja žičanih otpornika

Način namatanja žice na tijelo otpornika i oblik tijela otpornika određuju njegov induktivitet i kapacitet, a time i područje primjene.

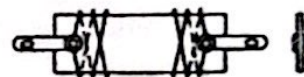
- Najveći induktivitet ima jednostavni žičani otpornik okruglog presjeka, jednostruko motan (slika 1.16).
- Induktivitet se smanjuje 10 puta uporabom plosnatog tijela otpornika (slika 1.17), a unakrsnim načinom namatanja žice približno 100 puta (slika 1.18). Složenijim se namatanjem induktivitet smanjuje otprilike 100 puta. Dvije su paralelne grane namotane u suprotnom smjeru. Kapacitet između žica u točkama preklapanja zavoja nema utjecaja, jer su na tome mjestu obje žice na istom potencijalu.
- Bifilarnim načinom namatanja (slike 1.19a i 1.19b) postiže se mali vlastiti induktivitet i veći vlastiti kapacitet otpornika. Primjenjuje se kod otpornika čiji otpor ne prelazi otprilike 100 Ω . Tim su načinom namatanja dvije žice na početku spojene, a onda zajedno namotane na tijelo okrugla ili plosnata presjeka.



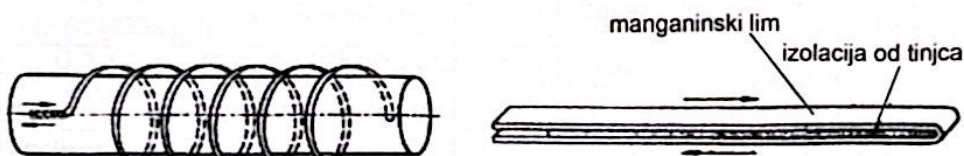
Slika 1.16. Žičani otpornik namotan na tijelo okrugla presjeka



Slika 1.17. Plosnati žičani otpornik



Slika 1.18. Plosnati žičani otpornik unakrsno motan prema Ayrton Perryu



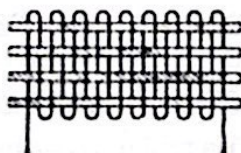
a) s otpornom žicom

b) s otpornim limom za vrlo male iznose otpora

Slika 1.19a. i 1.19b. Bifilarno motani otpornici okruglog presjeka

Tim se načinom namatanja postiže vrlo maleni induktivitet.

- Otpornici s utkanim namotom žice od otpornog materijala satkani nitima od izolacijskog materijala upotrebljavaju se pri visokonaponskim mjerenjima, što je prikazano na slici 1.20. Prikladni su za visoke napone zbog velike udaljenosti od početka do kraja otpornika, te jednolike raspodjele napona po duljini otpornika. Takvi namoti izrađuju se na strojevima sličnim onima za tkanje, te se dobivaju vrpce koje imaju i do 2 M Ω /m njihove duljine.



Slika 1.20. Utkani namot otpornika

Prema vrsti materijala od kojih su načinjeni otporni slojevi, slojni se otpornici dijele na:

- ugljene
- metalne s tankim slojem metala
- metalne s debelim slojem metala
- metalne s debelim slojem metalnih oksida.

Ugljeni se slojni otpornici izrađuju tako da se na keramičku cjevčicu nanese tanki sloj ugljika dobiven razgradnjom pogodnog ugljikovodika. Kod metalnih slojnih otpornika s tankim slojem nanosi se na keramičku cjevčicu vrlo tanak metalni sloj dobiven isparavanjem kroma, nikla ili drugih metala. Kod metalnih slojnih otpornika s 'debelim' slojem metala ili metalnih oksida, slojevi se na podlogu nanose postupkom sličnim onome kod štampanih električnih pločica.

Vrsta otpornika	Temperaturni koeficijent ppm/°C -55 do +125°C	Tolerancije ugađanja (optimalne) %	Promjena otpora kod uskladištenja (godišnja) %	Promjena otpora pod opterećenjem (2000 h) %
žičani	±3 do ±10	±0,001	±0,02	±0,04
tanki metalni sloj	±15 do ±150	±0,01	±0,1	±0,05
debeli metalni sloj	±15 do ±150	±0,05	±0,1	±0,5
metalni oksid	±50 do ±200	±0,5	±0,1	±0,5
ugljeni	-180 do -800	±1	±0,15	±0,5

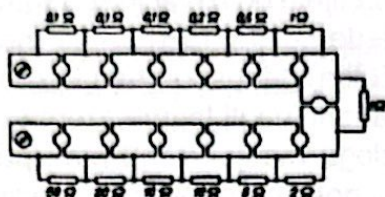
Tablica 1. Različite vrste otpornika i njihove karakteristike

Kod slojnih je otpornika potrebno voditi računa o tome da su otpornici, ovisno o vrsti i izvedbi, izvori električnog šuma. On nastaje zbog toplinskog kretanja elektrona ili zbog prolaska struje kroz nehomogeni materijal i nestabilne kontakte. On ovisi o veličini struje koja prolazi kroz otpornik, odnosno o naponu priključenom na otpornik. Izražava se u mikrovoltima po voltu i kod ugljenih slojnih otpornika, ovisno o njihovim otporima i izvedbi, iznosi od 0,1 $\mu\text{V/V}$ do više $\mu\text{V/V}$.

Kod žičanih otpornika i najboljih izvedbi metalnih slojnih otpornika električni je šum neznatan.

1.7.4.7. Otporničke dekade

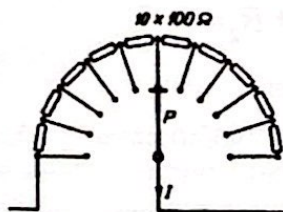
U laboratorijskim mjerenjima često se upotrebljavaju nizovi preciznih otpornika smještenih u zajedničku kutiju. Susreću se izvedbe s čepovima i s preklopkama. U izvedbi prema slici 1.21 prikazana je skupina otpornika s čepovima.



Slika 1.21. Skupina otpornika s čepovima

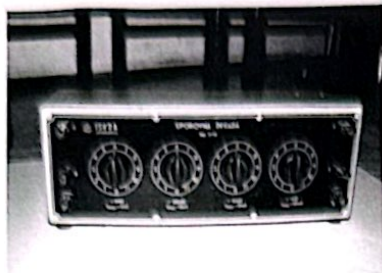
Potrebna spajanja otpornika se obavljaju s pomoću valjkastih čepova koji se utaknu u provrte između kontaktnih pločica. Uz pomoć trinaest otpornika mogu se dobiti sve vrijednosti otpora od $0,1 \Omega$ do 100Ω , u koracima po $0,1 \Omega$. Nedostatak ovog rješenja je u nezgodnom rukovanju i više kontaktnih otpora, jer je, da bi se postigao otpor od, npr., $0,1 \Omega$, potrebno utaknuti čak 12 čepova.

Nizovima otpornika čiji se otpori odnose kao 1:2:3:4 mogu se postići vrijednosti otpora od $0,1 \Omega$ do 100Ω uz pomoć samo 12 otpornika. Danas se upotrebljavaju slogovi otpornika s preklopkama koji se sastoje od jedne ili više dekada otpora. Na slici 1.22 prikazana je jedna dekada s preklopkama otpornika od 100Ω .



Slika 1.22. Otpornici s preklopkama

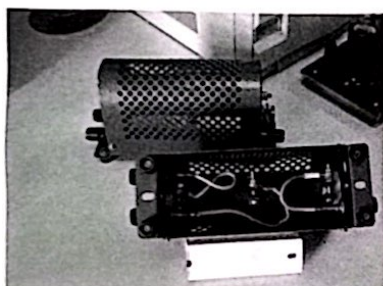
Okretanjem preklopke P slijeva nadesno uključuje se sve više otpornika, pa se tako mogu postići svi otpori od 100Ω do $1 \text{ k}\Omega$ u koracima po 100Ω . U zajedničku kutiju ugrađuje se i do šest takvih serijski spojenih dekada, a vrijednost otpornika svake sljedeće dekade deset je puta manja od prethodne. Dok se izvedbe s čepovima odlikuju vrlo malim kontaktnim otporima, izvedba s preklopkama mnogo je praktičnija pri radu. Otpor kontakta s čepom iznosi pri pažljivoj izvedbi i rukovanju otprilike samo $0,05 \text{ m}\Omega$, dok je kontaktni otpor najboljih preklopki otprilike $0,2 \text{ m}\Omega$.



Slika 1.23. Otpornička dekada s preklopkama



Slika 1.24. Različiti mjerni otpornici u školskom laboratoriju



Slika 1.25a. Laboratorijski žičani otpornici – unutrašnjost otpornika



Slika 1.25b. Laboratorijski žičani otpornik

Na slikama 1.23, 1.24, 1.25a, i 1.25b prikazani su različiti mjerni otpornici koji se primjenjuju u školskom laboratoriju.

1.7.4.8. Regulacijski otpornici

Regulacijski (promjenjivi, klizni) se otpornici sastoje od kalibrirane otporne žice namotane na tijelo od izolacijskog materijala. Po toj žici klizi klizač u vidu pera ili rjeđe koluta, tako da se može kontinuirano mijenjati otpor između početka, odnosno kraja klizne žice i klizača. Klizna žica se izrađuje od manganina ili legura kroma i nikla. Njezin promjer nije iz mehaničkih razloga manji od 0,3 mm, pa kako je još i dužina žice ograničena mogućnostima smještaja, njezin otpor iznosi najviše 10 Ω do 20 Ω. Klizni je otpornik manje precizan od otporničke dekade s preklopkama.

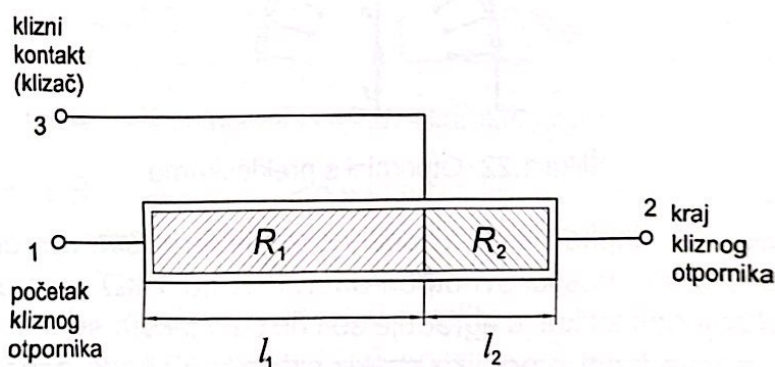
1.7.4.9. Dijelovi kliznog otpornika

Klizni otpornik je laboratorijski otpornik koji sadrži tri priključka. To su:

- početak kliznog otpornika
- kraj kliznog otpornika i
- klizni kontakt.

Klizač dijeli ukupni otpor regulacijskog otpornika R_r na dva otpora, R_1 i R_2 , kao što je prikazano na slici 1.25, pa vrijedi izraz (1):

$$R_1 + R_2 = R_r \quad (1)$$



Slika 1.26. Regulacijski otpornik

Promjenom položaja klizača na tijelu otpornika odnos otpora R_1 i R_2 se

mijenja. Omjer tih otpora razmjeran je s omjerom udaljenosti klizača od krajeva otpora, l_1 i l_2 , kao što je opisano izrazom (2).

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{l_1}{l_2} \quad (2)$$

Na slici 1.27 prikazane su različite izvedbe regulacijskih otpornika.

Kontaktni otpor na klizaču veći je i manje stalni nego kod preklopki, pa se otpornici s kliznom žicom radije upotrebljavaju u spojevima gdje kontakti otpor klizača nema učešće u mjernom rezultatu, kao, npr., u mosnim i kompenzacijskim spojevima.

1.7.4.10. Mjerni kondenzatori

Od mjernih se kondenzatora zahtijeva poznati, vremenski stalni kapacitet neovisan o temperaturi, naponu i frekvenciji. Također je poželjno da kondenzatori imaju vrlo veliki izolacijski otpor između elektroda, neznatne gubitke u dielektriku i dovodima, te neznatni vlastiti induktivitet. Fazni pomak φ između struje I i napona U nesavršenog mjernog kondenzatora nije točno $\pi/2$ radijana.

Struja kondenzatora stvara magnetsko polje ne samo oko dovoda do elektroda, već i u samom kondenzatoru, pa svaki kondenzator ima određeni mali induktivitet L koji postaje primjetan tek na visokim frekvencijama.

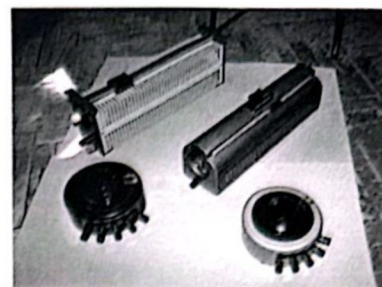
Mjerni se kondenzatori izrađuju i kao kapacitivne dekade, na kojima se vrijednost kapaciteta određuje preklopkama.

1.7.4.11. Mjerni svitci

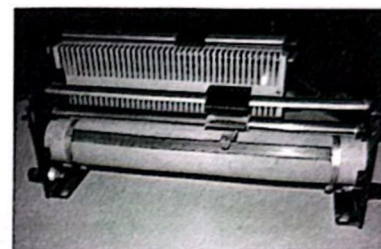
Pri istosmjernim, a pogotovo izmjeničnim mjerenjima, upotrebljavaju se za usporedbu mjerni svitci s točno poznatim vlastitim induktivitetom L , odnosno međusobnim induktivitetom M . Te veličine trebaju biti vremenski konstantne, neovisne o frekvenciji, struji, temperaturi i vanjskim magnetskim poljima, a vlastiti kapacitet svitaka treba biti zanemariv.

Otpor R svitka treba biti što manji kako bi kvocijent L/R , koji se naziva vremenskom konstantom svitka, bio što veći. To je prilično teško ostvariti. Mjerni se svitci obično izvode bez željeza da bi se izbjegle poteškoće koje unosi nepravilnost krivulje magnetiziranja i gubitci u željezu. Postizanje određenih induktiviteta L uz pomoć svitka bez željezne jezgre traži više zavoja, a time i veći otpor R , koji se onda pri mjerenju uzima u proračun.

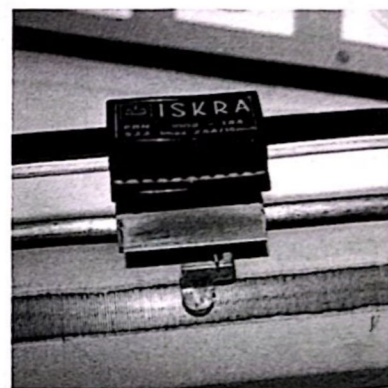
Zato otpor svitka treba biti poznat i neovisan o frekvenciji, a mjerni se



Slika 1.27. Regulacijski otpornici



Slika 1.28. Unutrašnjost regulacijskog otpornika



Slika 1.29. Klizač regulacijskog otpornika

1.8. Laboratorijski izvori napona i struje

Laboratorijski izvori su uređaji koji na svom izlazu daju signal stabilne vrijednosti koji tijekom postupka mjerenja služi za napajanje strujnog kruga, elektroničkih sklopova, za kalibriranje i umjeravanje mjernih instrumenata.

Prema valnom obliku signala kojeg daju na svom izlazu, izvori se mogu podijeliti na **istosmjerne** i **izmjenične**.

Istosmjerni laboratorijski izvori su:

- galvanski članci
- pretvarači
- ispravljači
- istosmjerni generatori
- elektronički regulacijski izvori istosmjernih struja i napona.

Izmjenični laboratorijski izvori su:

- električna mreža
- izmjenični generatori
- elektronički izvori izmjeničnih struja i napona.

1.8.1. Istosmjerni laboratorijski izvori napona i struje

1.8.1.1. Galvanski članci

Galvanski članci mogu biti **primarni** i **sekundarni**.

Primarni galvanski članci ili baterije su galvanski članci u kojima su kemijske reakcije ireverzibilne pa se oni, kad se istroše, ne mogu ponovno nabiti, jer ne sadrže tekući elektrolit. Nazivaju se '**suhi**' galvanski članci, a primjenjuju se kao izvor napajanja u prenosivim mjernim instrumentima. Unutarnji otpor tih članaka relativno je visok, te iznosi od $0,3 \Omega$ do 20Ω i raste tijekom pražnjenja, stoga napon na stezaljkama baterije opada porastom i trajanjem struje opterećenja.

Sekundarni se galvanski članci izrađuju kao akumulatorske baterije i akumulatori, sadrže tekući elektrolit, što znači da se mogu ponovo puniti. Primjenjuju se u prenosivim mjernim instrumentima i mjernim uređajima, te kao rezervni izvor napajanja. Akumulatori su zbog stalnog izlaznog napona i vrlo malog unutarnjeg otpora prikladni i za najprecizniji

Iz povijesti...



Luigi Galvani

Talijanski fizičar Luigi Galvani (1737. – 1798.) radio je kao liječnik, a zatim kao profesor anatomije u Bologni. Bio je zapažen kirurg. Godine 1784. proučava anatomiju vodozemaca i primjećuje da se mišići na žabljim krakima trzaju pri dodiru s dvije različite kovine. Vjerovao je da je uzrok toj neobičnoj pojavi slabo poznati elektricitet koji imaju živa bića. Tek dvanaest godina kasnije talijanski znanstvenik Alessandro Volta, ispravno je protumačio taj neobični fenomen i dokazao kako iz metalnih elektroda izbija elektricitet, kada se među njima nađe elektrolit. Iako nije polagao mnogo pažnje fizikalnom objašnjenju elektriciteta i njegovoj eventualnoj primjeni, Galvani je otkrio važan izvor struje koji će se nazvati galvanski članak.

Iz povijesti...**John Frederic Daniell**

Engleski kemičar (1790. – 1845.), 1836. godine proizveo je efikasniju i stabilniju bateriju koja nije bila podložna polarizaciji. Koristio je dva elektrolita, bakar(II) sulfat i cink(II)sulfat.

**Gaston Plante**

Francuski fizičar (1834. – 1889.), 1859. izumio je prvi sekundarni članak.

znija mjerenja. Serijskim spajanjem više članaka postižu se naponi do nekoliko stotina volti, a paralelnim spajanjem struje do nekoliko stotina ampera. Upotrebljavaju se olovni, čelični (željezo-nikal), srebrni (srebro-cink) te kadmijevi (nikal-kadmij) akumulatori. Za primjenu u prijenosnim uređajima izrađuju se zabrtvljene izvedbe sastavljene od članaka malih dimenzija.



Slika 1.32. Primarni i sekundarni galvanski članci

1.8.1.2. Pretvarači

Pretvarači istosmjernog napona se upotrebljavaju u prijenosnim uređajima za postizanje viših istosmjernih napona, umjesto većeg broja članaka spojenih u seriju. Kod njih se s pomoću mehaničkog ili električkog prekidača najprije prekida istosmjerni napon, te na taj način proizvodi pulsirajući napon koji se transformira na odabrani viši iznos, a zatim se prema potrebi na odgovarajući način ispravlja i izgladuje.

1.8.1.3. Poluvodički ispravljači

Poluvodički ispravljači se primjenjuju za napajanje strujnih krugova koji za svoj rad trebaju istosmjerni napon, a napajaju se iz električne mreže. Valovitost ispravljenih napona otklanja se dodavanjem odgovarajućih električnih filtera koji se sastoje od kombinacije kondenzatora i svitaka ili kondenzatora i otpornika. Tako dobivene istosmjerne napone potrebno je još i stabilizirati, jer je i ulazni napon električne mreže promjenjiv u granicama $\pm 10\%$ od nazivne vrijednosti. Stabiliziranje se provodi raznim elementima i sklopovima s nelinearnim karakteristikama, kao, npr., stabilizatorom sa Zenerovim diodama.

1.8.1.4. Istosmjerni generatori

Istosmjerni generatori koriste se za dobivanje istosmjernih napona napajanja pri ispitivanjima i mjerenjima gdje su potrebne veće snage. Pri tom za pogon generatora služi asinkroni ili sinkroni motor priključen na električnu mrežu.

1.8.1.5. Elektronički regulacijski izvori istosmjernih struja i napona

Elektronički se **istosmjerni izvori** izvode najčešće kao elektronički regulacijski naponski ili strujni izvori, te kao kalibratori.

Elektronički se **regulacijski izvori** primjenjuju za postizanje istosmjernih napona ili struja koje se primjenjuju za napajanje različitih mjernih krugova ili elektroničkih sklopova.

Kalibratori istosmjernih napona i struja su izvori vrlo točnog poznatog napona koji služe za precizna mjerenja te umjeravanje i kalibriranje (ugađanje) instrumenta i uređaja.



Slika 1.33. istosmjerni elektronički izvor napona i struje

Moguće je postići napon, čija je dugotrajna stabilnost bolja od $\pm 0,01\%$. Takvi izvori se upotrebljavaju pri najpreciznijim mjerenjima. Izrađuju se kao naponski ili strujni izvori raznih izlaznih snaga, rijetko iznad 500 W, za napone od nekoliko volta i do nekoliko kilovolti, te za struje od nekoliko miliampera do više desetaka ampera. Često se iznos njihovog napona ili struje može fino namještati preklopkama ili tipkama. Struje opterećenja do nazivnog iznosa i promjene mrežnog napona neznatno utječu na izlazni napon.

Važno!

Baterije se nakon uporabe ne mogu ponovo nabiti, pa se bacaju. No one sadrže otrovne tvari kao što su živa, olovo, kadmij, pa su opasne za okoliš. Osim toga, sadrže skupe tvari koje se mogu reciklirati (npr. srebro), pa je ekološki i gospodarski opravdano stavljati ih u posebne spremnike, te ih i stručno uništiti ili iskoristiti. Dotrajale akumulatore, koji izgube svoja svojstva iz istih se razloga treba odlagati u za to predviđene kontejnere u reciklažnim dvorištima.

Iz povijesti...



Georges Leclanche

Francuski kemičar (1839. – 1882.), napravio je 1866. bateriju koja je sprječavala polarizaciju. Koristio je ugljik i cink za pozitivne i negativne elektrode, a otopinu amonijevog klorida kao elektrolit. Baterija je imala napon od 1,5 V i otpor od nekoliko oma. Primjenjivala se u telegrafiji i kod kućnih zvona.

IZVOD IZ PRAVILNIKA O NORMIRANIM NAPONIMA ZA DISTRIBUCIJSKE NISKONAPONSKE ELEKTRIČNE MREŽE I ELEKTRIČNU OPREMU:

Normirane su veličine nazivnog napona mreža:

- 230 V između faznog i neutralnog vodiča
- 400 V između faznih vodiča, za četverožilne trofazne mreže
- nazivna frekvencija 50 Hz.

U normalnim uvjetima mreže preporučuje se da se opskrbeni napon na opskrbnim stezaljkama ne treba razlikovati od nazivnog napona više od $\pm 10\%$.

Nazivni naponi postojećih mreža 220/380 V moraju se razvijati prema novim normiranim veličinama nazivnih napona 230/400 V.

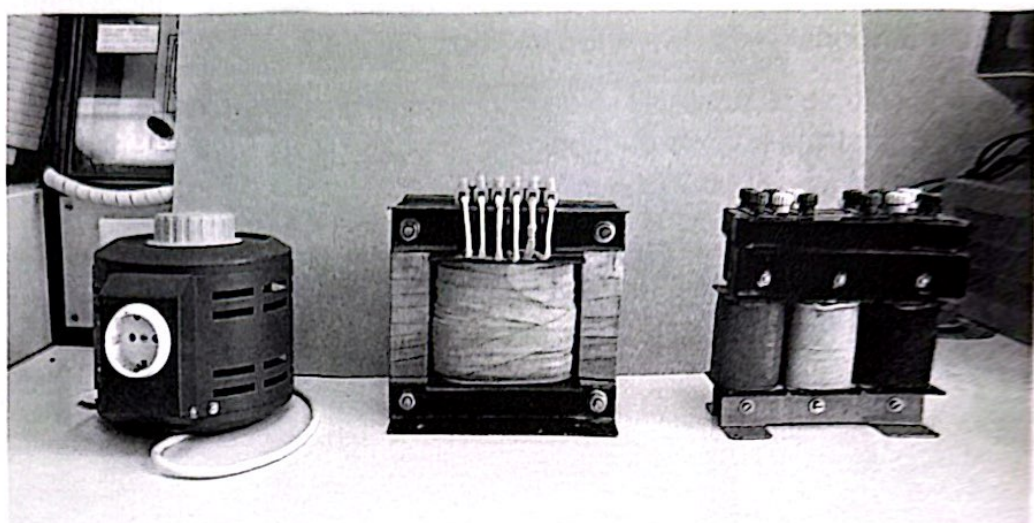
Prijelazno razdoblje za razvitak mreža treba biti što je moguće kraće, a najdulje može trajati 10 godina od dana stupanja Pravilnika na snagu.

Za vrijeme prijelaznog razdoblja isporučitelji električne energije trebaju u prvom koraku dovesti opskrbni napon postojećih mreža 220/380 V unutar područja 230/400 V $+6\%$, -10% .

1.8.2. Izmjenični laboratorijski izvori

1.8.2.1. Električna mreža

Električna mreža ima nazivni mrežni napon 230 V između faznog i neutralnog vodiča, nazivni linijski napon 400 V (napon između faznih vodiča, za četverožilne trofazne mreže) te nazivnu frekvenciju 50 Hz. Instrumenti se napajaju izravno iz mreže, a mjerni krugovi izravno ili preko zakretnih transformatora i kliznih otpornika.



Slika 1.34. Transformatori

1.8.2.2. Izmjenični generatori

Generatori izmjeničnih struja upotrebljavaju se do frekvencija od nekoliko tisuća Hz, pri mjerenjima gdje je potrebna snaga veća do otprilike 1 kVA.

1.8.2.3. Elektronički izvori izmjeničnih napona i struja

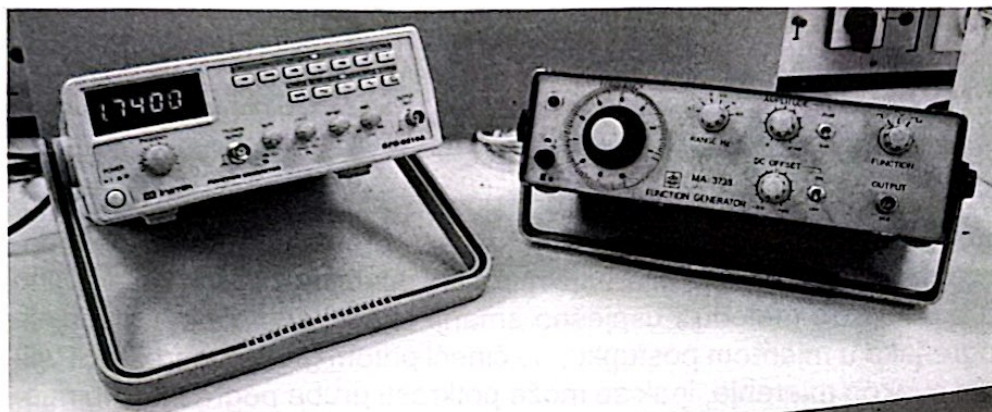
Elektronički izvori izmjeničnih napona i struja imaju različite namjene.

Najčešće se primjenjuju:

- generatori funkcija
- kalibratori izmjeničnih napona
- sinusni oscilatori

- sintetizatori frekvencije
- generatori impulsa
- signalni generatori
- etaloni frekvencije i vremena.

Generatori funkcija su izvori signala različitih valnih oblika koji se primjenjuju za različita mjerenja i ispitivanja elektroničkih uređaja i opreme. Na izlazu generatora dobijemo sinusni, trokutasti ili pravokutni valni oblik signala u frekvencijskom opsegu od 0,05 mHz do više od 10 MHz, no pojedine izvedbe obično ostvaruju samo jedan dio toga frekvencijskog područja (od 3 do 10 frekvencijskih dekada), npr., od 0,1 Hz do 100 kHz ili ovisno o izvedbi. Amplituda se isto tako može ugađati tipično do 10 V. Izlazni valni oblik signala odabire se preklopom. Frekvencija se podešava na dekadnu frekventnog područja unutar koje se bira frekvencija s pomoću dugmeta na linearnoj ljestvici (skali).



Slika 1.35. Digitalni i analogni generator funkcija

Kalibratori izmjeničnih napona su oscilatori koji na izlazu daju napon točno poznatog iznosa, te služe za umjeravanje preciznih instrumenata. Visoke su točnosti namještanja ($\pm 0,02\%$) u frekvencijskom području od 50 Hz do 20 kHz, u rasponu efektivnih vrijednosti napona od nekoliko milivolta do približno 1 kV.

Sinusni oscilatori služe za generiranje sinusnih napona frekvencije od nekoliko herca do nekoliko desetina gigaherca. Pojedini oscilatori pokrivaju samo jedan dio tog frekvencijskog područja, tako da je omjer između njihove najviše i najniže frekvencije od 10^3 pa do 10^8 . Najčešće se primjenjuju RC-oscilatori, pa se ugađanja frekvencije postižu promjenom otpora ili kapaciteta u njihovom rezonantnom krugu s pomoću preklopke ili tipki u dekadskim skokovima, a zatim unutar jedne dekade kontinuirano.

Prijelazno razdoblje za provođenje prvoga koraka treba biti što je moguće kraće, a smije trajati najdulje 6 godina od dana stupanja Pravilnika na snagu.

Na kraju ovog prijelaznog razdoblja moraju se postići tolerancije opskrbnog napona $230/400\text{ V} \pm 10\%$.

Pravilnikom se određuje da električna oprema domaće proizvodnje i uvozna mora biti označena normiranim nazivnim naponima 230 V ili 400 V, odnosno opsegom napona dimenzioniranja koji obuhvaća navedene veličine, što je prije moguće, a najdulje u roku jedne godine od dana stupanja Pravilnika na snagu.

Cijeli je Pravilnik objavljen u NN RH br. 28, od 10. ožujka 2000.g. www.nn.hr na temelju odluke Ministarstva gospodarstva.

Zanimljivo...

U primarnom etalonu frekvencije, frekvencija kvarcnog oscilatora kontrolira se pomoću cezijeva rezonatora. Frekvencija serijski izrađenih celzijevih rezonatora iznosi $9\,192\,631\,770\text{ Hz}$ i ostaje nepromijenjena za vrijeme života rezonatora.

Sintetizatori frekvencije su izvori frekvencije ili generatori signala koji iz jednog ili više izlaza daju velik broj stabilnih izlaznih frekvencija, mogućnošću njihovog točnog namještanja.

Generatori impulsa proizvode naponske impulse različitih iznosa, predznaka i trajanja, koji se mogu ponavljati frekvencijom od $0,1\text{ Hz}$, pa do preko 200 MHz . Trajanje impulsa može se ugađati širokim granicama, naprimjer, od 2 ns do nekoliko sekundi. U nekim se izvedbama može mijenjati vrijeme porasta, odnosno pada napona. Generatori impulsa služe za ispitivanja impulsnih i digitalnih sklopova.

Signal generatori su sinusni oscilatori s mogućnošću amplitudne, frekvencijske, fazne i impulsne modulacije. Obično pokrivaju jedan dio frekvencijskog područja od 10 kHz do 40 GHz .

Etaloni frekvencije i vremena su oscilatori točno poznate i vremenski stalne frekvencije. Upotrebljavaju se kvarcni oscilatori, kojima je u rezonantnom krugu kristal kvarca.

1.9. Mjerne metode i postupci

Veliki utjecaj na uspješnost mjernog postupka ima stručnost i savjestan rad mjeritelja. Da bi mjerenje bilo uspješno provedeno, mjeritelj odnosno osoba koja provodi mjerenje mora biti dovoljno stručna da pravilno odredi mjernu metodu i uspješno smanji utjecaj sustavnih i slučajnih pogrešaka u mjernom postupku, ne čineći pritom grube pogreške. Pri svakom mjerenju, ipak se može potkrasti gruba pogreška. No mjeritelj treba biti temeljit i sposoban otkriti je na vrijeme i ponoviti mjerenje na ispravan način.

Ponekad se gruba pogreška počinjena tijekom mjerenja otkrije tek prilikom obrade mjernih rezultata, npr., ako neki rezultati značajno odstupaju od vrijednosti dobivenih proračunom.

Mjerenja se obavljaju na dva načina:

- izravno (neposredno, direktno) i
- neizravno (posredno, indirektno).

Izravno se mjeri uz pomoć mjernog instrumenta, tako da se na prikazu očita mjerni rezultat. Neizravno se mjeri primjenom mjerne metode, gdje se instrumenti primjenjuju za očitavanje nekih fizikalnih veličina koje služe za proračun mjerne veličine koju smo željeli saznati.

Mjerni instrumenti nisu savršeni, nego utječu na mjerni rezultat. Zato mjeritelj ima ozbiljan zadatak, odabrati pravi način mjerenja kako bi se što točnije odredila mjerna veličina. Osim toga, on treba u skladu s mogućnostima odabrati najpogodnije instrumente i pravilno odrediti mjerne opsege.

Kod odabira neizravnih mjernih metoda potrebno je posebno voditi računa o razredu točnosti instrumenata kojima se provodi mjerenje, kako se ne bi uvećavala sustavna pogreška.

Često se postigne točniji mjerni rezultat izravnim mjerenjem fizikalne veličine jednim instrumentom nižeg, pogonskog razreda točnosti, nego neizravnom metodom uz uporabu nekoliko instrumenata viših razreda točnosti.

2. Analogni mjerni instrumenti s jednodimenzionalnim prikazom

2.1. Osnovna načela i dijelovi analognih mjernih instrumenata

Već smo ranije spomenuli da se mjerni instrumenti s obzirom na točnost mogu podijeliti na pogonske i laboratorijske, a među laboratorijskim se instrumentima mjerila najviše točnosti mogu smatrati etalonskim.

Instrumenti s analognim prikazom imaju ljestvicu i kazaljku. Kombinacija momenata koji djeluju na mjerni sustav instrumenta zaustavlja kazaljku na nekoj vrijednosti ljestvice koju mjeritelj očita.

2.1.1. Oznake mjernih instrumenata

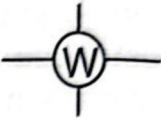
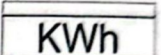
Ponovimo...

Karakteristične osobine mjernih instrumenata su:

- električna veličina koja se mjeri
- vrsta struje ili napona
- točnost
- načelo rada.

Analogni instrumenti na kućištu ili ljestvici nose oznake (simbole) koji opisuju njihove karakteristične osobine. U tablicama 2.1 – 2.6 navedene su oznake koje se najčešće primjenjuju u svakodnevnim mjerenjima.

Prva važna oznaka je **simbol instrumenta**. U tablici 2.1 prikazani su simboli instrumenata koji se primjenjuju u električnim shemama.

Mjerna veličina	Naziv instrumenta	Simbol
struja i napon	galvanometar	
struja	ampermetar	
napon	voltmetar	
snaga	vatmetar	
energija	brojilo	
otpor	omometar	

Tablica 2.1.

Druga važna oznaka pokazuje služi li instrument za mjerenje istosmjernih ili izmjeničnih veličina. Prema vrsti struje (napona) i mreže mjerni instrumenti nose dodatnu oznaku, odnosno simbol, kako je to prikazano u tablici 2.2.

Simbol	Značenje simbola
	Instrument za istosmjernu struju (napon)
	Instrument za istosmjernu i izmjeničnu struju (napon)
	Instrument za izmjeničnu struju (napon)
	Jedan mjerni sustav za trožičnu mrežu
	Dva mjerna sustava za trožičnu mrežu s nesimetričnim opterećenjem
	Tri mjerna sustava za trožičnu mrežu
	Tri mjerna sustava za trožičnu mrežu s nesimetričnim opterećenjem
	Jedan mjerni sustav za četverožičnu mrežu
	Dva mjerna sustava za četverožičnu mrežu s nesimetričnim opterećenjem
	Tri mjerna sustava za četverožičnu mrežu s nesimetričnim opterećenjem

Tablica 2.2.

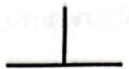
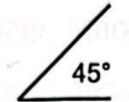
Treća karakteristična veličina mjernog instrumenta je njegova **točnost** ili kako se još naziva **razred točnosti instrumenta**. Nalazi se na prednjoj ploči instrumenta kao brojeva oznaka.

Četvrta karakteristična veličina mjernih instrumenata je **načelo rada** instrumenata. U tablici 2.3 naznačena su osnovna načela rada mjernih instrumenata u kojima su dane njihove oznake i simboli.

Simbol	Značenje oznake	Simbol	Značenje oznake
	Instrument s zakretnim (pomičnim) svitkom i permanentnim (stalnim) magnetom		Bimetalni instrument
	Instrument sa zakretnim svitkom i ispravljačem		Instrument s pomičnim magnetom
	Instrument s križnim svitcima i permanentnim magnetom (kvocijentni instrument)		Kvocijentni instrument s pomičnim magnetom
	Instrument s pomičnim željezom		Indukcijski instrument
	Instrument s pomičnim željezom i permanentnim magnetom		Kvocijentni indukcijski instrument
	Kvocijentni instrument s pomičnim željezom		Instrument s vrućom žicom
	Elektrodinamički instrument		Neizolirani termopar
	Kvocijentni elektrodinamički instrument		Izolirani termopar
	Ferodinamički instrument		Elektrostatički instrument
	Kvocijentni ferodinamički instrument		

Tablica 2.3.

Mjerni instrument prilikom mjerenja mora uvijek biti postavljen u odgovarajući položaj. Zbog toga se na instrumentu nalaze normirani simboli koji ukazuju na **pravilan položaj** koji on mora zauzeti tijekom mjerenja. U tablici 2.4 dane su oznake za karakterističan položaj instrumenata.

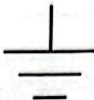
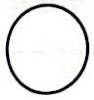
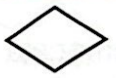
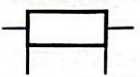
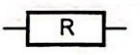
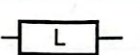
Simbol	Značenje oznake
	Instrument za horizontalni položaj
	Instrument za vertikalni položaj
	Instrument za kosi položaj (npr. 45° prema horizontali)

Tablica 2.4.

Norme definiraju za pojedine radne napone instrumenata odgovarajuće **ispitne napone** kojima treba ispitati mjerne instrumente između kućišta i mjernog sistema. U tablici 2.5 navedene su oznake dielektrične čvrstoće, a u tablici 2.6 još neke često rabljene oznake koje se odnose na instrumente i mjerni pribor.

Simbol	Značenje oznake
	Ispitni napon 2 kV
	Ispitni napon 500 V
	Nije provedeno ispitivanje dielektrične čvrstoće
	Visoki napon na instrumentu

Tablica 2.5.

Simbol	Značenje oznaka
	Upozorenje na poseban dokument
	Mehaničko ugađanje nule
	Stezaljka za uzemljenje
	Magnetski zaslon
	Elektrostatički zaslon
	Opći pribor
	Ispravljač
	Paralelni otpornik (shunt)
	Djelatni predotpornik
	Induktivni predotpornik

Tablica 2.6.

2.1.2. Podjela analognih mjernih instrumenata

Već smo u prvom poglavlju opisali nekoliko podjela mjernih instrumenata kojima se svakodnevno služimo prilikom mjerenja električnih i neelektričnih veličina. Same analogne mjerne instrumente možemo još posebno podijeliti prema načelu rada, izvedbi i načinu prikaza.

Prema fizikalnim zakonitostima na kojima se temelji načelo rada instrumenta analogni elektromehanički instrumenti se dijele na:

- instrumente sa zakretnim svitkom i permanentnim (stalnim) magnetom;
- instrumente s pomičnim željezom;
- instrumente s pomičnim magnetom;
- elektrodinamičke instrumente;
- instrumente s križnim svitcima;
- indukcijske instrumente;
- termičke instrumente;
- elektrostatičke instrumente;
- vibracijske instrumente.

Analogni instrumenti mogu prema izvedbi mjernog sustava biti **elektromehanički**, tj. klasični i **elektronički**.

Klasični mjerni instrumenti za svoj rad ne trebaju izvor napajanja, a mjerni sustav im pokreće isključivo fizikalna pojava koja je iskorištena za njihovu funkciju. Elektronički instrumenti osim elektromehaničkih dijelova sadrže i poluvodičke komponente. Od njih se sastoje mjerna pojačala koja su redovito njihov sastavni dio.

Klasični instrumenti uvijek imaju analogni prikaz koji se obično sastoji od ljestvice i kazaljke.

Prema načinu prikaza možemo ih podijeliti na

- mjerne instrumente s jednodimenzionalnim prikazom mjerene veličine
- mjerne instrumente s dvodimenzionalnim prikazom mjerene veličine.

Indikatori za prikaz mjerene veličine

Kao analogni pokaznici za vizualni prikaz mjerne veličine u instrumentima se danas najčešće primjenjuju:

- ljestvice i kazaljke;
- brojčani prikaz;
- papir.

Proširimo znanje...

Načelo rada instrumenata s križnim svitcima zasniva se na fizikalnim zakonima koji su primijenjeni kod konstrukcije mjernih instrumenata. Zato je u nazivu svakog instrumenta obuhvaćen i fizikalni zakon na kojemu se temelji njegov rad. Kvocijentni se instrumenti izrađuju kao:

- kvocijentni instrumenti s pomičnim svitkom i permanentnim magnetom;
- kvocijentni instrumenti s pomičnim željezom;
- kvocijentni instrumenti s pomičnim magnetom;
- kvocijentni elektrodinamički instrumenti;
- kvocijentni indukcijski instrumenti.

Važno!

Instrument ne može točno mjeriti izvan mjernog opsega. Ako se primijene vrijednosti mjerne veličine veće od mjernog opsega, može doći do oštećenja instrumenta.

Instrument najtočnije mjeri na području između $2/3$ i $3/3$ mjernog opsega. Na samom početku mjernog opsega točnost mjerenja je manja nego na njegovom kraju. Ako primijenjena mjer- na veličina ne prelazi $1/3$ mjernog opsega, pravilno je mjerni opseg smanjiti na prvi niži. To vrijedi prije svega za analogne ampermetre i voltmetre, a kod digitalnih instrumenata to često nije moguće primijeniti jer im se mjerni opsezi razlikuju za jedan red veličine.

Kod vatmetara se to pravilo ne smije primjenjivati, jer se mjerni opseg određuje kao kombinacija dozvoljenih struja i napona koji se u određenim uvjetima mjerenja mogu pri- ključiti na instrument, i nje- gova bi primjena proizvela oštećenje instrumenta!

Ponovimo...

Osjetljivost instrumenta definira se kao omjer promjene otklona kazaljke i promjene mjerne veličine. Može se prikazati izrazom 1,

$$o = \frac{\Delta \alpha}{\Delta X} \quad (1)$$

gdje je o osjetljivost instrumenta, $\Delta \alpha$ promjena otklona kazaljke, a ΔX promjena mjerne veličine. Iskazuje se u mm/A, mm/V, mm/ Ω i dr., ovisno o kojem je instrumentu riječ.

Primjer:

Ako se kazaljka ampermetra otkloni za 1 cm prilikom promjene struje 0,5 A, osjetljivost tog instrumenta je 20 mm/A.

Stalnica ili **konstanta instrumenta** je koeficijent (broj) kojim treba pomnožiti broj očitanih podjeljaka na ljestvici da bi se dobila mjerena vrijednost (mjerena vrijednost = stalnica k · otklon kazaljke α). Stalnica je omjer mjernog opsega i ukupnog broja (MO) podjela na ljestvici $\sum \alpha$

$$k = \frac{MO}{\sum \alpha} \quad (2)$$

Primjer 1:

Voltmetar ima više mjernih opsega, i to 0,3 V; 1 V; 3 V; 10 V; 30 V; 100 V i 300 V, i dvije ljestvice. Jedna ljestvica ima 100 podjeljaka ($\sum \alpha = 100$ dsk), a druga 30 podjeljaka ($\sum \alpha = 30$ dsk). Treba odrediti stalnicu ili konstantu k instrumenta za mjerni opseg $MO = 0,3$ V na ljestvici $\sum \alpha = 30$ dsk.

$$k_v = MO / \sum \alpha = 0,3 / 30 = 0,01 \text{ V/dsk}$$

Primjer 2.

Izračunati za mjerni opseg voltmetra $MO = 0,3$ V koliku nam vrijednost poka- zuje kazaljka na ljestvici od 30 podjeljaka ako se otklonila 21,6 podjeljaka.

$$U_1 = k \cdot \alpha = 0,01 \cdot 21,6 = 0,216 \text{ V}$$

2.2. Ljestvice i kazaljke

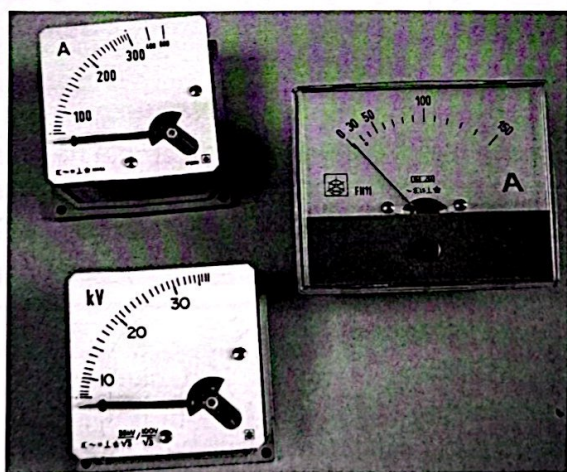
Ljestvice i kazaljke primjenjuju se kad se želi postići analogni prikaz mjernog rezultata. Mogu biti materijalne, a mogu se i simulirati na digitalnom grafičkom zaslonu ako se želi postići preglednost kod brzog očitavanja rezultata. Jedan od primjera je grafički prikazan brojčanik sata s kazaljkama na zaslonu mobitela ili ručnom digitalnom satu.

Prema karakteristici ljestvice mogu biti *linearne*, *kvadratične* i *logaritamske*.

Kod *linearne ljestvice* osjetljivost je jednaka na cijelom mjernom opsegu. Svi su joj podjeljci jednako razmaknuti.

Kod *kvadratične ljestvice* osjetljivost raste prema kraju mjernog opsega. Na početku mjernog opsega podjeljci su gusto raspoređeni, a prema kraju sve rjeđe.

Kod *logaritamske ljestvice* osjetljivost pada prema kraju mjernog opsega. Od početka prema kraju mjernog opsega susjedni se podjeljci razlikuju za red mjerne veličine, od najmanjeg prema najvećem.



Slika 2.1. Ljestvice različitih karakteristika

Važno!

Ljestvice laboratorijskih instrumenata imaju više podjeljaka nego ljestvice pogonskih instrumenata.

Kazaljke laboratorijskih instrumenata dulje su i vže od kazaljki pogonskih instrumenata.

Ljestvice laboratorijskih instrumenata često sadrže zrcalo, da se spriječi pogreška zbog paralakse.

Laboratorijski instrumenti ponekad umjesto materijalne kazaljke sadrže svjetlosnu kazaljku.

Laboratorijski se instrumenti očitavaju s udaljenosti od 0,2 m do 0,5 m, a pogonski instrumenti od 0,5 m do 1 m.

linearna ljestvica

kvadratična ljestvica

logaritamska ljestvica

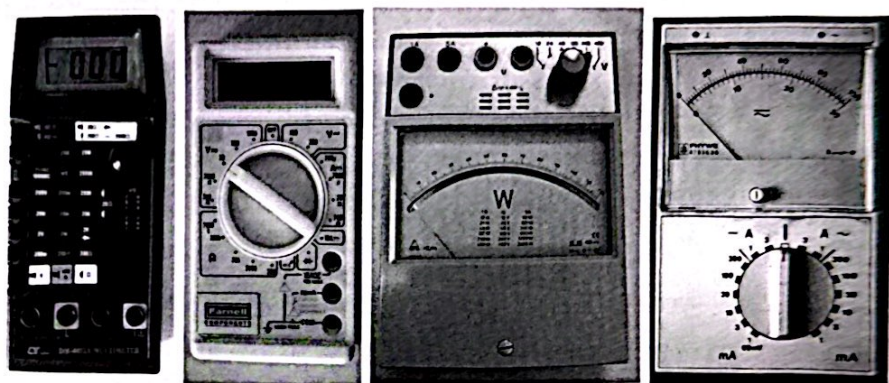
2.3. Značajke mjernih instrumenata

2.3.1. Mjerni opseg

Mjerni opseg je skup vrijednosti mjernih veličina za koje instrument mjeri unutar svog razreda točnosti. To znači da je mjerna pogreška unutar definiranih granica pogrešaka.

Važno!

Kod analognog i digitalnog instrumenta mjerni se opseg odabire preklopnikom ili rjeđe tipkama. Na svakom je mjernom opsegu navedena vrijednost mjernog dometa, koja se ne smije prekoračiti.



Kod mjerenja napona i struja prije početka mjerenja najprije se odabere najveći mjerni opseg. Tek nakon prve indikacije mjerne veličine preklopnik mjernog dometa prebacuje se na odgovarajući niži domet.

Proširimo znanje...

Za razliku od analognog instrumenta, kod digitalnog je instrumenta raspored mjernih opsega uvjetovan brojem znamenki (engl. *digit*). Instrument s 4 znamenke na digitalnom prikazu omogućuje mjerenje najveće vrijednosti iskazane brojem 9999. Za takav instrument kažemo da ima 4 znamenke. Ako je zadnja znamenka decimalna, najveća vrijednost na tom mjernom opsegu je 999,9. Ako su zadnje dvije ili tri znamenke decimalne, najveća vrijednost na tim mjernim opsezima može biti 99,99 ili 9,999. Neki instrumenti imaju mogućnost prikaza prve znamenke samo kao 0 ili 1. Za instrument s mjestom za 4 znamenke i tom mogućnošću kažemo da ima $3\frac{1}{2}$ znamenke. Najveći broj koji se može prikazati takvim instrumentom je 1999, a na opsezima s jednim, dvama ili trima decimalnim mjestima 199,9; 19,99 ili 1,999.

Kod analognih instrumenata mjerni se opseg ne mora nalaziti na cijeloj ljestvici instrumenta. Zato se definira **pokazni opseg** kao dio ljestvice na kojem se može pratiti kretanje kazaljke. **Mjerni opseg** je dio pokaznog opsega u kojem instrument mjeri u dozvoljenim granicama pogreške, odnosno unutar svog razreda točnosti. Ako je mjerni opseg različit od pokaznog opsega, početak i kraj mjernog opsega označava se crnom točkom.

Mjerni domet je najveća vrijednost fizikalne veličine koju instrument može izmjeriti na nekom mjernom opsegu.

2.3.2. Razlučivost

Razlučivost instrumenta je sposobnost razlikovanja bliskih vrijednosti. Analognim je instrumentima razlučivost iskazana u vrijednosti koju nosi najmanji podjeljak na određenom mjernom opsegu, a digitalnim je instrumentima razlučivost iskazana jedinicom posljednje znamenke.

Razlučivost se obično iskazuje kao omjer vrijednosti najmanjeg podjeljka i mjernog opsega.

Tako, naprimjer, kod analognog voltmetra čija ljestvica sadrži 100 podjeljaka, na mjernom opsegu 10 V jedan podjeljak nosi vrijednost 0,1 V pa se razlučivost iskazuje omjerom $0,1 \text{ V} / 10 \text{ V}$.

Proširimo znanje...

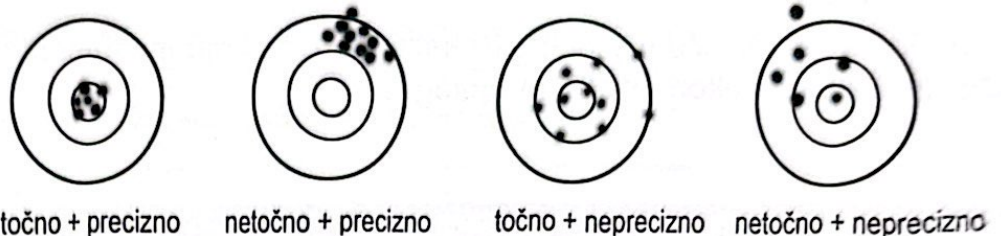
Za razliku od analognog instrumenta, kod digitalnog se instrumenta razlučivost iskazuje kao omjer jedinice u posljednjoj znamenci i najvećeg broja koji je moguće prikazati na zaslonu instrumenta na pojedinom mjernom opsegu.

Tako je, naprimjer, kod digitalnog voltmetra s mogućnošću prikaza 3 ½ znamenke na mjernom opsegu 10 V najveći broj koji se smije postići 10,00 V, ali instrument bi mogao prikazati i 19,99 V, dokle seže njegov pokazni opseg. Razlučivost bi u tom slučaju bio omjer $0,01 \text{ V} / 19,99 \text{ V}$. U praksi se to ne izvodi, nego se raspored mjernih opsega prilagođava mogućnostima prikaza mjernih rezultata, pa u tom slučaju takav instrument ne bi imao mjerni opseg 10 V, nego 20 V.

Kod digitalnog je voltmetra s mogućnošću prikaza 4 znamenke na mjernom opsegu 10 V najveći broj koji se smije postići 10,00 V, ali instrument bi mogao prikazati 9,999 V, dokle seže njegov pokazni opseg. Razlučivost je u tom slučaju omjer $0,001 \text{ V} / 9,999 \text{ V}$.

2.3.3. Preciznost instrumenta

Preciznost je sposobnost instrumenta da pokazuje međusobno bliske vrijednosti. Važno je razlikovati preciznost od točnosti, kako je prikazano na slici:



Prije svakog početka mjerenja analognim instrumentom zadatak mjernitelja je provjeriti je li kazaljka instrumenta u nultom položaju dok na instrument nije priključena mjerna veličina.

Ako kazaljka nije u nultom položaju, u taj je se položaj može dovesti na način:

ako je prema procjeni mjeritelja pomak kazaljke od nultog položaja veći, tada se ona vraća u taj položaj uz pomoć odvijača i vijka za regulaciju nultog položaja kazaljke.

Taj postupak naziva se **kalibracija**.

2.3.4. Momenti koji djeluju na pomični dio analognog instrumenta

Kod elektromehaničkih instrumenata postoji pomični dio instrumenta koji reagira na kontinuiranu promjenu mjerne, odnosno fizikalne veličine. Promjenom fizikalne veličine na njega djeluje sila koja ga pomiče iz ravnotežnog položaja. Ta je sila rezultat djelovanja: *električnog polja, magnetskog polja, kemijske reakcije, topline i dr.*

Na pomični dio mjernog instrumenta istovremeno djeluju četiri momenta:

1. **zakretni moment** ili aktivni mehanički moment, koji nastaje kao posljedica djelovanja fizikalne veličine koju želimo izmjeriti i koji pomiče kazaljku iz ravnotežnog položaja. Kada drugi momenti ne bi postojali, taj bi moment kazaljku koja je priključena na pomični dio instrumenta otklonio do graničnika otklona

2. otporni moment ili protumoment spiralnih opruga koji zaustavlja kazaljku na vrijednosti koja odgovara mjerenoj veličini. Važno je napomenuti da, kako oba momenta djeluju istovremeno, kazaljka ne odlazi najprije do graničnika otklona, nego kontinuirano putuje po ljestvici i zaustavlja se kod mjerene veličine

3. moment tromosti ili inercije koji djeluje kod kretanja neke mase ovisan je o izvedbi mjernog sustava instrumenta, odnosno o masi pomičnog dijela instrumenta i njegove kazaljke

4. prigušni moment koji sprečava titranje kazaljki oko mjerne veličine.

Ovisno o vrsti mjernog sustava instrumenta, prigušenje se može izvesti kao mehaničko i, češće, elektromagnetsko. Mehaničko prigušenje može biti zračno i tekućinsko. Tekućinsko prigušenje izvodi se obično uz pomoć silikonskog ulja. Kad ne bi bilo prigušnog momenta, kazaljka instrumenta titrala bi oko ravnotežnog položaja.

Ponovimo..

Električne veličine su:
jakost električne struje,
električni napon,
električni otpor,
frekvencija,
električna snaga i dr.

2.4. Priključak instrumenata za mjerenje električnih veličina u strujni krug

2.4.1. Instrumenti za mjerenje jakosti električne struje – ampermetri

Instrumenti za mjerenje jakosti električne struje nazivaju se ampermetri. Priključuju se serijski elementu strujnog kruga kojima želimo mjeriti struju.

Ovisno o vrsti struje u strujnom krugu mogu biti

istosmjerni i izmjenični.

Kod istosmjernog ampermetra treba voditi računa da se **+** stezaljka priključi u vodič gdje je i **+** stezaljka izvora.

Kod izmjeničnog ampermetra ne treba voditi računa o rasporedu priključka stezaljki, no ako postoje oznake $\sim$ i $\perp$ treba ih se pridržavati radi preglednosti spojne sheme.

2.4.2. Instrumenti za mjerenje električnog napona – voltmetri

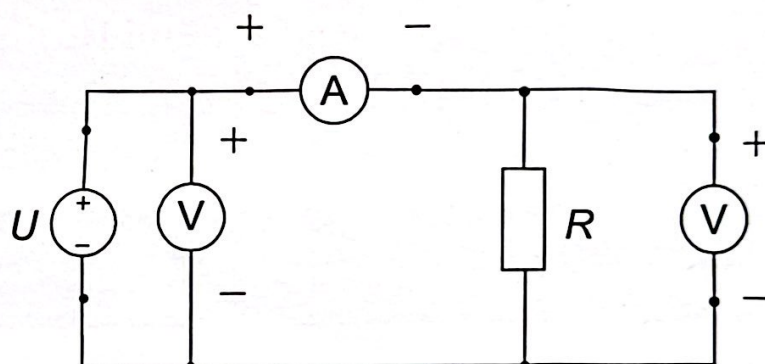
Instrumenti za mjerenje električnog napona nazivaju se voltmetri. Priključuju se paralelno elementu strujnog kruga kojemu mjerimo napon. Ovisno o vrsti struje u strujnom krugu mogu biti:

istosmjerni i izmjenični.

Kod istosmjernog voltmetra treba voditi računa da se $+$ stezaljka priključi u vodič gdje je i $+$ stezaljka izvora.

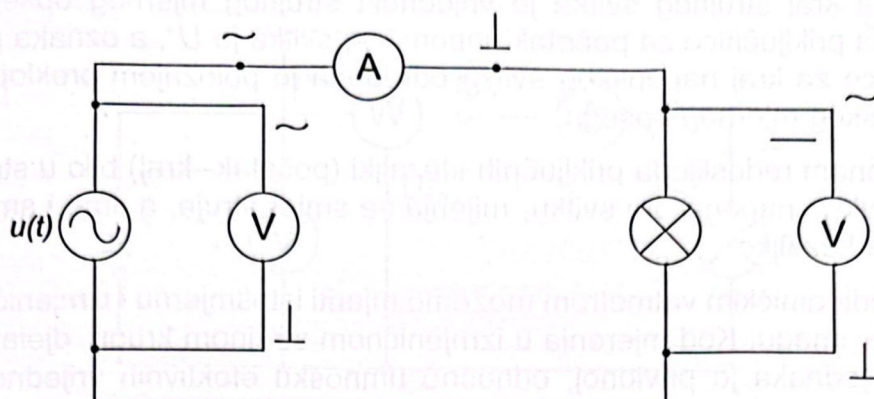
Kod izmjeničnog voltmetra ne treba voditi računa o rasporedu priključka stezaljki, no ako postoje oznake $\sim$ i $\perp$ treba ih se pridržavati radi preglednosti spojne sheme.

Na slici 2.2 prikazan je način priključivanja istosmjernog ampermetra i voltmetra.



Slika 2.2. Način priključivanja istosmjernog ampermetra i voltmetra

Na slici 2.3 prikazan je način priključivanja izmjeničnog ampermetra i voltmetra.

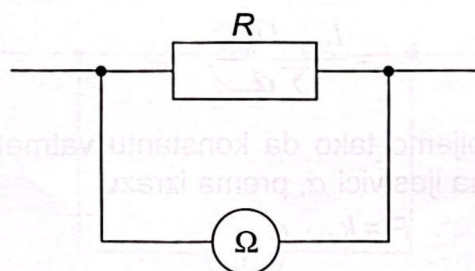


Slika 2.3. Način priključivanja izmjeničnog ampermetra i voltmetra

2.4.3. Instrumenti za mjerenje električnog otpora – omometri

Instrumenti za mjerenje električnog otpora nazivaju se omometri.

Priključuju se paralelno otporu koji želimo izmjeriti kad na njega nije priključen vanjski izvor napona!



Slika 2.4. Način priključivanja omometra

2.4.4. Instrumenti za mjerenje električne snage – vatmetri

Instrumenti za mjerenje električne snage nazivaju se vatmetri.

Vatmetar ima dva svitka. Strujni je nepomičan, a naponski pomičan. Početci i krajevi obaju svitaka izvedeni su na priključnice vatmetra. Oznaka priključnice za početak strujnog svitka je I^* , a oznaka priključ-

Proširimo znanje...

Za mjerenje djelatne snage u istosmjernim i izmjeničnim strujnim krugovima najčešće se primjenjuje elektrodinamički vatmetar.

Važno!

Kod elektrodinamičkog vatmetra ne smije se naknadno smanjiti strujni i naponski opseg, ako se tijekom mjerenja otklon kazaljke nalazi u prvoj trećini ljestvice.

Važno!

Prilikom mjerenja vatmetrom, ampermetar se priključuje serijski sa strujnim svitkom, a voltmetar paralelno naponskom svitku.

Važno!

Ovisno o vrijednostima struje koja prolazi strujnim svitkom i napona na naponskim stezaljkama vatmetra, odabiru se strujni i naponski mjerni opseg vatmetra.

nice za kraj strujnog svitka je vrijednost strujnog mjernog opsega. Oznaka priključnice za početak naponskog svitka je U^* , a oznaka priključnice za kraj naponskog svitka određena je položajem preklopke naponskog mjernog opsega.

Promjenom redoslijeda priključnih stezaljki (početak–kraj) bilo u strujnom, bilo u naponskom svitku, mijenja se smjer struje, a time i smjer otklona kazaljke.

Elektrodinamičkim vatmetrom možemo mjeriti istosmjernu i izmjeničnu djelatnu snagu. Kod mjerenja u izmjeničnom strujnom krugu, djelatna snaga jednaka je prividnoj, odnosno umnošku efektivnih vrijednosti struje i napona na trošilu samo kod čistog djelatnog opterećenja. Kod jalovog opterećenja izazvanog induktivnim i kapacitivnim trošilima, dolazi do faznog pomaka između struje i napona, pa je djelatna snaga manja od umnoška struje i napona.

Vatmetrom se ne može izravno na ljestvici očitati vrijednost mjerene snage, već samo otklon kazaljke na ljestvici, odnosno kut α . Da bismo mogli odrediti snagu koju nam pokazuje instrument moramo uzeti u obzir mjerne opsege strujnog i naponskog svitka, te ukupni broj podjeljaka na ljestvici vatmetra. S pomoću strujnog mjernog opsega I_{MO} i naponskog mjernog opsega U_{MO} , te ukupnog broja podjeljaka ljestvice $\sum \alpha$ odredi se konstanta vatmetra k_w , odnosno omjer vata W po jednom podjeljku ljestvice, W/dsk .

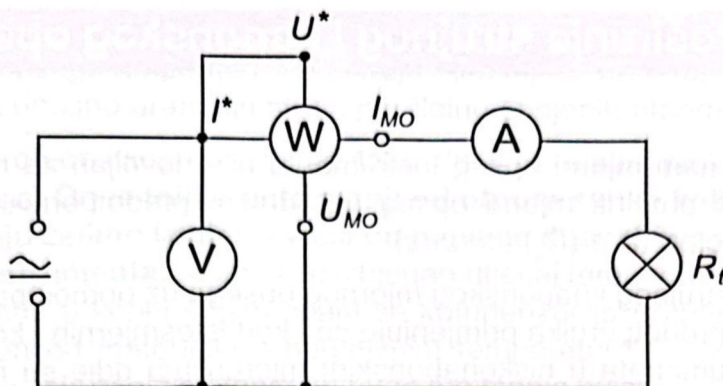
$$k_w = \frac{I_{MO} \cdot U_{MO}}{\sum \alpha} \quad (1)$$

Mjerenu snagu dobijemo tako da konstantu vatmetra pomnožimo s otklonom kazaljke na ljestvici α , prema izrazu:

$$P = k_w \cdot \alpha \quad (2)$$

Izravni spoj vatmetra upotrebljava se kod mjerenja malih snaga, odnosno tamo gdje nam vrijednosti mjernih opsega strujnog i naponskog svitka dozvoljavaju. **Kod mjerenja vatmetrom, ampermetrom je potrebno mjeriti struju koja teče strujnim svitkom da ne dođe do preopterećenja, a time i do uništenja instrumenta.** Napon nam je uvijek donekle poznat i njegove male promjene nisu opasne po oštećenje instrumenta.

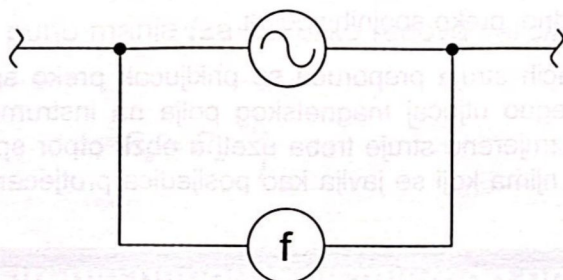
Na slici 2.5 prikazana je shema spoja vatmetra u strujni krug.



Slika 2.5. Mjerenje snage vatmetrom u izravnom spoju

2.4.5. Instrumenti za mjerenje frekvencije izmjeničnog napona – frekvenciometri

Frekvenciometri su instrumenti koji služe za mjerenje frekvencije u izmjeničnom strujnom krugu. Priključuju se paralelno izvoru čiju frekvenciju želimo provjeriti ili pratiti tijekom mjerenja. Na slici 2.6 prikazan je način priključka frekvenciometra u strujni krug



Slika 2.6. Priključak frekvenciometra u strujni krug

2.5. Proširenje strujnog i naponskog opsega

Tamo gdje nam mjerni opseg instrumenta nije dovoljan za mjerenje, potrebno je proširiti mjerni opseg ugradnjom predotpornika (R_p) ili paralelnog otpornika (R_s) (*shunta*).

Proširenje strujnog i naponskog mjernog opsega uz pomoć paralelnog otpornika i predotpornika primjenjuje se i kod istosmjernih i kod izmjeničnih instrumenata u niskonaponskim mjerenjima gdje su navedeni laboratorijski elementi dovoljni za uspješno provođenje mjerenja.

Ponovimo..

Mjerni opseg instrumenta (MO) označava nam najveću vrijednost koju s tim instrumentom možemo izmjeriti s naznačenom točnošću.

Paralelni otpornici (shuntovi)

Paralelni otpornici (shuntovi) su laboratorijski elementi koji služe za proširenje istosmjernog i izmjeničnog strujnog mjernog opsega. Mogu biti vanjski i ugradbeni. Ugradbeni shuntovi su dio mjernog instrumenta i služe za postizanje različitih mjernih opsega. Vanjski su shuntovi masivni, obično su načinjeni od manganina, zbog njegovog niskog termoelektričnog napona. Izrađuju se za dva načina priključka:

- neposredno na stezaljke instrumenta (ampermetra),
- posredno, preko spojnih vodiča.

Kod mjerenja jačih struja preporuča se priključak preko spojnih vodiča, kako bi se izbjegao utjecaj magnetskog polja na instrument. No, tada kod proračuna izmjerene struje treba uzeti u obzir otpor spojnih vodiča i pad napona na njima koji se javlja kao posljedica protjecanja struje kroz instrument.

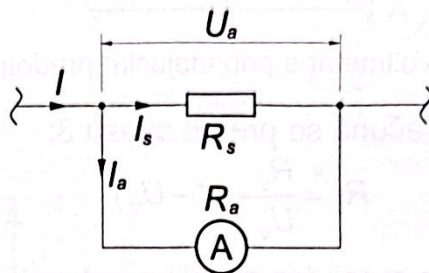
2.5.1. Proširenje strujnog mjernog opsega uz pomoć paralelnog otpornika (shunta)

Za proširenje mjernog opsega ampermetra potrebno je paralelno sa svitkom ampermetra spojiti paralelni otpornik (*shunt*), R_s .

U tom će se slučaju struja granati, odnosno djelomično će teći kroz svitak ampermetra, a djelomično kroz paralelni otpornik (*shunt*). Veličina struje koja će teći paralelnim otpornikom I_s ovisi o vrijednosti otpora

tog otpornika i napona paralelnog spoja (U_a). Mogućnost proširenja mjernog opsega ampermetra na struju I temelji se na I. Kirchhoffovom zakonu, odnosno grananju struja paralelno spojenih otpornika.

Paralelni otpor dimenzionira se tako da kroz njega prolazi poznati iznos struje. **On je toliko puta manji od otpora svitka koliko je puta struja koju želimo izmjeriti veća od najveće dozvoljene struje kroz svitak instrumenta.** Kako bi se izbjegao utjecaj temperature na svitak instrumenta, u seriju s njim spaja se kompenzacijski otpornik R_a . On je načinjen od materijala s negativnim temperaturnim koeficijentom, tako da serijski spoj tih otpornika bude što manje ovisan o temperaturi. Ampermetar s pripadajućim paralelnim otpornikom (**shuntom**) prikazan je na slici 2.7.



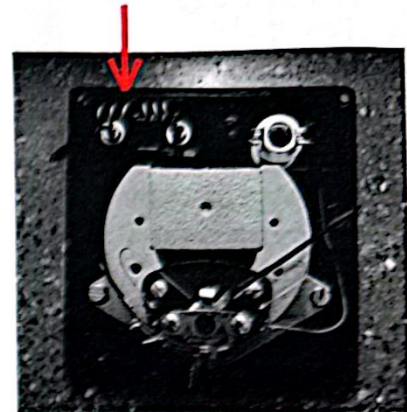
Slika 2.7. Ampermetar s pripadajućim paralelnim otpornikom (shuntom)

Otpor paralelnog otpornika R_s računa se prema izrazu 1:

$$R_s = R_a \cdot \frac{I_a}{I - I_a} \quad (1)$$

Ako je struja I_a puno manja (za nekoliko redova veličine) od struje I , vrijedi izraz 2:

$$R_s = R_a \cdot \frac{I_a}{I} \quad (2)$$



Slika 2.8. Ugradbeni paralelni otpornici (shuntovi) unutar ampermetra za određivanje strujnog mjernog opsega

2.5.2. Proširenje naponskog mjernog opsega uz pomoć predotpornika

Za proširenje mjernog opsega voltmetra potrebno je serijski sa svitkom voltmetra spojiti predotpornik (R_p). U tom slučaju povećati će se ukupni otpor strujnog kruga voltmetra, a time se sprečava povećanje struje I_v kroz voltmetar preko dopuštene vrijednosti. To znači da visina napona na predotporniku (U_p) ovisi o dozvoljenoj struji voltmetra (I_v) i vrijednosti tog otpornika (R_p). Mogućnost proširenja mjernog opsega voltmetra na napon U temelji se na II. Kirchhoffovom zakonu,

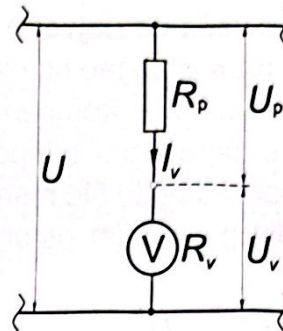
Važno!

- Ugradbeni paralelni otpornici koji se nalaze se unutar ampermetra služe za odabir strujnog mjernog opsega.
- Ugradbeni paralelni otpornici koji se nalaze unutar volmetra služe za odabir naponskog mjernog opsega.
- Proširenje strujnog i naponskog mjernog opsega uz pomoć ugradbenih paralelnih otpornika i predotpornika nudi manje mogućnosti nego upotreba vanjskih elemenata uz čiju se uporabu mjerni opsezi mogu proširiti još i više.
- Uz pomoć ugradbenih paralelnih otpornika i predotpornika proširuje se samo mjerni opseg osnovnog mjernog sustava instrumenta.
- Uz pomoć vanjskih paralelnih otpornika i predotpornika moguće je dodatno proširiti svaki mjerni opseg instrumenta!

odnosno na dijeljenju napona na serijski spojenim otpornicima.

Predotpornik se dimenzionira tako da iznos njegovog otpora bude toliko puta veći od otpora svitka koliko puta želimo proširiti mjerni opseg.

Voltmetar s pripadajućim predotpornikom prikazan je na slici 2.9.



Slika 2.9. Voltmetar s pripadajućim predotpornikom

Otpor predotpornika računa se prema izrazu 3:

$$R_p = \frac{R_v}{U_v} \cdot (U - U_v). \quad (3)$$

Ako je napon U_v puno manji (za nekoliko redova veličine) od napona U , vrijedi izraz 4:

$$R_p = \frac{R_v}{U_v} \cdot U. \quad (4)$$

Na slici 2.8 prikazani su paralelni otpornici (*shuntovi*) unutar ampermetra za određivanje strujnog mjernog opsega.

2.5.3. Proširivanje strujnog i naponskog mjernog opsega uz pomoć mjernih transformatora

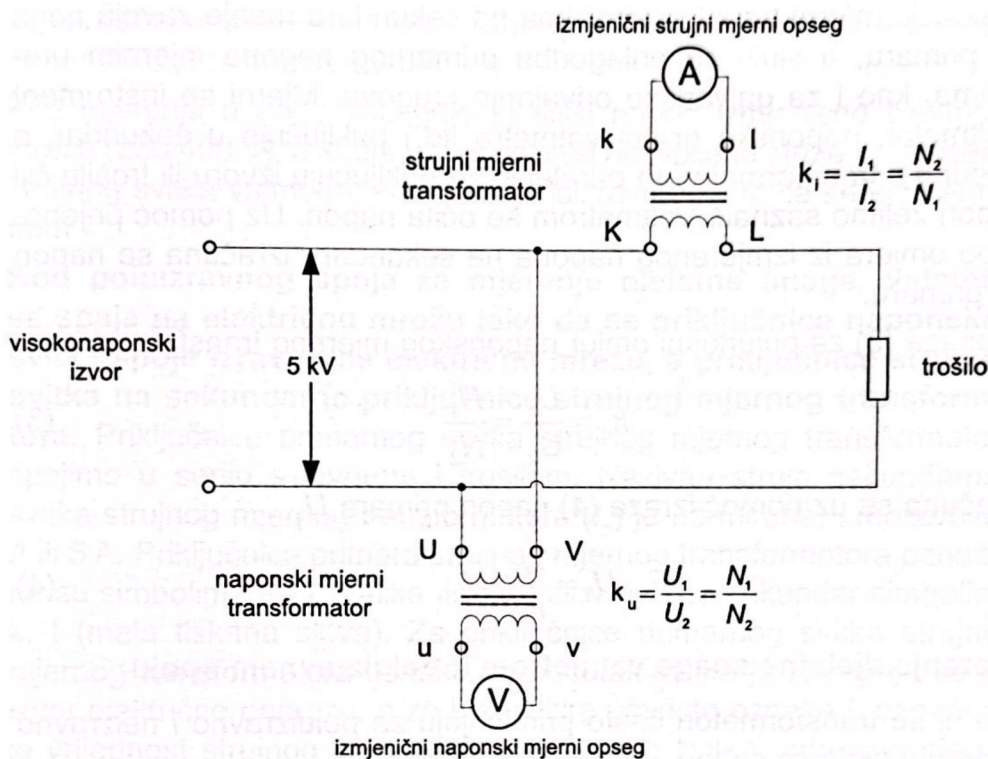
Već smo ranije naučili da su mjerni transformatori laboratorijski elementi koji služe za proširenje strujnog ili naponskog mjernog opsega, i za galvansko odvajanje. Primjenjuju se najčešće u izmjeničnom mjernom području, premda postoje posebne izvedbe i za istosmjerno područje. Najčešće služe za proširenje izmjeničnog strujnog i naponskog mjernog opsega u visokonaponskim mjerenjima, ili tamo gdje proširenje mjernog opsega uz pomoć vanjskog paralelnog otpornika te predotpornika nije dovoljno. Načelo njihova rada proučit ćemo na idealnom transformatoru.

Postoje dvije osnovne izvedbe mjernih transformatora:

strujni i naponski.

Na slici 2.10 prikazan je priključak strujnog i naponskog mjernog transformatora u strujni krug.

Strujni mjerni transformatori se primijenjuju za transformiranje mjerene struje na iznos prilagođen mjernim uređajima. Za strujni mjerni transformator vrijedi da na sekundaru ima više zavoja nego na primaru. Mjerni se instrument (ampermetar, strujna grana vatmetra, itd) priključuje na sekundar transformatora, a mjerni transformator priključuje se serijski u strujni krug. Ampermetrom se očita struja. Uz pomoć prijenosnog omjera iz izmjerene struje na sekundaru izračuna se struja koja je protjecala primarom.



Slika 2.10. Primjer priključka strujnog i naponskog mjernog transformatora u visokonaponski strujni krug

Iz izraza (1) za prijenosni omjer strujnog mjernog transformatora

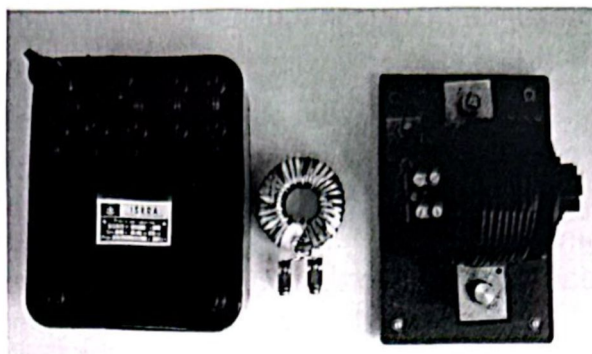
$$k_i = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (1)$$

izračuna se uz pomoć izraza (2) struja primara I_1

$$I_1 = \frac{N_2}{N_1} \cdot I_2 \quad (2)$$

Važno!

Nakon mjerenja i odvajanja instrumenta potrebno je kratko spojiti, odnosno premostiti priključnice 'k' i 'l' sekundarnog svitka strujnog mjernog transformatora jer u suprotnom, zbog vrlo velike struje u primarnom svitku i relativno velikog broja zavoja sekundarnog svitka, dođe do induciranja visokog napona koji bi mogao uništiti izolaciju transformatora, a time i sam transformator.



Slika 2.11. Mjerni transformatori

Naponski mjerni transformator ima na sekundaru manje zavoja nego na primaru, a služi za prilagodbu primarnog napona mjernim uređajima, kao i za galvansko odvajanje krugova. Mjerni se instrument (voltmetar, naponska grana vatmetra itd.) priključuje u sekundar, a zajedno s transformatorom paralelno se priključuju izvoru ili trošilu čiji napon želimo saznati. Voltmetrom se očita napon. Uz pomoć prijenosnog omjera iz izmjenjenog napona na sekundaru izračuna se napon na primaru.

Iz izraza (3) za prijenosni omjer naponskog mjernog transformatora

$$k_u = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (3)$$

izračuna se uz pomoć izraza (4) napon primara U_1

$$U_1 = \frac{N_1}{N_2} \cdot U_2 \quad (4)$$

Mjerenje djelatne snage vatmetrom u poluizravnom spoju

Mjerni se transformatori često primjenjuju za poluizravno i neizravno mjerenje djelatne snage.

Kod poluizravnog mjerenja snage zbog prevelike struje u strujnom krugu strujni se svitak vatmetra, kao i ampermetar kojim se prati jakost struje, priključuju preko strujnog transformatora.

Kod neizravnog mjerenja snage zbog prevelike struje u strujnom krugu i prevelikog napona, strujni se svitak vatmetra, kao i ampermetar kojim se prati jakost struje, priključuju preko strujnog transformatora, a naponski svitak, kao i voltmetar kojim se prati iznos napona, preko naponskog transformatora.

Ta su mjerenja vrlo složena i potreban je veliki oprez mjeritelja, kako pri samom izvođenju mjernog postupka, tako i prilikom obrade mjernog rezultata.

Pokazat ćemo kako se primjenjuje strujni mjerni transformator za mjerenje snage vatmetrom u poluizravnom spoju.

Vatmetrom u izravnom spoju možemo mjeriti snage trošila malih vrijednosti, odnosno one vrijednosti koje nam dozvoljavaju mjerni opsezi strujnog i naponskog svitka. Ako je potrebno izmjeriti veće snage nego što nam dozvoljavaju mjerni opsezi, potrebno je izvršiti proširenje istih. **Kod proširenja strujnog mjernog opsega svitka vatmetra pri mjerenju istosmjernih struja potrebno je priključiti paralelni otpornik, odnosno shunt, a kod mjerenja u izmjeničnoj struji potrebno je priključiti strujni mjerni transformator. Za proširenje mjernog opsega naponskog svitka vatmetra potrebno je priključiti predotpor za mjerenja u istosmjernoj struji, dok se kod vrlo visokih napona izmjenične električne mreže koriste naponski mjerni transformatori.**

Kod mjerenja u pogonima gdje je niski napon izmjenične električne mreže (230/400 V), a struja uvijek jača od dozvoljene struje opterećenja strujnog svitka vatmetra, koristimo poluizravno mjerenje snage vatmetrom.

Kod poluizravnog spoja za mjerenje djelatne snage, vatmetar se spaja na električnu mrežu tako da se priključnice naponskog svitka spoje izravno na električnu mrežu, a priključnice strujnog svitka na sekundarne priključnice strujnog mjernog transformatora. Priključnice primarnog svitka strujnog mjernog transformatora spojimo u seriju s izvorom i trošilom. Nazivna struja sekundarnog svitka strujnog mjernog transformatora (I_2) je normirana, i može biti 1 A ili 5 A. Priključnice primara strujnog mjernog transformatora označene su simbolima K i L (velika tiskana slova), a za sekundar simbolima k, l (mala tiskana slova). Za priključnice primarnog svitka strujnog mjernog transformatora oznaka za početak svitka je K i spaja se na izvor električne energije, a za kraj svitka umjesto oznake L označena je vrijednost strujnog opterećenja primarnog svitka, odnosno njegov mjerni opseg ili struja I_1 i spaja se s trošilom. Budući da primarni svitak može imati više mjernih opsega, imamo i više prijenosnih omjera transformacije ($I_1 : I_2 = p_1$).

Kod mjerenja vatmetrom u poluizravnom spoju moramo uzeti u obzir prijenosni omjer transformacije kod određivanja konstante (k_{w1}).

Nova konstanta vatmetra se odredi prema izrazu:

$$k_{w1} = k_w \cdot p_1 = \frac{I_{MO} \cdot U_{MO}}{\sum \alpha_w} \cdot \frac{I_1}{I_2} \quad (5)$$

Budući da uvijek moramo mjeriti struju koja teče strujnim svitkom vatmetra, potrebno je odrediti i konstantu ampermetra po formuli:

$$k_{a1} = k_a \cdot p_1 = \frac{MO_a}{\sum \alpha_a} \cdot \frac{I_1}{I_2} \quad (6)$$

$$P = k_{w1} \cdot \alpha_w \quad (7)$$

$$I = k_{a1} \cdot \alpha_a \quad (8)$$

Prividnu snagu odredimo prema izrazu:

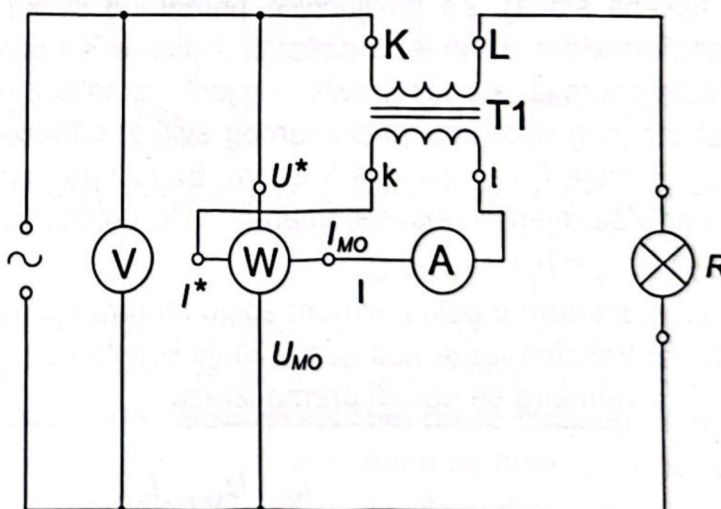
$$P_s = U \cdot I \quad (9)$$

a kosinus faznog pomaka struje i napona, odnosno faktor snage, prema izrazu:

$$\cos \varphi = \frac{P}{P_s} \quad (10)$$

Tijekom mjerenja na sekundarni su svitak strujnog mjernog transformatora spojeni svitci ampermetra ili strujni svitak vatmetra (električnog brojila) koji imaju neznatan otpor – odnosno sekundarni je svitak kratko spojen. Prema tome poslije mjerenja je odvajanjem instrumenta potrebno kratko spojiti, odnosno premostiti priključnice 'k' i 'l' sekundarnog svitka strujnog mjernog transformatora, jer u suprotnom zbog vrlo velike struje u primarnom svitku i relativno velikog broja zavoja sekundarnog svitka, dođe do induciranja visokog napona koji bi mogao uništiti izolaciju transformatora, a time i sam transformator.

Na slici 2.12 prikazana je shema poluizravnog mjerenja snage vatmetrom.



Slika 2.12. Mjerenje snage vatmetrom u poluizravnom spoju