

**Aleksandar Savić**

**Jelisaveta Krstivojević**

**Dragutin Salamon**

**MERENJA U  
ELEKTROENERGETICI 1**

Akadska misao  
Beograd 2023.

Aleksandar Savić, Jelisaveta Krstivojević, Dragutin Salamon

# **MERENJA U ELEKTROENERGETICI 1**

Recenzenti

Dr Jovan Mikulović

Dr Tomislav Rajić

---

Odlukom Nastavno-naučnog veća Elektrotehničkog fakulteta na sednici održanoj 16.05.2023. ova knjiga je odobrena kao nastavni materijal – udžbenik na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu.

---

Izdavači

Akadska misao, Beograd

Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet

Štampa

Akadska misao, Beograd

Tiraž

300 primeraka

ISBN 978-86-7466-971-6

Mesto i godina izdanja: Beograd, 2023.

---

# PREĐGOVOR

---

Istorijski gledano, sa razvojem prvih civilizovanih društava ukazala se potreba za merenjima. Građevinarstvo i trgovina bile su prve aktivnosti kod kojih su se koristila merenja. Međutim, razvojem nauke i tehnike, merenje je postalo neizostavno u mnogim drugim oblastima. Razvoj nauke i tehnike uvek je bio tesno vezan sa merenjima. Kao što su naučna i tehnološka dostignuća uticala na razvoj mernih sistema i metoda, tako je i merenje prirodnih pojava i fenomena dovodilo do nastanka mnogih naučnih otkrića i tehnoloških rešenja.

Jedna od naučnih oblasti gde je merenje našlo veliku primenu je elektrotehnika. Još od druge polovine 19. veka sa razvojem industrije javila se potreba za merenjem struja i napona. Od tada pa do danas električna merenja su prešla dug put od glomaznih mernih uređaja pa do sofisticiranih automatizovanih sistema koji mogu da obave veliki broj merenja u jedinici vremena.

Cilj električnih merenja nije da samo kvantifikuju neku električnu pojavu. Na osnovu merenja može se vršiti upravljanje i kontrola velikih sistema kao što su elektroenergetski sistemi. Merenja mogu da omoguće siguran i optimalan rad sistema čime se mogu ostvariti velike novčane uštede.

Namena ove knjige je da se kroz teoriju i praktične primere oblast električnih merenja približi čitaocima. Knjiga je prvenstveno namenjena studentima Elektrotehničkog fakulteta Odseka za energetiku kao osnovni udžbenik za predmet Električna merenja 1. Međutim, ona može da posluži kao dodatna literatura za sve one koji se bave oblašću električnih merenja. Knjiga je organizovana u osam poglavlja. U uvodnim poglavljima obrađene su opšte teme kao što su osnovni pojmovi o merenju, greške mernih sredstava, statistička obrada rezultata merenja. U nastavku knjige obrađeni su električni instrumenti kao i metode za merenje električnih veličina i parametara. Poslednje poglavlje posvećeno je virtuelnim instrumentima, koji danas predstavljaju savremen način za merenje električnih veličina i parametara. Pored teorije, knjiga sadrži veliki broj rešenih računskih zadataka koji predstavljaju realne probleme iz oblasti električnih merenja. Namera je da čitaoci pored teorijskih steknu i praktična znanja.

Potrebno je reći da u knjizi nisu obrađene neke bitne teme kao što su pametna brojila, SCADA sistemi, dok su elektronski instrumenti i osciloskopi u knjizi obrađeni na informativnom nivou bez ulaženja u detalje. Takođe, ovom knjigom nisu obuhvaćeni merni transformatori, merenja magnetskog polja, magnetske indukcije i

fluksa. Sve navedene teme nisu po planu i programu predmeta Električna merenja 1 i biće predmet neke buduće knjige.

Na kraju autori se posebno zahvaljuju recenzentima prof. dr Jovanu Mikuloviću i docentu dr Tomislavu Rajiću koji su pažljivo pročitali rukopis knjige i dali korisne sugestije i samim tim doprineli da ova knjiga bude još bolja.

Autori

---

# SADRŽAJ

---

1	OSNOVNI POJMOVI O MERENJIMA	1
1.1	Uvod	1
1.2	Međunarodni sistem jedinica	2
1.3	Principi merenja	4
1.3.1	Planiranje merenja	5
1.3.2	Izbor mernog sredstva	5
1.3.3	Merni proces	6
1.3.4	Merni postupci	8
1.3.5	Merne metode	8
1.4	Merna sredstva (merila)	9
1.4.1	Merni pribor	10
1.4.2	Merni instrumenti	10
1.4.3	Merni pretvarači	11
1.5	Metrološke karakteristike mernih sredstava	11
1.5.1	Upotrebne karakteristike	11
1.5.2	Statičke karakteristike	12
1.5.3	Dinamičke karakteristike	15
1.6	Etaloni	21
1.6.1	Etaloni napona	21
1.6.2	Merni otpornici	24
1.6.3	Merni kondenzatori	26
1.6.4	Merne prigušnice (kalemi)	27
2	GREŠKE MERNIH SREDSTAVA	29
2.1	Greška pokazivanja	29
2.2	Apsolutna greška mernog sredstva	30
2.3	Relativna greška mernog sredstva	31
2.4	Svedena greška mernog instrumenta	31

2.5	Najveća dopuštena greška mernog sredstva	31
2.6	Klasa tačnosti mernog sredstva	32
2.7	Overa mernih instrumenata	33
2.7.1	Postupak overe	33
2.7.2	Overa ampermetra i voltmetra poređenjem	34
3	STATISTIČKA OBRADA REZULTATA MERENJA	37
3.1	Uvod	37
3.2	Osnovne veličine iz statističke obrade podataka	38
3.2.1	Srednja vrednost i standardno odstupanje rezultata merenja	38
3.2.2	Srednja vrednost i standardno odstupanje uzorka	39
3.2.3	Tačnost, ponovljivost i reproduktivnost rezultata merenja	40
3.3	Prikaz rezultata merenja pomoću histograma	40
3.4	Funkcije raspodele	44
3.4.1	Gausova (normalna) raspodela	46
3.4.2	Uniformna (ravnomerna) raspodela	51
3.4.3	Simetrična trougaona funkcija raspodele	53
3.4.4	Weibull-ova raspodela	54
3.4.5	Beta raspodela	55
3.4.6	Standardno odstupanje indirektno merenih veličina	55
3.5	Merna nesigurnost	57
3.5.1	Merna nesigurnost tip A	59
3.5.2	Merna nesigurnost tip B	59
3.6	Regresiona analiza	60
3.6.1	Linearna regresija	61
3.6.2	Kvadratna regresija	64
3.7	Prezentacija merenih podataka	64
3.7.1	Tabelarna predstava podataka	65
3.7.2	Grafička predstava podataka	65
3.8	Rešeni primeri	66
4	ELEKTRIČNI SIGNALI	81

4.1	Klasifikacija električnih mernih signala	81
4.2	Osnovni parametri i karakteristike električnih signala	82
4.3	Izvori električnih signala	88
4.4	Izvori električnih smetnji pri merenjima	89
4.4.1	Smetnje na ulazu mernih instrumenata	89
4.4.2	Parcijalne smetnje	91
4.5	Pojam elektromagnetske kompatibilnosti	94
4.6	Rešeni primeri	94
5	ELEKTRIČNI MERNI INSTRUMENTI	107
5.1	Uvod	107
5.2	Opšte karakteristike električnih instrumenata	108
5.2.1	Princip rada	108
5.2.2	Konstruktivni elementi električnih mernih instrumenata	110
5.3	Magnetoelektrični instrumenti sa kretnim kalemom	115
5.3.1	Ampermetar sa pokretnim kalemom	121
5.3.2	Voltmetar sa pokretnim kalemom	122
5.4	Magnetoelektrični instrumenti za merenje naizmeničnih veličina	124
5.4.1	Magnetoelektrični instrumenti za usmeračom	124
5.4.2	Magnetoelektrični instrumenti za termopretvaračem	131
5.5	Elektromagnetni instrumenti sa kretnim gvožđem	132
5.6	Elektrodinamički merni instrumenti	137
5.6.1	Elektrodinamički ampermetar	143
5.6.2	Elektrodinamički voltmetar	144
5.6.3	Elektrodinamički vatmetar	146
5.6.4	Elektrodinamički varmetar	147
5.6.5	Sistematska greška pri merenju snage vatmetrom	148
5.6.6	Overa vatmetra	149
5.7	Elektrostatički instrumenti	153
5.8	Indukcioni instrumenti	160
5.8.1	Indukcioni ampermetar	164

5.8.2	Indukcioni voltmetar	165
5.8.3	Indukcioni vatmetar i varmetar	165
5.8.4	Indukciono brojilo električne energije	166
5.9	Referentni uslovi rada električnih mernih instrumenata	170
5.10	Elektronski merni instrumenti	171
5.11	Digitalni merni instrumenti	174
5.12	Osciloskopi	175
5.12.1	Analogni osciloskopi	176
5.12.2	Savremeni digitalni osciloskopi	178
5.12.3	Merne sonde	179
6	MERNI MOSTOVI I KOMPENZATORI	180
6.1	Merni mostovi	180
6.1.1	Opšta konfiguracija mernog mosta	180
6.1.2	Mostovi za jednosmernu struju	182
6.1.3	Mostovi za naizmjeničnu struju	184
6.2	Kompenzatori	187
6.2.1	Pogendorfov kompenzator	189
6.2.2	Butijev kompenzator	191
6.2.3	Delilo napona	193
7	MERENJE ELEKTRIČNIH PARAMETARA I VELIČINA	195
7.1	Merenje električnog otpora	195
7.1.1	Merenje otpora merenjem napona i struje ( $U-I$ metoda)	195
7.1.2	Merenje otpora metodom mosta	198
7.1.3	Merenje otpora pomoću kompenzatora	206
7.1.4	Merenje otpora pomoću voltmetra i poznatog otpora	207
7.1.5	Merenje otpora pomoću ampermetra i poznatog otpora	209
7.1.6	Merenje velikih otpora pomoću voltmetra	210
7.1.7	Merenje otpora pomoću megometra	211
7.1.8	Merenje otpora pomoću logometra	213
7.2	Merenje induktivnosti	215



7.2.1	Merenje sopstvene induktivnosti $U-I$ metodom	216
7.2.2	Merenje sopstvene induktivnosti kalema sa gvoždem ( $P-I$ metoda)	217
7.2.3	Merenje sopstvene induktivnosti rezonantnom metodom	219
7.2.4	Merenje sopstvene induktivnosti metodom mosta	224
7.2.5	Merenje međusobne induktivnosti $U-I$ metodom	228
7.2.6	Merenje međusobne induktivnosti Kembelovom metodom	229
7.2.7	Merenje međusobne induktivnosti metodama za merenje sopstvene induktivnosti	231
7.3	Merenje kapacitivnosti	231
7.3.1	Vinov most	232
7.3.2	Šeringov most	233
7.4	Merenje učestanosti (frekvencije)	236
7.4.1	Merenje učestanosti primenom mehaničke rezonanse	236
7.4.2	Merenje učestanosti primenom električne rezonanse	238
7.4.3	Merenje učestanosti primenom mosta	238
7.5	Merenje napona i struje	240
7.5.1	Merenje niskih napona i malih struja	240
7.5.2	Merenje velikih struja	240
7.5.3	Merenje visokih napona	242
7.6	Merenje snage u električnim kolima	244
7.6.1	Merenje snage u DC kolima primenom $U-I$ metode	244
7.6.2	Merenje snage u DC kolima primenom kompenzatora	246
7.6.3	Merenje snage metodom tri voltmetra	248
7.6.4	Merenje snage metodom tri ampermetra	250
7.6.5	Merenje snage u trofaznim sistemima	251
7.7	Merenje energije u električnim kolima	264
7.8	Rešeni primeri	266
8	VIRTUELNI INSTRUMENTI	317
8.1	Uvod u <i>LabVIEW</i>	317
8.2	<i>LabVIEW</i> okruženje	318

8.2.1	Pokretanje <i>LabVIEW</i> programa	318
8.2.2	Korisnički interfejs - <i>Front panel</i>	319
8.2.3	Grafički kôd - <i>Block diagram</i>	320
8.2.4	Palete za rad u <i>LabVIEW</i> -u	320
8.2.5	Statusna linija	321
8.2.6	Tehnike pronalaženja i rešavanja greški i nedostataka	321
8.2.7	Pomoć pri radu	322
8.2.8	Kreiranje virtuelnog instrumenta za generisanje, analizu i prikaz signala	324
8.3	Elementi tipičnih <i>LabVIEW</i> programa	329
8.3.1	Tipovi podataka u <i>LabVIEW</i> programskom paketu	329
8.3.2	Čvorovi u <i>Block diagram</i> -u	330
8.3.3	Vrste i tipovi funkcija	331
8.3.4	Prikazivanje rezultata na <i>Front panel</i> -u	332
8.3.5	<i>While</i> i <i>For</i> petlje	333
8.3.6	Donošenje odluka	334
8.3.7	Pristup podacima iz prethodne petlje	335
8.3.8	Integrisanje tekstualnog koda u <i>Block diagram</i>	335
8.3.9	Grupisanje podataka nizova	335
8.3.10	Rad sa ulaznim i izlaznim fajlovima	336
8.4	Merenje i akvizicija signala	337
8.4.1	Merni pretvarači i prilagođavači	337
8.4.2	Uređaji za merenje i akviziciju signala	338
8.4.3	Akvizicija podataka u <i>LabVIEW</i> programu	340
8.4.4	Primer kreiranja virtuelnog voltmetra	340
LITERATURA		342