

# **1. OSNOVNI POJMOVI O MARENJU**

## 1.1. UVOD

- Sve prirodne i tehničke nauke zasnivaju se na merenjima.
- Merenje omogućava proveru teorijskih postavki i hipoteza.
- Merenja često daju materijal za buduća teorijska razmatranja.
- Merenje su neophodna prilikom svake tehničke realizacije: razvoj prototipa, proizvodnja, kontrola gotovih proizvoda.
- Merenja omogućavaju racionalizaciju proizvodnje.
- Merenja omogućavaju proveru tehničke ispravnosti uređaja i postrojenja.
- Merenja su potrebna u svim oblastima nauke i tehnike.

# 1.1. UVOD

- U elektroenergetici postoji potreba za različitim merenjima:
  - merenja u prenosnom sistemu (napon, struja, aktivna i reaktivna snaga),
  - merenja u distributivnom sistemu
  - merenje za potrebe kupovine i prodaje električne energije,
  - merenje otpora uzemljenja,
  - merenje brzine vetra,
  - merenje sunčevog zračenja,
  - SCADA (Supervisory control and data acquisition),
  - PMU (Phasor measurement unit),...

## 1.1. Uvod

- Merenja omogućavaju kvantitativnu procenu neke fizičke veličine.
- Na taj način se mogu izdvojeno posmatrati pojedine fizičke veličine u okviru neke složene pojave i uticaj te veličine na celu pojavu.
- Definicija merenja: **Merenje je skup eksperimentalnih postupaka koji imaju za cilj određivanje vrednosti jedne fizičke veličine.**
- Rezultat merenja je vrednost merene veličine izražene u jedinicama mere te veličine.
- Nauka o merenjima naziva se metrologija (grč. *metran* – mera, *logos* – nauka)
- Metrologija se bavi:
  - metodama merenja fizičkih veličina,
  - realizacijom i održavanjem etalona fizičkih veličina,
  - razvojem i izradom mernih sredstava,
  - obradom i analizom rezultata merenja.

## 1.2. Međunarodni sistem jedinica

- Međunarodni sistem jedinica (*International System of Units*), koji je poznat po svom akronimu SI je najšire korišćeni sistem jedinica.
- Međunarodni sistem jedinica je savremena verzija metričkog sistema proširenog na sedam osnovnih veličina, odnosno jedinica.
- Na taj način je izvršena unifikacija metoda merenja u svim oblastima nauke, industrije i trgovine.
- Konačna verzija SI sistema ustanovljena je 1971. godine. Njime je definisano:
  - sedam osnovnih veličina – jedinica,
  - dopunske veličine – jedinice (radian, steradian),
  - decimalni umnožci,
  - delovi mernih jedinica (dekadni umnožci),
  - pravila pisanja i upotrebe oznaka mernih jedinica,
  - pravila upotrebe predmetaka.

## 1.2. Međunarodni sistem jedinica

- SI sistem ima ukupno sedam osnovnih veličina, odnosno jedinica:

Osnovna veličina	Jedinica	Oznaka
Dužina	metar	m
Masa	kilogram	kg
Vreme	sekunda	s
Električna struja	amper	A
Termodinamička temperatura	kelvin	K
Svetlosna jačina	kandela	cd
Količina materije	mol	mol

- Definicije pojedinih jedinica su date u literaturi.
- Prve tri jedinice (m, kg, s) definisane su za mehaniku sa hidraulikom.
- Amper (A) se koristi u elektromagnetizmu.
- Kelvin (K) u nauci o toploti.
- Kandela (cd) u fotometriji.
- Mol u fizičkoj hemiji.

## 1.2. Međunarodni sistem jedinica

- Na osnovu osnovnih jedinica dobijaju se izvedene jedinice:
  - brzina –  $m/s$
  - ubrzanje –  $m/s^2$
  - gustina struje –  $A/m^2$
  - magnetno polje –  $A/m$ , itd...
- Postoje i jedinice koje se ne mogu dobiti iz osnovnih jedinica jer nemaju dimenziju. Te dodatne jedinice definišu se za ugao i prostorni ugao.

<b>Fizička veličina</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Oznaka</b>
Ugao u ravni	radijan	rad
Prostorni ugao	steradian	sr

## 1.2. Međunarodni sistem jedinica

- Neke izvedene jedinice su dobile nazive prema istaknutim naučnicima koji su zadužili svetsku nauku svojim otkrićima i dostignućima.
- U Tabeli su date neke od tih jedinica.

Fizička veličina	Jedinica	Oznaka	Oznaka u SI
Magnetna indukcija	Tesla	T	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{A}^{-1}$
Sila	Njutn	N	$\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
Pritisak	Paskal	Pa	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$
Frekvencija	Herc	Hz	$\text{s}^{-1}$
Električni otpor	Om	$\Omega$	$\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-3}\cdot\text{A}^{-2}$
Snaga	Vat	W	$\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-3}$
Napon	Volt	V	$\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-3}\cdot\text{A}^{-1}$

## 1.2. Međunarodni sistem jedinica

- Decimalni umnožci i delovi jedinica definišu se u cilju smanjenja broja cifara u brojnoj vrednosti veličina (npr.  $\mu\text{A}$ , mm, kW, MWh, pF)

Naziv	Oznaka	Činilac	Naziv	Oznaka	Činilac
jota ( <i>yotta</i> )	Y	$10^{24}$	deci ( <i>deci</i> )	d	$10^{-1}$
ceta ( <i>zetta</i> )	Z	$10^{21}$	centi ( <i>centi</i> )	c	$10^{-2}$
eksa ( <i>exa</i> )	E	$10^{18}$	mili ( <i>milli</i> )	m	$10^{-3}$
peta ( <i>peta</i> )	P	$10^{15}$	mikro ( <i>micro</i> )	$\mu$	$10^{-6}$
tera ( <i>tera</i> )	T	$10^{12}$	nano ( <i>nano</i> )	n	$10^{-9}$
giga ( <i>giga</i> )	G	$10^9$	piko ( <i>pico</i> )	p	$10^{-12}$
mega ( <i>mega</i> )	M	$10^6$	femto ( <i>femto</i> )	f	$10^{-15}$
kilo ( <i>kilo</i> )	k	$10^3$	ato ( <i>atto</i> )	a	$10^{-18}$
hekto ( <i>hecto</i> )	h	$10^2$	cepto ( <i>zepto</i> )	z	$10^{-21}$
deka ( <i>deca</i> )	da	$10^1$	jokto ( <i>yocto</i> )	y	$10^{-24}$

- Dozvoljena je upotreba manjeg broja jedinica izvan SI sistema čija je upotreba rasprostranjena u praksi: elektronvolt, minut, čas, dan, litar, tona, morska milja, ar, hektar, itd...

## 1.2. Međunarodni sistem jedinica

- Jedinice se pišu po sledećim pravilima:
  1. Oznake mernih jedinica pišu se iza numeričkih vrednosti sa jednim mestom razmaka između. Na primer 10 kg.
  2. Oznake jedinica pišu se malim slovom, ali je prvo slovo veliko ako naziv jedinice predstavlja ime ličnosti ili kada rečenica počinje oznakom jedinice. Na primer 1 T.
  3. Proizvod dve jedinice obeležava se simbolom množenja, mada se taj simbol može i izostaviti jer je jednostavnije. Na primer  $N \cdot m$  ili  $Nm$ .
  4. Jedinice dobijene deljenjem jedne jedinice drugom pišu se sa kosom crtom između ili sa negativnim eksponentom. Na primer  $m/s$  ili  $ms^{-1}$ .
  5. Oznake jedinica ne smeju se mešati sa nazivima jedinica.

## 1.3. Principi merenja

- Razvoj oblasti merenja i metoda merenja usko je povezan sa razvojem nauke i tehnologije i obratno.
- Tehnike merenja sve više se orijentišu na električne i elektronske metode merenja.
- Veliki broj neelektričnih veličina danas se meri električnim putem.
- Kada je merna informacija u elektronskom obliku ona može lako da se:
  - obrađuje,
  - pamti,
  - prenosi na daljinu,
  - analizira,
  - koristi za upravljanje procesom,
  - skladišti.
- Električne merne metode danas se primenjuju u svim oblastima života, nauke i tehnike.

## 1.3. Principi merenja

- Svaki postupak merenja odvija se u principu u nekoliko faza i sve su one važne za pravilno odvijanje samog procesa merenja.
- Važne faze u procesu merenja su:
  - planiranje merenja
  - izbor mernog sredstva
  - merni proces

## 1.3.1. Planiranje merenja

- Planiranje merenja je važno, naročito pri složenim merenjima.
- Potrebno je analizirati:
  - cilj merenja,
  - koje sve veličine treba meriti,
  - u kojim opsezima se kreću te veličine pri merenjima,
  - potreban broj mernih tačaka (ponavljanja),
  - potrebnu tačnost merenja,
  - raspoloživu mernu opremu,
  - da li je potrebno primeniti određene mere bezbednosti,
  - da li merna oprema mora biti kalibrisana,
  - visinu eventualnih finansijskih zahteva,
  - formu u kojoj se prezentuju rezultati merenja,
  - eventualne posledice dobijenih rezultata.

## 1.3.2. Izbor mernog sredstva

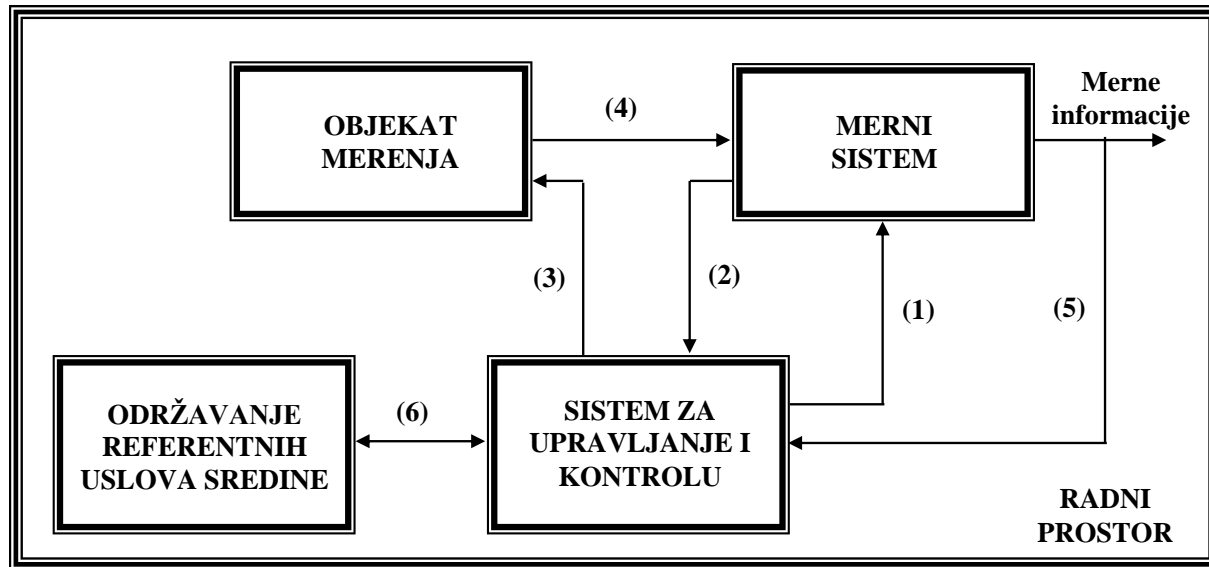
- Za svaki merni proces potrebno je odabrati odgovarajuća merna sredstva.
- Važno je voditi računa o:
  - vrsti merenja (šta se meri i gde),
  - željenoj tačnosti,
  - izabranoj mernoj metodi,
  - uslovima u kojima se obavlja merenje,
  - osetljivost merenja (opsezi, vrednosti merene veličine),
  - osoblju koje obavlja merenje,
  - mogućim uticajima na merni objekat i opremu.
- Potrebno je po mogućstvu, običi mesto merenja pogotovo ako se merenje obavlja u terenskim uslovima.

### 1.3.3. Merni proces

- Merni proces je realizacija postupka merenja, primena merne metode i dobijanje pojedinačnog rezultata merenja.
- Za pravilno odvijanje mernog procesa potrebno je obezbediti:
  - odgovarajući merni sistem,
  - sistem za kontrolu i upravljanje mernim procesom,
  - sistem za održavanje radnih (referentnih) uslova,
  - radni prostor,
  - princip merenja i mernu metodu,
  - propisati operativni postupak merenja.

### 1.3.3. Merni proces

- Funkcionalna šema postupka merenja data je na slici:



- Pojedini elementi su:

Objekat merenja – objekat čije se karakteristike mere i kvantitativno izražavaju

Merni sistem – skup mernih sredstava koja čine jednu funkcionalnu celinu

Sistem za upravljanje i kontrolu – upravlja mernim procesom i kontroliše ga

Sistem za održavanje referentnih uslova – održava potrebne radne uslove

### 1.3.3. Merni proces

- Postupak merenja teče u nekoliko koraka.
- Uređaj za upravljanje pokreće merni sistem (1).
- Zatim merni sistem daje informaciju sistemu za upravljanje da li je spreman za merenje (2).
- Ta informacija se prosleđuje mernom objektu (3).
- Merni objekat šalje merni signal mernom sistemu (4).
- Merni sistem obrađuje informaciju dobijenu od mernog objekta i na izlazu daje mernu informaciju koja se može registrovati. Istu mernu informaciju prima i sistem za upravljanje (5).
- On na osnovu unapred određenog mernog postupka određuje da li se merni postupak ponavlja ili ne.
- Sve vreme odvijanja mernog procesa sistem za upravljanje kontroliše održavanje radnih uslova u predviđenom radnom prostoru (6).

### 1.3.3. Merni proces

- Po završetku mernog procesa dalji postupak može biti:
  - ponovno merenje,
  - nastavljanje merenje za sledeću tačku,
  - završetak merenja.
- Merni proces može biti:
  - manuelan,
  - poluautomatizovan,
  - automatizovan.
- Za merni proces bitne su i uticajne veličine.
- To su veličine koje nisu predmet merenja ali mogu da utiču na rezultat merenja, odnosno na vrednost merene veličine ili na pokazivanje mernog sredstva.
- Tačnije merenje zahteva veću kontrolu uticajnih veličina.

### 1.3.3. Merni proces

- Najvažnije uticajne veličine su:
  - Temperatura ambijenta – utiče praktično na sve karakteristike materijala od kojih su napravljeni merni uređaji i pribor. Definišu se referentne temperature za merenja u metrološkim laboratorijama ( $23^{\circ}\text{C}\pm 2$ ).
  - Vlažnost vazduha – manje važna od temperature ali se mora održavati u određenim granicama zbog opreme koja se koristi. Granice su tipično 45%-75%.
  - Elektromagnetno polje – ima poseban uticaj kod merenja električnih veličina. Uticaj se smanjuje oklapanjem (Faradejev kavez).
- Često se traži da napon napajanja bude stabilan po amplitudi, talasnom obliku i frekvenciji. Često se ove karakteristike propisuju.

## 1.3.4. Merni postupci

- Važno je istaći da postoje samo 4 električne veličine koje se mogu detektovati, odnosno direktno meriti. To su:
  - električni napon,
  - električna struja,
  - električna snaga,
  - električna energija (merenjem električne snage i vremenskog intervala)
- Sve ostale električne veličine mogu se meriti merenjem ovih veličina.

## 1.3.4. Merni postupci

- Na osnovu ovoga, merni postupci se mogu svrstati u 3 grupe:
  1. Merenje električnih karakteristika signala. Mere se električne promenljive veličine: napon, struja, snaga, frekvencija, faza,... (Direktna merenja).
  2. Merenje električnih karakteristika komponenti. Mere se električne karakteristike koje imaju karakter parametara: otpornost, induktivnost, kapacitivnost, impedansa, provodnost. (Indirektna merenja).
  3. Merenje električnih karakteristika sistema. Tu spadaju veličine važne za određivanje karakteristika celog sistema: merenje pojačanja, harmonici, nelinearna izobličenja, frekventne karakteristike, odziv sistema.

## 1.3.4. Merni postupci

- Od osobina ulazne veličine zavisi kakvo će biti merenje.
- Ako se na ulaz mernog uređaja dovodi veličina koja je u vremenskom domenu konstantna, tada je i izlaz konstantan. To su statička merenja.
- Ako se dovodi veličina koja se sporo menja u vremenu to su kvazi-statička merenja.
- Ako se dovodi veličina koja se menja u vremenskom domenu to su dinamička merenja.
- Važno je za konkretan slučaj odabrati odgovarajući merni uređaj.
- Promenljive veličine mogu biti sporo promenljive, brzo promenljive, impulsne, ...

## 1.3.5. Merne metode

- Merna metoda je skup teorijskih i praktičnih postupaka koji su uključeni u izvođenje merenja u skladu sa usvojenim postupcima merenja.
- Merni rezultat je rezultat realizacije primene određene merne metode i predstavlja brojnu vrednost merene veličine.
- Specifikacija merne metode mora da sadrži:
  - potrebne standarde,
  - mernu opremu i pribor,
  - način njihovog povezivanja (merna šema),
  - uslove pod kojima se obavlja merenje,
  - postupak obrade rezultata merenja da bi se mogla odrediti tačnost merenja.

## 1.3.5. Merne metode

- Postoji više podela mernih metoda.
- Prva podela je prema načinu određivanja merne veličine:
  - direktne metode,
  - indirektne metode
- Druga podela je prema načinu na koji se određuje brojna vrednost merene veličine (način očitavanja):
  - metode neposrednog ocenjivanja,
  - metode poređenja.
- Metode poređenja mogu biti:
  - nulte metode,
  - diferencijalne metode,
  - metode zamene,
  - metode direktnog poređenja.

## 1.4. Merna sredstva

- To su sredstva za obavljanje mernog procesa.
- Merno sredstvo mora imati tačno definisane karakteristike.
- One moraju biti stabilne u toku vremena, pa se zato moraju periodično proveravati.
- Prema ulozi u mernom procesu merna sredstva se dele na:
  - merni pribor
  - merne instrumente,
  - merne pretvarače.

## 1.4. Merna sredstva

- Prema principu rada ili načinu dobijanja i prikazivanja merne informacije merna sredstva mogu se podeliti na:
  - merna sredstva sa direktnim očitavanjem,
  - sabirna merna sredstva,
  - integratorska merna sredstva,
  - registrujuća merna sredstva,
  - analogna merna sredstva i
  - digitalna merna sredstva.

## 1.4. Merna sredstva

- Merni instrument koji pokazuje vrednost merene veličine ili vrednost koja je sa merenom veličinom u vezi naziva se pokazni merni instrument.
- Merni instrument koji beleži stalno ili povremeno vrednost merene veličine naziva se registrujući merni instrument (na primer tahograf).
- Sabirna merna sredstva određuju vrednost merene veličine sabiranjem parcijalnih vrednosti te veličine, koje se dobijaju istovremeno ili jedna za drugom iz jednog ili više izvora. Na primer to su vodomeri, plinomeri, šinska vaga i sl.
- Integratorsko merno sredstvo određuje vrednost merene veličine integracijom jedne veličine u funkciji druge veličine. Na primer brojilo električne energije ili brojilo toplotne energije.

## 1.4.1. Merni pribor

- Merni pribor može da se podeli na:
  - Merni pribor koji reprodukuje samo jednu vrednost fizičke veličine (etaloni otpora, kapaciteta, induktivnosti, elektromotorne sile, šantovi, ...)
  - Merni pribor koji može reprodukovati više vrednosti fizičke veličine (dekade otpora, kapaciteta, stabilisani izvor...)
- Dva su osnovna tipa mernih pribora:
  - Aktivni elementi (daju energiju). To su izvori, oscilatori, generatori.
  - Pasivni elementi (primaju energiju). To su R, L i C elementi u kolu.

## 1.4.2. Merni instrumenti

- Merni instrumenti su merna sredstva koja mere jednu ili više fizičkih veličina u određenom mernom opsegu.
- Ima više različitih podela mernih instrumenata.
- Prema načinu obrade mernog signala dele se na:
  - Analogne (Izlazni signal, odnosno pokazivanje je kontinualna funkcija ulaznog signala. U svakom trenutku postoji direktna veza ulaza i izlaza).
  - Digitalne (Ulazni signal se digitalizuje (sempluje), obrađuje u mikroprocesoru, a zatim se prikazuje rezultat. Kod njih nema kontinualnosti).
- Prema principu rada dele se na:
  - Električne merne instrumente
  - Elektronske merne instrumente

## 1.4.2. Merni instrumenti

- Električni merni instrumenti koriste određena električna dejstva koja su posledica proticanja električne struje ili dejstva napona.
- Najčešće se koriste:
  - Elektromehaničko dejstvo, kao posledica elektromehaničke ili elektrostatičke sile
  - Termičko dejstvo, kao posledica zagrevanja.
- Ovi instrumenti su analogni.
- Izlazni signal je kontinualna funkcija merene veličine.
- Indikator merene vrednosti je skala sa kazaljkom.
- Vrednost merene veličine proporcionalna je otklonu kazaljke.
- Instrumenti su autonomni. Ne treba im poseban izvor napajanja.

## 1.4.2. Merni instrumenti

- Elektronski merni instrumenti se sastoje od elektronskih modula u kojima se vrši prilagođenje i obrada ulaznog signala (merene veličine).
- Izlazni signal koji se dovodi na indikator uvek je jednoznačna funkcija ulazne merene veličine.
- Elektronski moduli su delila napona, usmerače, pojačavači, AD konvertori itd...
- Postoje dva tipa ovih instrumenata:
  - Analogni (Izlazni signal je kontinualna funkcija ulaznog signala. Kod njih je indikator skala sa kazaljkom.)
  - Digitalni (Kod njih se vrši digitalizacija ulaznog signala i njegova računarska obrada. Kod njih je indikator u obliku displeja. Moraju imati svoje napajanje.)

### 1.4.3. Merni pretvarači

- Merni pretvarač je merno sredstvo koje daje izlaznu veličinu u datom odnosu sa ulaznom veličinom.
- Merni pretvarači nisu neophodni za merenje električnih veličina, ali su nezaobilazni u merenjima neelektričnih veličina električnim putem.
- Njihova osnovna funkcija je da pretvaraju neelektričnu veličinu u električnu jednoznačno, tako da se njena vrednost može izmeriti električnim putem.
- Mogu biti i analogni i digitalni.

## 1.5. Metrološke karakteristike mernih sredstava

- Za svako merno sredstvo daje se detaljna specifikacija njegovih metroloških karakteristika.
- Metrološke karakteristike mernog sredstva su skup kvalitativnih i kvantitativnih pokazatelja mogućnosti i ograničenja mernog sredstva.
- Metrološke karakteristike daje proizvođač.
- Ove karakteristike je potrebno poznavati pri komercionalnoj nabavci i pri upotrebi.
- Za merno sredstvo daje se čitav niz metroloških karakteristika.
- Generalno, karakteristike mernog sredstva mogu se podeliti u tri grupe:
  - Upotrebne karakteristike,
  - Statičke karakteristike,
  - Dinamičke karakteristike.

## 1.5.1. Upotrebne karakteristike

- Njima se definišu radni uslovi (uslovi okoline) u kojima se merno sredstvo može koristiti, a da se pri tome zadrže sve metrološke karakteristike u deklarisanim granicama.
- Najvažniji su:
  - Normalni uslovi rada
  - Granični uslovi
  - Referentni uslovi
  - Merni opseg
- Normalni uslovi rada su uslovi određeni od strane proizvođača za koje on garantuje da će metrološke karakteristike mernog sredstva biti unutar granica koje je dao proizvođač.
- Na primer, to su temperatura okoline, vlažnost vazduha, nivo stranih uticaja, položaj pri radu, ...)

## 1.5.1. Upotrebne karakteristike

- Granični uslovi su ekstremni uslovi koje merno sredstvo mora izdržati bez oštećenja i degradacije svojih metroloških karakteristika, za kasniju upotrebu u normalnim uslovima.
- Ovi uslovi su posebno važni zbog uslova čuvanja, skladištenja i transporta mernog sredstva.
- Na primer za električno indukciono brojilo prema temperaturi okoline:
  - radni uslovi su od  $-25^{\circ}\text{C}$  do  $+45^{\circ}\text{C}$ , a
  - granični od  $-40^{\circ}\text{C}$  do  $+50^{\circ}\text{C}$
- Referentni uslovi su uslovi propisani za postupak provere metroloških karakteristika tj. kalibraciju. Obično su jednaki normalnim uslovima ali nije pravilo.

## 1.5.1. Upotrebne karakteristike

- Merni opseg je skup vrednosti merene veličine za koji je greška merenja mernog sredstva unutar propisanih granica.
- Izražava se u jedinicima merene veličine i obično je određen svojom donjom i gornjom granicom. Na primer (0 – 5 A), (0 – 100 V).
- Neka merna sredstva mogu imati više mernih opsega.
- Merni opseg se različito definiše za analogne i digitalne instrumente.
- Kod analognih instrumenata sa skalom i kazaljkom definiše se:
  - Pokazni opseg – cela dužina skale na kojoj se može posmatrati kretanje kazaljke.
  - Merni opseg – deo pokaznog opsega (skale) na kome se merenje vrši sa deklarisanom tačnošću.
- Često se ova dva opsega preklapaju ali nije pravilo. Generalno je merni opseg manji ili jednak pokaznom opsegu.

## 1.5.1. Upotrebne karakteristike

- Kod digitalnih instrumenata merni opseg je u principu određen brojem punih digita (digita koji uzimaju vrednosti od 0 do 9).
- Na primer kod instrumenta sa 4 puna digita maksimalno pokazivanje je 9999. Tako ako je opseg instrumenta npr. 100 V, on maksimalno može pokazati 99.99 V.
- Novi instrumenti pored punih imaju i parcijalne digite zbog proširenja opsega. Parcijalni digiti su obično na mestu prvog digita.
- Parcijalni digit obično može pokazivati samo 0 i 1 ili 0, 1 i 2.
- Generalno, ako je instrument deklarisan sa “n” digita tada svih n digita mogu imati vrednosti od 0 do 9. Ako je deklarisan sa “n1/2” onda instrument ima jedan parcijalni digit i n punih.

## 1.5.2. Statičke karakteristike

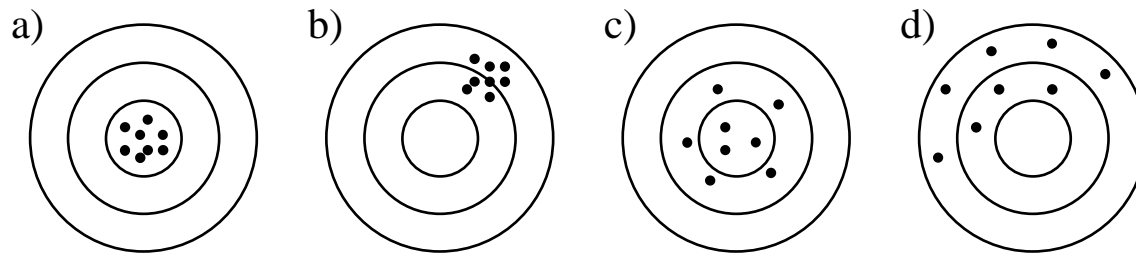
- Definišu se za slučaj merenja veličina koje su konstantne ili sporo promenljive.
- One se proveravaju statičkom kalibracijom koja se svodi na priključenje poznatog konstatnog signala i posmatranje dobijenog odziva.
- Definišu se sledeće karakteristike:
  - tačnost mernog sredstva,
  - precizost mernog sredstva,
  - razlaganje mernog sredstva,
  - linearnost mernog sredstva,
  - osetljivost mernog sredstva,
  - pokretljivost mernog sredstva,
  - prag pokretljivosti mernog signala,
  - stabilnost mernog sredstva,
  - ponovljivost mernog sredstva,
  - histerezis mernog sredstva,
  - mrtva zona mernog sredstva
  - ulazna impedansa mernog sredstva.

## 1.5.2. Statičke karakteristike

- Tačnost mernog sredstva je sposobnost mernog sredstva da pokazuje vrednosti bliske pravoj (tačnoj) vrednosti merene veličine.
- Tačna vrednost je uvek nepoznata. Uvek postoji greška. Zato se koristi termin “dogovorena tačna vrednost merene veličine”.
- Dogovorena tačna vrednost se određuje na dva načina:
  - Merenjem pomoću znatno tačnijeg mernog sredstva (etalona),
  - Višestrukim ponavljanjem merenja za iste vrednosti merene veličine i statističkom obradom rezultata tih merenja.
- Preciznost mernog sredstva je sposobnost mernog sredstva da za iste vrednosti ulaznog signala daje iste vrednosti izlaznog signala.
- Preciznost nije mera tačnosti, ali može ukazati na neku sistematsku grešku mernog sredstva.
- Važno je reći da tačnost i preciznost zavise od sistematskih i slučajnih grešaka, respektivno.

## 1.5.2. Statičke karakteristike

- Obe ove karakteristike se procenjuju odvojeno. Tačnost kalibracijom (overom) mernog sredstva, a preciznost statističkom analizom pokazivanja mernog sredstva.
- Ove dve karakteristike se mogu ilustrovati primerom gađanja u metu:



- a) Tačno i precizno – nema sistematske greške,
- b) Netačno ali precizno – precizno ali sa izrazitom sistematskom greškom,
- c) Tačno ali neprecizno – bez sistematske greške ali sa velikim rasipanjem koje je posledica slučajne greške,
- d) Netačno i neprecizno – postoji i sistematska i slučajna greška.

## 1.5.2. Statičke karakteristike

- Razlaganje mernog sredstva je kvantitativni pokazatelj sposobnosti mernog sredstva da jasno razlučuje veoma bliske vrednosti merene veličine.
- Kod analognih instrumenata ona je jednaka najmanjem podeoku na skali, a kod digitalnih vrednosti jedinice poslednjeg digita.
- Linearnost mernog sredstva. Teži se kad god je to moguće, da izlazni signal bude linearna funkcija ulaznog signala. Često to nije moguće.
- Osetljivost mernog sredstva je odnos promene odziva mernog sredstva i odgovarajuće promene ulaznog signala. Jednačina je:

$$K = \frac{\Delta Y}{\Delta X}, \text{ odnosno } K = \frac{dy}{dx};$$

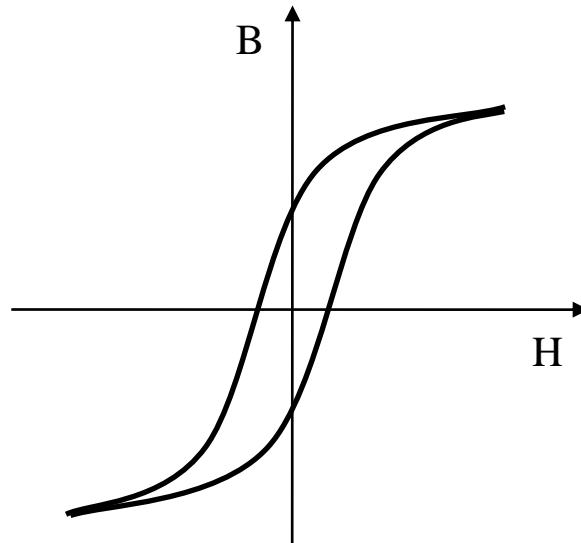
- Za linearna merna sredstva ona je konstantna za ceo merni opseg. Za nelinearna merna sredstva ona se menja u funkciji merene vrednosti.

## 1.5.2. Statičke karakteristike

- Pokretljivost mernog sredstva je sposobnost mernog sredstva da odgovori na minimalne promene ulaznog signala.
- Prag pokretljivosti mernog signala je minimalna vrednost ulaznog signala koja izaziva uočljivu promenu izlaznog signala.
- Stabilnost mernog sredstva je sposobnost mernog sredstva da svoje metrološke karakteristike održava konstantnim. Obično se posmatra u odnosu na vreme ali može i u odnosu na neku drugu veličinu, na primer temperaturu.
- Ponovljivost mernog sredstva je sposobnost mernog sredstva da za iste vrednosti ulaznog signala daje bliske vrednosti izlaznog signala, u određenim definisanim uslovima upotrebe.

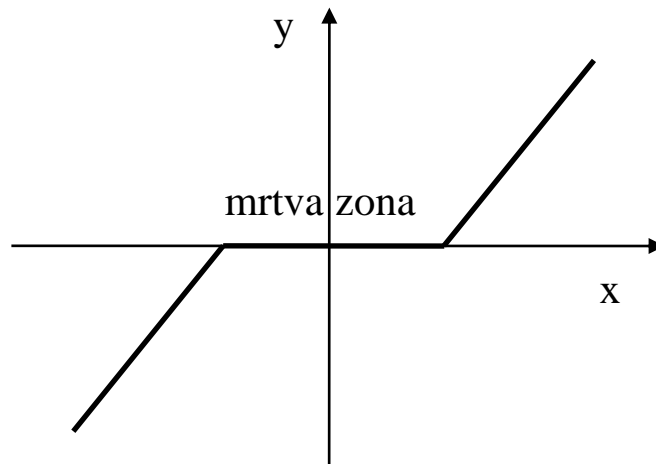
## 1.5.2. Statičke karakteristike

- Histerezis mernog sredstva je osobina da odziv mernog sredstva na dati ulazni signal zavisi od načina promene ulaznog signala. Drugim rečima histerezis dovodi do neponovljivog pokazivanja instrumenta u zavisnosti od načina promena ulazne veličine pri merenju.



## 1.5.2. Statičke karakteristike

- Mrtva zona je područje između dve vrednosti ulazne veličine kada nema nikakve promene izlazne veličine.



## 1.5.2. Statičke karakteristike

- Ulazna impedansa mernog sredstva je odnos napona na priključcima mernog sredstva i struje koja protiče kroz njega.
- Ona predstavlja kompleksno opterećenje koje se uključuje u merno kolo između tačaka u kojima se priključuje merno sredstvo.
- Na primer, kod voltmetra treba da bude što veća, a kod ampermetra što manja.
- Generalno, treba da je takva da unosi što manje promene u mernom kolu kada se na njega veže merno sredstvo, u odnosu na stanje pre vezivanja.

### 1.5.3. Dinamičke karakteristike

- Dinamičke karakteristike pokazuju ponašanje mernog sredstva nakon što se merena veličina promenila pa do trenutka kada se na izlazu ponovo uspostavi stacionarno stanje.
- One su važne za merenje vremenski promenljivih veličina.
- Neophodno ih je poznavati da bi se znalo da li se neka veličina može izmeriti posmatranim mernim sredstvom.
- Iz tog razloga uvek se formira matematički model mernog sredstva koji daje vezu između njegovog ulaza i izlaza.
- U opštem slučaju dovoljno tačan model je linearna diferencijalna jednačina sa konstantnim koeficijentima.

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 x$$

gde je  $x$  ulazni signal,  $y$  izlazni signal,  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n, b_0$  fizički parametri mernog sredstva.

### 1.5.3. Dinamičke karakteristike

- Zavisno od reda diferencijalne jednačine koja opisuje merno sredstvo određuje se red mernog sredstva.
- Tako se može govoriti o mernim sredstvima nultog reda, prvog reda, drugog reda itd.
- Da bi se mogla upoređivati različita merna sredstva na ulaz se dovode promene merene veličine u formi tipičnih ispitnih funkcija.

### 1.5.3. Dinamičke karakteristike

- Ulazni signali kojima se ispituju dinamičke karakteristike su:
  - odskočna (Hevisajdova) funkcija

$$x = \begin{cases} X_1, t \leq 0, X_2 > X_1 \\ X_2, t > 0 \end{cases} \quad x = \begin{cases} 0, t \leq 0 \\ X, t > 0 \end{cases}$$

- nagibna funkcija

$$x(t) = kt$$

- sinusna (harmonijska) funkcija

$$x = X \sin \omega t$$

- Osim navedenih funkcija upotrebljavaju se impulsna Dirakova funkcija, eksponencijalna, troglasta (testerasta) i četvrtasta.
- Dinamički odziv mernog sredstva je ponašanje izlazne veličine ( $y$ ) u vremenu nakon što se ulazna veličina ( $x$ ) promenila u formi neke tipične funkcije.

### 1.5.3. Dinamičke karakteristike

- Merna sredstva nultog reda ( $n = 0$ ) opisuje jednačina:

$$a_0 y = b_0 x$$

pa je:

$$y = \frac{b_0}{a_0} x$$

- Vidi se da je izlazni signal linearna funkcija ulaznog signala. Konstanta proporcionalnosti

$$S = \frac{b_0}{a_0}$$

naziva se statička osetljivost, a njena recipročna vrednost

$$K = \frac{1}{S} = \frac{a_0}{b_0}$$

naziva se konstanta mernog sredstva.

### 1.5.3. Dinamičke karakteristike

- Merna sredstva prvog reda ( $n = 1$ ) opisuje jednačina:

$$a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 x$$

odnosno:

$$\frac{a_1}{a_0} \frac{dy}{dt} + y = \frac{b_0}{a_0} x$$

- Ovde, kao i u prethodnom slučaju, konstanta proporcionalnosti

$$S = \frac{b_0}{a_0}$$

predstavlja statičku osetljivost.

- Odnos

$$\tau = \frac{a_1}{a_0}$$

ima dimenziju vremena i naziva se vremenska konstanta mernog sistema.

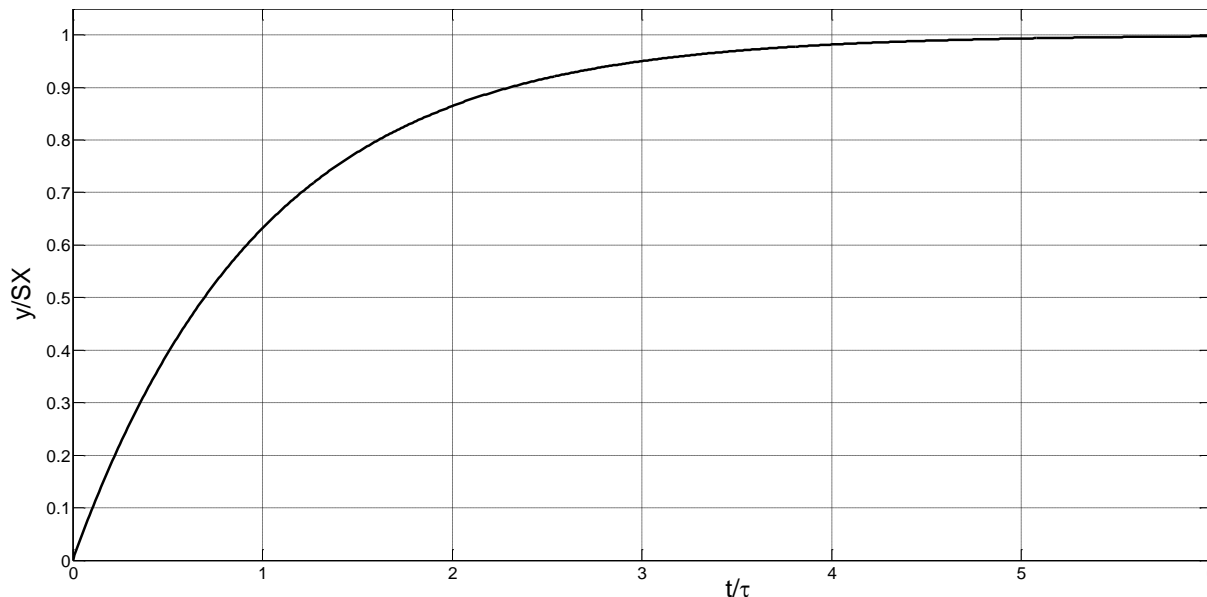
## 1.5.3. Dinamičke karakteristike

- Uvođenjem ovih veličina, jednačina odziva može se napisati u obliku:

$$\tau \frac{dy}{dt} + y = Sx$$

- Ako bi se na ulazu imala Hevisajdovu funkciju na izlazu bi se imao odziv:

$$y(t) = SX \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$



### 1.5.3. Dinamičke karakteristike

- Merna sredstva drugog reda ( $n = 2$ ) opisuje jednačina:

$$a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 x$$

odnosno:

$$\frac{a_2}{a_0} \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{a_1}{a_0} \frac{dy}{dt} + y = \frac{b_0}{a_0} x$$

- I u ovom slučaju mogu se definisati parametri:
  - statička osetljivost

$$S = \frac{b_0}{a_0}$$

- vremenska konstanta

$$\tau = \frac{a_1}{a_0}$$

### 1.5.3. Dinamičke karakteristike

- Novi parametri sada su:
  - prirodna (sopstvena) učestanost

$$\omega_n = \sqrt{\frac{a_0}{a_2}}$$

- faktor prigušenja

$$\xi = \frac{a_1}{2\sqrt{a_0 a_2}}$$

- Uz uvedene parametre jednačina odziva postaje

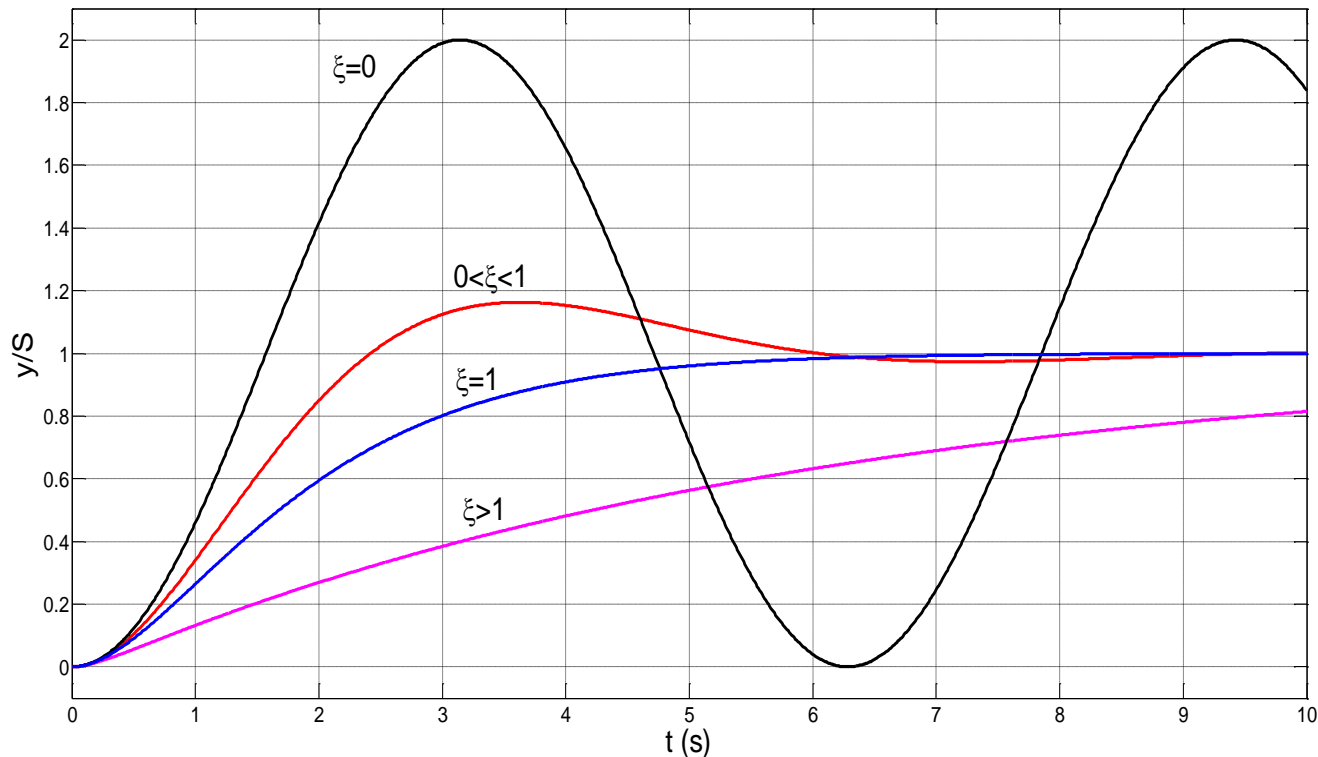
$$y'' + 2\xi\omega_n y' + \omega_n^2 y = S\omega_n^2 x$$

- Ako bi se na ulaz dovela jedinična Hevisajdova funkcija, na izlazu bi se dobio odziv

$$y(t) = S \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\omega_n t} \sin\left(\omega_n \sqrt{1-\xi^2} t + \theta\right) \right] \quad \theta = \arccos(\xi)$$

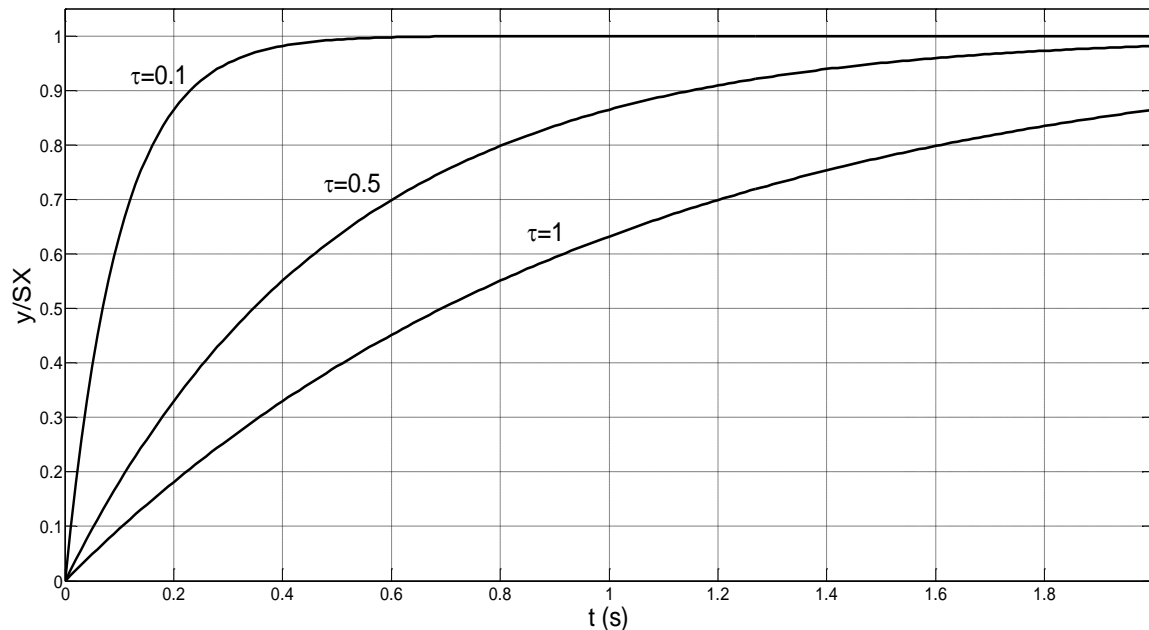
## 1.5.3. Dinamičke karakteristike

- Za ovakav ulazni signal (Hevisajdova funkcija) dobijaju se prigušene oscilacije ili pseudoperiodičan odziv.
- Priroda odziva mernog sredstva drugog reda na Hevisajdovu funkciju zavisi od faktora prigušenja.



## 1.5.3. Dinamičke karakteristike

- Svaka od dinamičkih karakteristika ima svoju posebno značenje i ulogu.
- Prva dinamička karakteristika je vremenska konstanta  $\tau$ . Ona određuje vreme odziva mernog sredstva.
- Ova dinamička karakteristika pokazuje brzinu kojom neko merno sredstvo odgovara na ulazni signal.



### 1.5.3. Dinamičke karakteristike

- Druga dinamička karakteristika, prirodna učestanost predstavlja periodu oscilovanja sistema u slučaju nultog prigušenja ( $\zeta = 0$ ).
- Može se zaključiti da je ova učestanost sakrivena u sistemu, ona je ugrađena u njega, njemu prirodna, i zato se naziva neprigušena prirodna učestanost ili samo prirodna učestanost.
- Treća dinamička karakteristika, faktor prigušenja  $\zeta$ , određuje da li će doći do oscilovanja izlaznog signala.
- Ako je  $\zeta < 1$  dolazi do oscilovanja. Ovaj faktor određuje i trajanje oscilacija.
- Za  $\zeta = 0$  one traju beskonačno, odnosno ne prigušuju se.
- Za  $\zeta > 1$  odziv je pseudoperiodičan.

## 1.6. Etaloni

- Standardi električnih veličina (etaloni) su merna sredstva vrlo visoke tačnosti. Od njih u najvećoj meri zavisi tačnost postupka merenja.
- Osnovna namena je za proveru tačnosti drugih elemenata, odnosno uređaja. Često se koriste i za vrlo tačna i precizna merenja.
- Uglavnom se rade etaloni (standardi) za osnovne električne veličine i parametre kao što su:
  - struja
  - napon,
  - otpor,
  - kapacitivnost,
  - induktivnost i
  - međusobna induktivnost.

## 1.6. Etaloni

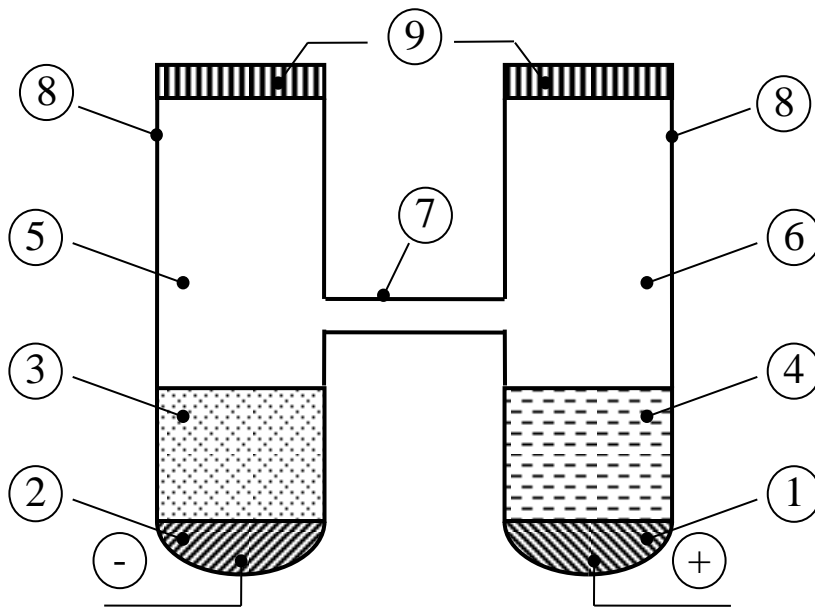
- Etaloni se dele na tri osnovne grupe:
  - primarni etaloni,
  - sekundarni etaloni i
  - referentni etaloni.
- Primarni etaloni su merni elementi ili uređaji najviše klase tačnosti. Oni se koriste isključivo za proveru etalona manje tačnosti. Ima ih malo u svetu. Nalaze se u laboratorijama međunarodnog značaja.
- Sekundarni etaloni su manje tačnosti od primarnih etalona. Overavaju se pomoću primarnih etalona. Služe za overu manje tačnih etalona. Obično se nalaze u laboratorijama nacionalnog značaja.
- Referentni etaloni su vrsta sekundarnih etalona koji se koriste za overu etalona niže tačnosti tzv. radnih etalona koji se koriste za overu standardnih mernih uređaja. Nalaze se u laboratorijama nacionalnog značaja.
- Zakonska regulativa propisuje periodičnost provere karakteristika etalona kao i metode provere.

## 1.6.1. Etaloni napona

- Merni proces se ne može zamisliti bez izvora napajanja.
- Izvori se mogu koristiti za napajanje merne šeme ali i za dobijanje pomoćnih napona koji su neophodni kod nekih mernih metoda.
- Kao izvori jednosmernog napona koriste se galvanski elementi, akumulatori, poluprovodnički stabilisani ispravljači.
- Kao izvori naizmjeničnog napona koristi se električna mreža preko regulacionih transformatora, generatori naizmjenične struje i razni elektronski izvori kao što su funkcijski generatori, sinusni oscilatori, signal generatori, itd.
- U mernoj tehnici posebno su važni etaloni napona, odnosno izvori čiji je napon tačno poznat i ne menja se sa vremenom.
- Kao etaloni napona u mernoj tehnici koriste se Vestonov element i etalon napona sa Zener diodama.

## 1.6.1. Etaloni napona

- Vestonov element je etalon napona koji je napravljen na osnovu karakteristika nekih hemijskih materijala. Poprečni presek dat je na slici.



- 1 - pozitivna elektroda - živa ( $\text{Hg}$ )
- 2 - negativna elektroda - amalgam kadmijuma ( $\text{HgCd}$ )
- 3 - sloj čvrstih kristala kadmijum sulfata ( $\text{CdSO}_4$ )
- 4 - sloj testa od sulfata žive ( $\text{Hg}_2\text{SO}_4$ )
- 5 - voda ( $\text{H}_2\text{O}$ ), koja prodire između kristala ( $\text{CdSO}_4$ )
- 6 - zasićen rastvor kadmijum sulfata ( $\text{CdSO}_4$ )
- 7 - tanka cevčica, preko koje se ostvaruje galvanska veza između komora
- 8 - stakleni sud
- 9 - čepovi

## 1.6.1. Etaloni napona

- Nominalna vrednost elektromotorne sile pri temperaturi 20°C je:

$$E_{20} = E_W = 1.01865 \text{ V} \approx 1.019 \text{ V}$$

- Dozvoljena struja Vestonovog elementa je:

$$I_{dozv} \leq 1 \cdot 10^{-6} \text{ A} = 1 \mu\text{A}$$

- Prema tome unutrašnji otpor je reda:

$$R_W = \frac{E_W}{I_{dozv}} = \frac{1.019}{1 \cdot 10^{-6}} \cong 1.019 \text{ M}\Omega$$

- Napon Vestonovog elementa se malo menja sa temperaturom.

$$E_t = E_{20} - 4.06 \cdot 10^{-5} (t - 20) - 0.95 \cdot 10^{-6} (t - 20)^2 + 10^{-8} (t - 20)^3$$

## 1.6.1. Etaloni napona

- Dozvoljena kratkotrajna struja preopterećenja je približno  $10 \mu\text{A}$ , a da bi se posle toga uspostavila normalna elektromotorna sila treba da prođe nekoliko časova.
- Vek trajanja im je 10–15 godina, pošto je godišnja promena elektromotorne sile reda nekoliko  $\mu\text{V}$ .
- Nedostatak Vestonovog elementa je što ne sme da se optereti većim strujama.
- On se uglavnom upotrebljava u mernim šemama kod kojih za vreme merenja element nije opterećen.
- Jedna od stadardnih primena Vestonovog elementa je kod kompenzatora (kompenzacione metode).

## 1.6.1. Etaloni napona

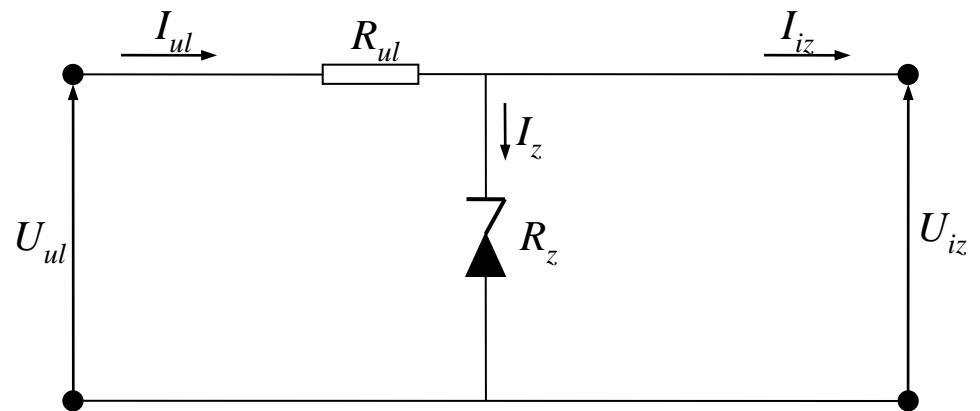
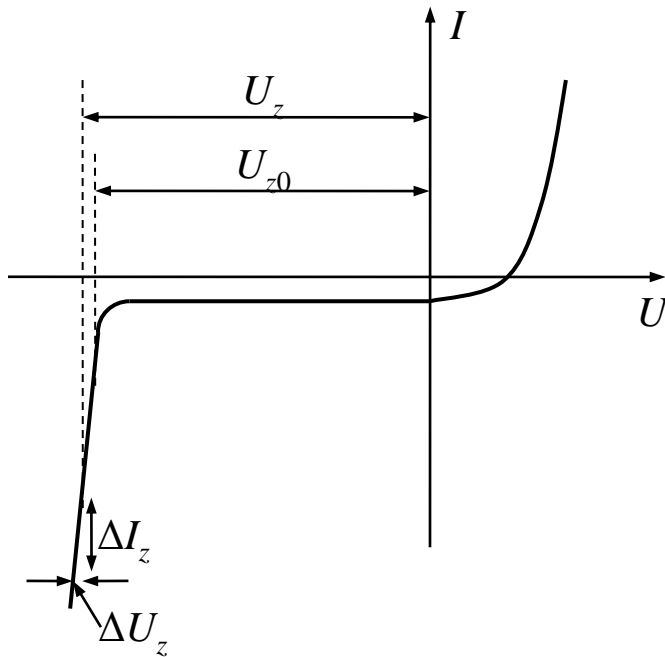
- U novije vreme sve se više koristi etalon napona sa Zener diodom.
- Zener diode su poluprovodničke diode koje se u propusnom smeru ponašaju kao i obične diode. Međutim, u nepropusnom području u početku, struja sasvim slabo raste da bi kod određenog napona (Zenerov napon) struja naglo porasla.
- Zenerov napon može da iznosi od 1 V do nekoliko desetina volti. Zenerov napon je vremenski vrlo stalan.
- Otpor Zener diode definiše se kao:

$$R_z = \frac{\Delta U_z}{\Delta I_z}$$

- Ovaj otpor definiše strminu karakteristike u Zenerovom području. Ovaj otpor može imati vrednosti od 0.5  $\Omega$  do 150  $\Omega$ .

## 1.6.1. Etaloni napona

- Na prvoj slici je prikazana karakteristika Zener diode, a na drugoj principijelna šema stabilizatora sa Zener diodom.



## 1.6.1. Etaloni napona

- Da bi izlazni napon bio konstantan potrebno je da relativnoj promeni ulaznog napona odgovara što manja promena izlaznog napona, odnosno potrebno je da bude što veći faktor stabilizacije.
- Faktor stabilizacije  $S$  definiše se kao odnos relativne promene ulaznog napona i odgovarajuće relativne promene izlaznog napona:

$$S = \frac{\Delta U_{ul}}{U_{ul}} : \frac{\Delta U_{iz}}{U_{iz}} = \frac{\Delta U_{ul}}{\Delta U_{iz}} \cdot \frac{U_{iz}}{U_{ul}}$$

- Ako se želi postići veći faktor stabilizacije spaja se jedan sa drugim više stepena sa faktorima stabilizacije  $S_1, S_2, \dots, S_n$ . Tada je ukupan faktor stabilizacije jednak:

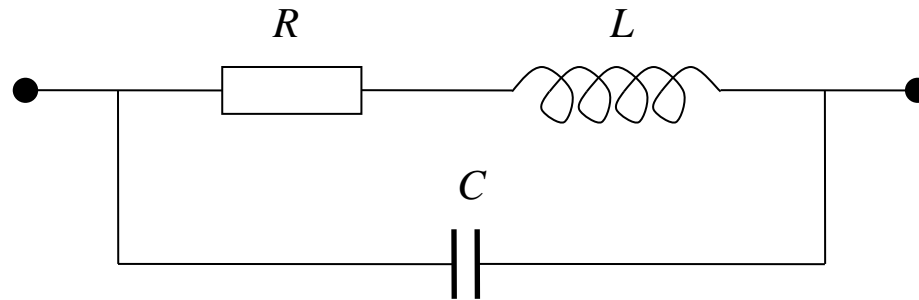
$$S = S_1 \cdot S_2 \cdots S_n$$

## 1.6.2. Merni otpornici

- Merni otpornici, kondenzatori i prigušnice imaju široku primenu u mnogim merenjima i mernim metodama.
- Od njih se traži da imaju konstantne karakteristike dugi niz godina i da njihovi parametri što manje zavise od temperature okoline.
- Merni otpornici treba da imaju što „čistiji” aktivni otpor, odnosno da imaju što manje primese induktiviteta i kapaciteta.
- Takođe, od njih se zahteva da imaju što manji temperaturni koeficijent otpora, zanemarljiv termoelektrični napon prema bakru i naravno što veći specifični otpor.
- Merni otpornici najčešće se prave od manganina (legura 84% Cu, 12% Mn, 4% Ni).
- Manganin ima praktično zanemarljivu vrednost temperaturnog koeficijenta otpora.
- Specifični otpor manganina je  $\rho=0.43 \text{ } \Omega\text{mm}^2/\text{m}$  (poređenja radi za bakar  $\rho=0.0172 \text{ } \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ ).

## 1.6.2. Merni otpornici

- Prolaskom struje kroz otpornik unutar i van njega nastaje magnetno polje tako da svaki otpornik ima i određenu induktivnost.
- Pošto između navoja vlada potencijalna razlika koja stvara električno polje i veže električno naelektrisanje to svaki otpornik ima i određeni kapacitet.
- Ekvivalentna šema otpornika data je na slici.



## 1.6.2. Merni otpornici

- Impedansa električnog kola sa slike je:

$$\underline{Z} = \frac{\frac{R + j\omega L}{j\omega C}}{R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} = R \frac{1 + j\omega \left[ \frac{L}{R} (1 - \omega^2 LC) - RC \right]}{(1 - \omega^2 LC)^2 + \omega^2 R^2 C^2}$$

- Kod mernih otpornika (etalona) fazni pomak ima uglavnom malu vrednost pa važi da je:

$$\phi \cong \text{tg } \phi = \frac{\text{Im}\{\underline{Z}\}}{\text{Re}\{\underline{Z}\}} = \omega \left[ \frac{L}{R} (1 - \omega^2 LC) - RC \right] = \omega \tau$$

gde je  $\tau$  vremenska konstanta otpornika

$$\tau = \frac{L}{R} (1 - \omega^2 LC) - RC$$

## 1.6.2. Merni otpornici

- Na niskim frekvencijama važi da  $\omega^2 LC \ll 1$  je pa izraz za vremensku konstantu postaje:

$$\tau = \frac{L}{R} - RC$$

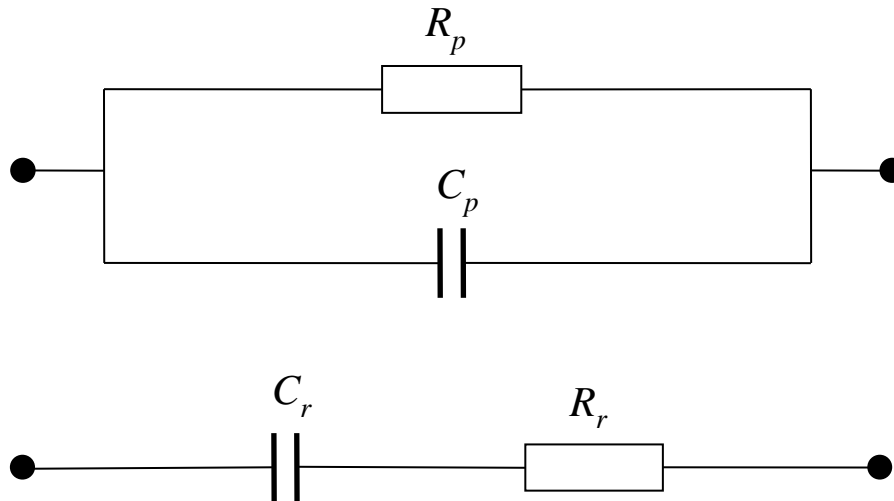
- Otpornici sa otpornošću manjom od  $0.1 \Omega$  izrađuju se od manganinskog lima, a sa otpornošću većom od  $0.1 \Omega$  od manganinske žice.
- Za otpornike sa otpornošću manjom od  $10 \Omega$  primenjuje se bifilarni namotaj, a za otpornike veće otpornosti primenjuju se posebne vrste namotaja.
- Vremenska konstanta bifilarno namotanog otpornika računa se kao:

$$\tau = \frac{L'}{R'} - \frac{1}{3} R' C' l^2$$

gde su  $R'$ ,  $L'$  i  $C'$  podužne vrednosti otpora, induktivnosti i kapacitivnosti, a  $l$  dužina namotaja.

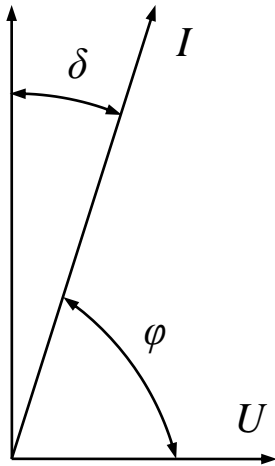
### 1.6.3. Merni kondenzatori

- Merni kondenzatori treba da imaju što „čistiji” kapacitet, odnosno da imaju veliki izolacioni otpor između elektroda.
- Takođe, potrebno je da njihov kapacitet bude konstantan i nezavisan od temperature, frekvencije i napona.
- Ekvivalentna šema kondenzatora može se predstaviti serijskom ili paralelnom vezom kapaciteta i otpora kao što je prikazano na slikama.



### 1.6.3. Merni kondenzatori

- Fazorski dijagram napona i struja kondenzatora dat je na slici.



- Sa dijagrama se vidi da fazni pomeraaj između napona i struje nije  $90^\circ$  već je manji zbog gubitaka. Važi:

$$\varphi = 90^\circ - \delta$$

- Ugao gubitaka, odnosno tangens ugla gubitaka računa se kao:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega R_p C_p} = \omega R_s C_s$$

gde su  $R_p$  i  $C_p$  vrednosti otpornosti i kapacitivnosti iz paralelne, a  $R_s$  i  $C_s$  iz redne ekvivalentne šeme.

### 1.6.3. Merni kondenzatori

- Veze između parametara redne i paralelne ekvivalentne šeme date su izrazima:

$$C_s = C_p (1 + \operatorname{tg}^2 \delta)$$

$$R_s = R_p \frac{\operatorname{tg}^2 \delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}$$

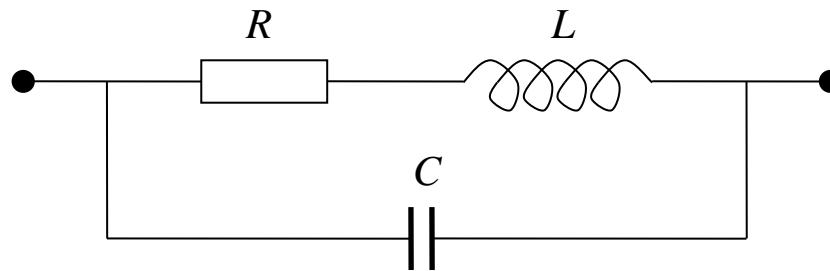
- Snaga gubitaka u kondenzatoru je:

$$P = UI \cos \varphi = UI \sin \delta = U^2 \omega C \sin \delta \approx U^2 \omega C \delta$$

- Iz prethodnog izraza može se zaključiti da je snaga gubitaka manja što je manji ugao gubitaka.

## 1.6.4. Merne prigušnice (kalemi)

- Merne prigušnice treba da imaju što „čistiju” induktivnost.
- Takođe, od njih se zahteva da njihova induktivnost bude konstantna, nezavisna od temperature, frekvencije, struje i stranih magnetnih polja.
- Merne prigušnice namotavaju se na neferomagnetno jezgro. Feromagnenti materijali unose gubitke usled histerezisa i vrtložnih struja. Ekvivalentna šema merne prigušnice data je na slici.



## 1.6.4. Merne prigušnice (kalemi)

- Ekvivalentna impedansa kola sa slike je:

$$\underline{Z} = \frac{\frac{R + j\omega L}{j\omega C}}{R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} = R \frac{1 + j\omega \left[ \frac{L}{R} (1 - \omega^2 LC) - RC \right]}{(1 - \omega^2 LC)^2 + \omega^2 R^2 C^2}$$

- Kako su kod mernih prigušnica vrednosti  $R$  i  $C$  znatno manje od  $L$ , onda se uz zanemarenje člana  $\omega^2 R^2 C^2$  u imeniocu i  $RC$  u brojiocu dobija:

$$R_{ek} = \frac{R}{(1 - \omega^2 LC)^2}$$

$$L_{ek} = \frac{L}{1 - \omega^2 LC}$$

- Rezonantna frekvencija mernog kalema može se izračunati prema izrazu:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

## 1.6.4. Merne prigušnice (kalemi)

- Promenljiva induktivnost može se ostvariti pomoću dva kalema od kojih je jedan pomičan a drugi statičan.
- Ova dva kalema mogu se povezati serijski ili paralelno.
- Ukupna induktivnost zavisi od sopstvene induktivnosti pojedinih kalemova  $L_1$  i  $L_2$ , i njihove međusobne induktivnosti  $M$ .
- Za serijsku vezu važi izraz:

$$L'_s = L_1 + L_2 + 2M$$

$$L''_s = L_1 + L_2 - 2M$$

gde je

$L'_s$  ukupna induktivnost kada se fluksevi kod oba kalema sabiraju, a

$L''_s$  ukupna induktivnost kada se fluksevi oduzimaju.

## 1.6.4. Merne prigušnice (kalemi)

- Za paralelnu vezu dva kalema važe izrazi:

$$L'_p = \frac{(L_1 + M)(L_2 + M)}{L_1 + M + L_2 + M}$$
$$L''_p = \frac{(L_1 - M)(L_2 - M)}{L_1 - M + L_2 - M}$$

gde je

$L'_p$  ukupna induktivnost kada se fluksevi kod oba kalema sabiraju, a

$L''_p$  ukupna induktivnost kada se fluksevi oduzimaju.

- Promenom međusobnog položaja kalema menja se međuinduktivnost, pa se ukupna induktivnost može kontinualno menjati od neke minimalne do neke maksimalne vrednosti.