

UNIVERZA V MARIBORU

**FAKULTETA ZA ELEKTROTEHNIKO,
RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO**

**LADISLAV MIKOLA
BOJAN GERGIČ**

**MERITVE
ZAPISKI PREDAVANJ**



MARIBOR, 2009

CIP - kataložni zapis o publikaciji
Univerzitetna knjižnica Maribor

621.317(075.8)

MIKOLA, Ladislav
Meritve [Elektronski vir] : zapiski predavanj /
Ladislav Mikola, Bojan Gergič. - Maribor :
Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in
informatiko, 2009. - (E-publikacije Univerze v
Mariboru)

Način dostopa (URL): <http://dkum.uni-mb.si>

ISBN 978-961-248-182-7

1. Gergič, Bojan
COBISS.SI-ID 63597313

Naslov:	Meritve: zapiski predavanj
Avtor:	Ladislav Mikola, Bojan Gergič
Strokovni recenzenti:	Izr. prof. dr. Peter Planinšič
Jezikovni recenzenti:	Mihaela Dorner, prof.
Tehnični recenzenti:	Izr. prof. dr. Matjaž Debevc
Oblikovanje slik:	Miloš Vute, inž. el.
Tipologija publikacije:	2.05 Drugo učno gradivo
Založnik:	UM FERI
Kraj založbe:	Maribor
Datum izida:	30.9.2009
Različica:	R 1.0
URL:	http://dkum.uni-mb.si
Sistemske zahteve:	Osebni računalnik
Programske zahteve:	Program Adobe Reader

Predgovor

Za sprotni študij, ki je eden temeljnih ciljev bolonjskega visokošolskega izobraževanja, mora imeti študent na razpolago tudi primerno študijsko literaturo. Te je za področje merjenj v elektrotehniki precej, vendar sva ocenila, da je dobro, da se ta čim bolj ujema z zastavljeno vsebino in načinom poteka predavanj na fakulteti. S tem namenom so nastali ti zapiski predavanj, ki se bodo kljub temu, da zajemajo osnovna znanja s področja merjenj v elektrotehniki, sproti spreminjali in dopolnjevali ter tako sledili neprestanemu razvoju tehnike. Zato bova še naprej spremljala dogajanja v stroki, vesela bova pa tudi vsake dobronamerne pripombe in nasveta predvsem študentov in sodelavcev. Želiva prispevati k bogatitvi znanja naših študentov, saj bo le tako izpolnjen namen najinega dela.

Zahvaljujeva se vsem, ki so kakorkoli prispevali k nastanku teh zapiskov predavanj, predvsem pa najinemu tehniškemu sodelavcu Milošu Vuteju, inž. el., za njegovo vsestransko strokovno pomoč.

Avtorja

Maribor, septembra 2009

Vsebina

1. UVOD	1
1.1 Električna merjenja	1
1.2 Merilni signali	2
1.3 Merjenje neelektričnih veličin	3
1.4 Osnovni postopki merjenj električnih veličin	3
1.5 Merilni rezultat	4
2. ZAKONSKO MEROSLOVJE	7
2.1 Merske enote	8
2.1.1 Mednarodni sistem merskih enot (<i>The International System of Units-SI</i>)	8
Osnovne enote SI	8
Definicija osnovnih enot SI	8
Izpeljane enote SI	9
Desetiški mnogokratniki in simboli predpon SI enot	10
2.1.2 Enote izven SI	11
2.1.3 Uporaba in pisava merskih enot	11
2.2 Etaloni	11
2.2.1 Etaloni v elektrotehniki	12
Westonov etalon napetosti	12
Josephsonov etalon napetosti	13
Elektronski etalon napetosti	13
Kvantni Hallov etalon upornosti	14
Materialni etalon upornosti	15
2.2.2 Promet z merili	15
3. POGREŠKI PRI MERJENJIH	17
3.1 Vrste pogreškov	17
3.1.1 Sistematski pogreški	17
3.1.2 Naključni pogreški	18
3.2 Statistična obdelava merilnih rezultatov	19
3.2.1 Histogram, porazdelitve (Gauss)	20
3.3 Meja in območje zaupanja	22
3.3.1 Določanje meja pogreškov pri enkratnih merjenjih	23
Meja pogreška pri analognih merilnih instrumentih	23
Meja pogreška pri digitalnih merilnih instrumentih	24
Meja pogreška pri posredno merjenih veličinah	24
3.4 Merilna negotovost	26
3.4.1 Pomen osnovnih izrazov	26
3.4.2 Standardna negotovost tipa A	27
3.4.3 Standardna negotovost tipa B	27
3.4.4 Kombinirana standardna negotovost $u_c(y)$ pri nekoreliranih vhodnih veličinah	28
3.4.5 Razširjena negotovost u	28
3.4.6 Rezultat meritve	29
3.4.7 Primer izračuna merilne negotovosti	29
4. MERILNI OJAČEVALNIKI IN PRETVORNIKI	31
4.1 Merilni ojačevalniki	31

4.1.1 Izhodna stopnja ojačevalnika	32
4.2 Operacijski ojačevalniki	33
4.2.1 Povratna vezava pri operacijskih ojačevalnikih	34
4.2.2 Operacijski tokovno napetostni ojačevalnik (i/u)	36
Izvedbe i/u ojačevalnikov	37
Inverter	37
Seštevalnik	37
Odštevalnik	37
Korenjenje	38
Integrator	38
Diferenciator	38
4.2.3 Primeri vezij z operacijskimi ojačevalniki	38
Analogni množilnik	38
Impulzni množilnik	39
Tvorba efektivne vrednosti izmenične napetosti	40
4.3 Merilni pretvorniki	41
4.3.1 Analogno digitalna pretvorba merilnega signala	41
Merjenje časa	42
Merjenje frekvence	42
AD-pretvorba u/t z enojno žagasto napetostjo	43
AD-pretvorba u/t z dvojn timer nagibom	44
AD-pretvorba u/f	47
4.3.2 Digitalno analogna pretvorba merilnega signala	49
DA-pretvornik z R-2R uporovno lestvico	49
4.4 Merilni transformatorji	51
4.5 Pretvorba neelektričnih v električne veličine	54
4.5.1 Uporovni termometri	55
4.5.2 Raztezni merilni lističi	56
4.5.3 Induktivni merilni pretvorniki	56
4.5.4 Kapacitivni merilni pretvorniki	57
4.5.5 Termoelektrični merilni pretvorniki (termopretvorniki, termoelementi)	57
4.5.6 Piezoelektrični pretvorniki	58
4.5.7 Indukcijski merilni pretvorniki	59
5. MERILNI INSTRUMENTI	61
5.1 Analogni (odklonski) merilni instrumenti	61
5.1.1 Statične razmere v merilnem sistemu	61
5.1.2 Dinamične razmere v merilnem sistemu	63
5.1.3 Instrument z vrtljivo tuljavico	65
Razširitev merilnega območja IVT	66
Instrument z vrtljivo tuljavico za merjenje izmeničnih veličin	68
IVT s polprevodniškim usmernikom	68
Instrument z vrtljivo tuljavico s termopretvornikom	70
5.1.4 Instrument z vrtljivim železom	71
5.1.5 Elektrodinamični instrument	73
5.1.6 Indukcijski instrument	76
5.2 Analogni elektronski voltmetri	78
5.2.1 Enosmerni elektronski voltmeter	79
Enosmerni elektronski voltmeter z enosmernim ojačevalnikom	79
Enosmerni elektronski voltmeter z izmeničnim ojačevalnikom	80
5.2.2 Izmenični elektronski voltmeter	81
5.3 Problematika ozemljevanja pri elektronskih merilnih instrumentih	83
5.4 Digitalni merilni instrumenti	85
5.4.1 Digitalni voltmeter	85
5.4.2 Digitalni števec električne energije	85

5.5	Osciloskop	87
5.5.1	Posebne izvedbe osciloskopov	90
	Vzorčevalni osciloskop	90
	Digitalni osciloskop	91
5.5.2	Uporaba osciloskopa	94
6.	MOSTIČNA IN KOMPENZACIJSKA VEZJA	95
6.1	Merilni mostiči	95
6.1.1	Wheatstonov mostič	95
	Odklonski Wheatstonov mostič	96
	Občutljivost in meja pogreška mostiča	98
	Dimenzioniranje elementov mostiča	99
6.1.2	Thomsonov mostič	101
6.1.3	Izmenični merilni mostiči	102
	Wienov mostič	104
	Sheringov mostič	105
	Maxwellov mostič	106
	Maxwell-Wienov mostič	107
	Resonančni mostič	108
6.2	Enosmerni kompenzatorji	108
6.2.1	Osnovna kompenzacijska vezja	108
	Poggendorffovo vezje	109
	Lindeck-Rothejevo vezje	109
6.2.2	Občutljivost in merilna negotovost kompenzacijskega vezja	110
6.2.3	Samodejno digitalno kompenzacijsko vezje	111
6.3	Izmenični kompenzatorji	112
6.3.1	Kompleksni kompenzator	112
7.	MERJENJE ELEKTRIČNIH VELIČIN	115
7.1	Merjenje toka in napetosti	115
7.1.1	Merjenje toka	115
7.1.2	Merjenje napetosti	116
7.1.3	Merjenje izmeničnih tokov in napetosti	117
	Merjenje temenske vrednosti izmenične napetosti	117
7.2	Merjenje upornosti	118
7.2.1	Splošno o merjenju upornosti	118
7.2.2	Upornost priključnih vodnikov in stične upornosti	118
7.2.3	Merjenje notranje upornosti aktivnih dvopolov	119
7.2.4	Merilne metode za merjenje upornosti	120
	Merjenje upornosti z voltmetrom in tokovnim virom	120
	U-I metoda merjenja upornosti	120
	Primerjalni metodi merjenja upornosti	121
	Merjenje velikih upornosti	122
7.3	Merjenje induktivnosti in kapacitivnosti	123
7.3.1	Merjenje induktivnosti	123
	Merjenje medsebojne induktivnosti	126
7.3.2	Merjenje kapacitivnosti	128
	U-I metoda merjenja kapacitivnosti	128
	Merjenje kapacitivnosti elektrolitskih kondenzatorjev	129
	Resonančna metoda	129
	Merjenje izgubnega faktorja kondenzatorja	130
	Resonančna metoda merjenja izgubnega faktorja kondenzatorja	130
	Merjenje izgubnega faktorja kapacitivnega bremena z osciloskopom	131
7.4	Merjenje moči	131
7.4.1	Merjenje moči v enosmernih sistemih	131
7.4.2	Merjenje delovne moči v enofaznih sistemih	133
7.4.3	Merjenje delovne moči v trifaznih sistemih	134

7.4.4 Merjenje jalove moči s tremi vatmetri.....	137
7.4.5 Merjenje jalove moči z Aronovo vezavo	138
7.4.6 Merjenje delovne moči z osciloskopom	139
7.5 Magnetna merjenja.....	140
7.5.1 Snemanje statične magnetilnice	141
7.5.2 Snemanje dinamične histerezne zanke z osciloskopom	142
7.5.3 Merjenje izgub v feromagnetikih z Epsteinovim aparatom.....	143
7.5.4 Ločevanje izgub v feromagnetikih.....	146
PRILOGA A: SEZNAM NAJPOGOSTEJE	
UPORABLJANIH OZNAK IN KRATIC	149
PRILOGA B: OZNAKE IN ENOTE NEKATERIH	
VELIČIN	151
PRILOGA C: SLOVAR NEKATERIH OSNOVNIH	
IZRAZOV	153
LITERATURA.....	157

1. UVOD

Merjenje je dejavnost, ki človeka spremlja praktično neprestano, dobesedno skoraj vsak trenutek. Velikokrat se tega niti ne zavedamo. Če ugotovimo, koliko je ura, če spremljamo atletsko tekmovanje, če kupujemo v trgovini, ne razmišljamo o merjenju, čeprav v tistem trenutku ravno to počnemo. Takih primerov je še veliko.

Podatki iz zgodovine govorijo o astronomskih merjenjih in zemljemerstvu pri starih Sumerijcih, Egipčanih, Grkih, torej v času pred našim štetjem. Tudi ena svetopisemskih Salomonovih modrosti (11, 20) pravi: "Toda ti vse urejaš po meri, po številu in po teži". Gotovo je merjenje še starejše kot ti zapisi in velja prepričanje, da se je homo sapiens s to dejavnostjo dvignil in se še dviga nad ostale vrste našega planeta.

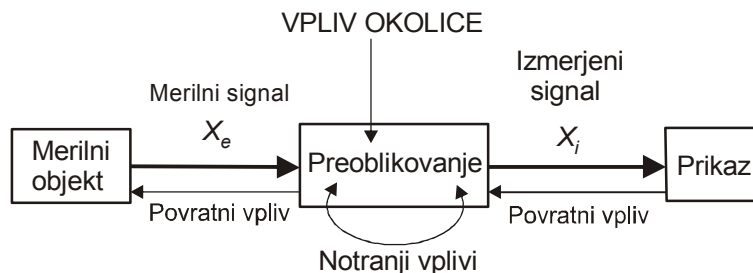
Merjenje je osnovna dejavnost v vseh področjih naravoslovja, torej tudi v tehniki. Meritev je osnova napredka teorije in potrditev tehnične realizacije tega napredka. Kakor vse ostale znanosti je tudi merjenje v neprestanem razvoju. Pojavljajo se nove naprave, nove metode, nova računalniška orodja. Merilni procesi se avtomatizirajo, točnosti merjenj se povečujejo. Meje, tako kot drugod, tudi tu niso določljive.

1.1 Električna merjenja

Merjenje je postopek, s katerim določamo razmerje med neznano vrednostjo fizikalne veličine in ustrezno enoto te veličine. V elektrotehniki merimo predvsem električne veličine: napetost, tok, naboj, upornost, induktivnost, kapacitivnost, frekvenco, moč, energijo... Le redko se dajo merjene veličine prikazati neposredno na merilnem instrumentu. Pogosto jih je treba zajeti, prenesti, ojačiti, kompenzirati, preoblikovati, filtrirati, pomniti, preračunati, preden se merilni rezultat prikaže na skali, zaslonu, tiskalniku ali kako drugače dokumentira. Tako se električna merilna tehnika ukvarja z:

- zajemanjem električnih merilnih signalov,
- strukturo merilnih sistemov,
- lastnostmi signalov različnih oblik,
- prenosom in obdelavo merilnih signalov.

Poenostavljeno merilno strukturo z upoštevanjem medsebojnih vplivov in vplivov okolice prikazujemo na sliki 1-1.



Slika 1-1: Merilna struktura z upoštevanjem medsebojnih vplivov in vplivov okolice.

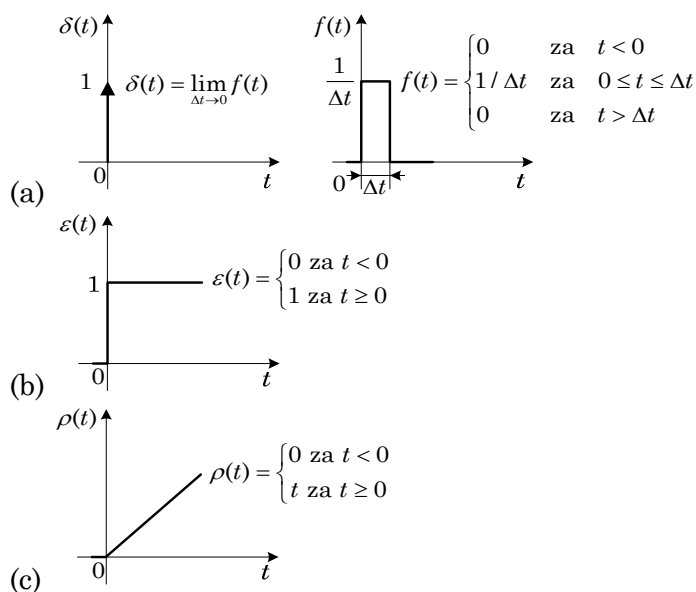
1.2 Merilni signali

Pri merjenjih, ki so tudi proces prenosa in obdelave signalov, se srečujemo s signali zelo različnih karakteristik. Le njihovo dobro poznavanje omogoči najprimernejšo izvedbo merjenja in s tem kakovosten merilni rezultat.

Signali so lahko:

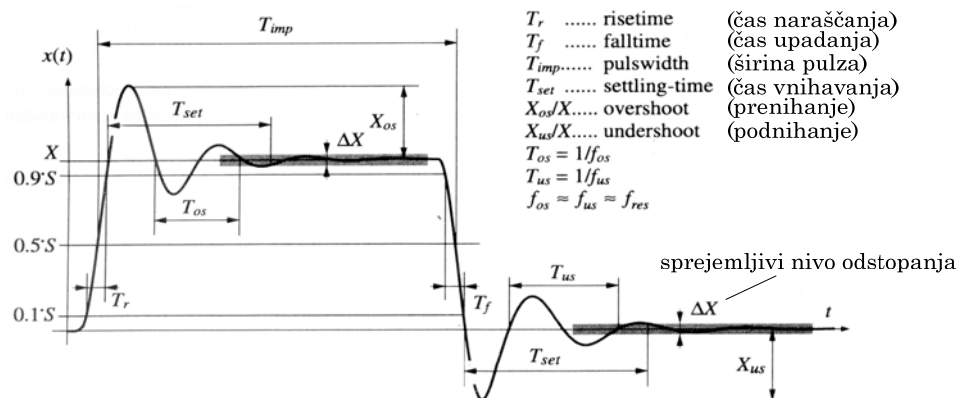
- DETERMINISTIČNI - enolično določeni za vsak t , sicer NEDETERMINISTIČNI
- STOHAŠTIČNI - naključni
- PERIODIČNI - $x(t - T) = x(t)$
- APERIODIČNI - neperiodični, v teh ni ponavljajočega dela
- STACIONARNI - s časom ne spreminjajo statističnih lastnosti, sicer NESTACIONARNI
- STANOVITNI - časovno konstantni

Predvsem za določanje lastnosti merilnih naprav in sistemov ter analizo njihovega delovanja pa uporabljamo nekaj standardnih determinističnih signalov.



Slika 1-2: Standardni deterministični signali. (a) Impulzna funkcija (Dirac-ov impulz). (b) Skočna funkcija. (c) Dvižna funkcija.

Na sliki 1-3 predstavljamo nekatere karakteristične parametre realnega pravokotnega pulza. Tak je lahko potek električnega toka ob vklopu električne naprave in njenem izklopu.



Slika 1-3: Nekateri karakteristični parametri realnega pravokotnega pulza.

1.3 Merjenje neelektričnih veličin

Električna merjenja imajo poseben pomen tudi zato, ker se različni učinki fizikalnih neelektričnih veličin lahko preoblikujejo v električne veličine. Taka pretvorba se izvede z detektorji in senzorji različnih neelektričnih veličin, na primer s termoelementi, z uporovnimi elementi, s polprevodniškimi elementi, s piezoelementi in drugimi izvedbami. Tako so omogočena merjenja vrste mehanskih, kemičnih in optičnih veličin, na primer temperatur, tlakov, vlažnosti, pomikov, vibracij. Nadaljnji merilni postopek poteka skladno s principi in prednostmi, ki veljajo za električna merjenja.

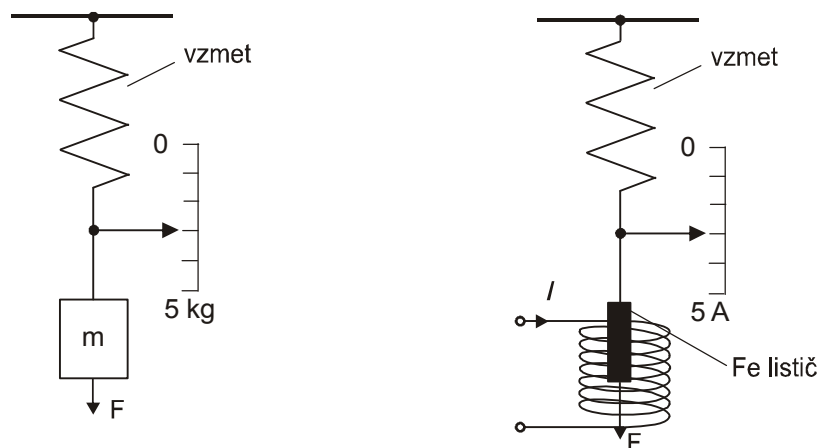
1.4 Osnovni postopki merjenj električnih veličin

Za določanje vrednosti merjene električne veličine poznamo dva osnovna postopka:

- kazalni ali neposredni in
- izravnalni ali primerjalni postopek.

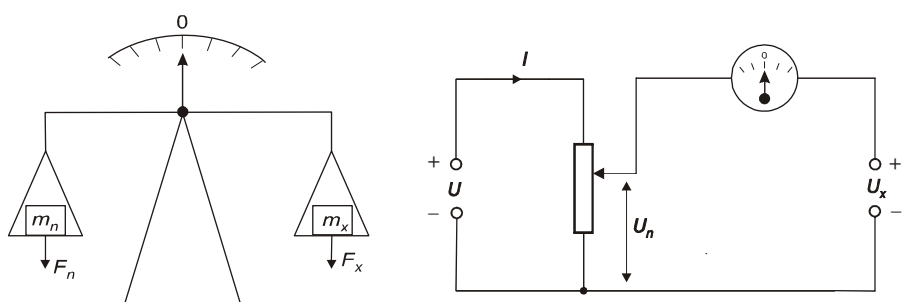
Pri kazalnem postopku uporabljamo za merjenje merilne instrumente, prirejene za neposredno merjenje posameznih električnih veličin, na primer voltmetre, ampermetre, vatmetre. Pri elektromehanskih (analognih) instrumentih najprej merjeno veličino pretvorimo v mehansko veličino, ki povzroči odklon merilnega sistema. Tega odčitamo na skali, ki je prej umerjena z merjenjem znane veličine. Tako merjenje je običajno manj točno. Delovanje teh instrumentov lahko ponazorimo z delovanjem vzmetne tehtnice. Pri digitalnih instrumentih pa merjeno analogno veličino najprej pretvorimo v digitalno obliko z analogno digitalnimi pretvorniki in jih nato s pomočjo raznih logičnih

krogov in števecv pretvorimo v numerični (številčni) podatek, ki ga odčitamo na prikazovalniku. Ti instrumenti praviloma merijo točneje kot analogni.



Slika 1-4: Merjenje mase m in toka I s kazalnim postopkom.

Pri izravnalnem postopku primerjamo merjeno veličino z istovrstno znano veličino v ustrezno sestavljenem merilnem vezju. Rezultat take primerjave je lahko ocena: premajhno/ustrezno/preveliko. Za nastavitev stanja ustrezno spreminjamo znano veličino tako, da jo izenačimo z neznano, kar ugotovimo z ničelnim indikatorjem. Zato se ta vrsta merjenja imenuje kompenzacijsko merjenje, ki omogoča visoko točnost, je manj občutljiva na motnje in ne obremenjuje vira merilnega signala. Tak postopek lahko primerjamo z delovanjem enakokrake tehtnice.



Slika 1-5: Merjenje mase m_x in napetosti U_x z izravnalnim postopkom.

1.5 Merilni rezultat

Merilni rezultat podajamo z merskim številom, torej številčno vrednostjo in enoto merjene veličine. Oboje mora biti izbrano tako, da je razumevanje, oziroma ocena rezultata čim enostavnejša. Vzemimo primer, da smo merili izmenični električni tok. Izmerjeno vrednost podamo v naslednji obliki:

$$I = 25 \text{ A} .$$

I je simbol za električni tok, 25 je mersko število, A (amper) je enota električnega toka. Rezultat pomeni, da je velikost toka 25-kratna vrednost enote. Pri uporabi simbolov mora biti jasen njihov pomen. V našem primeru bi se lahko postavilo vprašanje, ali simbol I označuje srednjo, efektivno ali temensko vrednost električnega toka. Uporabljeni simbol v tem primeru pomeni efektivno vrednost.

Za kakovost rezultata moramo podati tudi merilno negotovost, saj je le malo verjetno, da je izmerjena vrednost res prava, resnična. Ob oceni, da je merilna negotovost $\pm 0,2 \text{ A}$, zapišemo:

$$I = 25 \text{ A} \pm 0,2 \text{ A} .$$

V relativni obliki, kar je pogostejši način zapisa, pa:

$$I = 25 \cdot (1 \pm 0,008) \text{ A} .$$

Potreben je še podatek o verjetnosti, s katero ta ocena velja. Vzemimo, da smo v tem primeru ocenili, da je verjetnost $P = 0,95$, če jo pa izrazimo v odstotkih, zapišemo $P = 95 \%$.

Končno razumevanje je naslednje: merilni rezultat je 25 A , prava vrednost toka pa se nahaja z verjetnostjo 95% med $24,8 \text{ A}$ in $25,2 \text{ A}$.

2. ZAKONSKO MEROSLOVJE

Zakonsko meroslovje (Legal Metrology) je tisti del vede o merjenjih, ki ureja temeljna področja te dejavnosti in jih predstavlja z različnimi oblikami regulativnih aktov. Posebej izrazito je obravnavano področje merskih enot, področje etalonov in področje prometa z merili, kar pomeni predvsem zagotavljanje kakovosti in sledljivosti merilnih instrumentov in naprav.

Izraz zakonsko pomeni, da se dogovori na vseh hierarhičnih ravneh, mednarodni, regionalni in nacionalni, izdajo kot akti različnih veljavnosti. To so na primer mednarodni dogovor, zakon, standard, predpis, uredba, priporočilo. Uporaba večine naštetih je obvezna, nekaterih pa načeloma ne. Vendar praksa pogosto pokaže, da je primerno dobro preveriti, kdaj je tudi akt z neobvezno uporabo uporabljan tako pogosto, da so z njim že urejena razmerja udeležencev v določenem dogajanju in ga je seveda treba upoštevati.

Mednarodno urejanje meroslovja se izvaja v mednarodnih organizacijah, katerih članice so posamezne države sveta. Neposredna povezava s članicami je vzpostavljena preko ustreznih ministrstev ali določenih državnih institucij. Za meroslovje je najpomembnejša Mednarodna organizacija za zakonsko meroslovje (OIML) in njen izvršni organ Mednarodni urad za uteži in mere (BIPM), ki ima sedež v Sèvresu v bližini Pariza. V meroslovju sta udeleženi tudi standardizacijski organizaciji Mednarodna organizacija za standardizacijo (ISO) in Mednarodna elektrotehniška komisija (IEC).

Prav tako pomembna je regionalna raven. Za Slovenijo je to Evropska skupnost in njene institucije. Določene akte, tudi za meroslovje, izdajata Evropski parlament in Svet, nekatere Evropska organizacija za akreditacijo (EA), pa tudi Evropska organizacija za standardizacijo v elektrotehnikah (CENELEC). Seveda je tako mednarodnih, kot regionalnih organizacij več, kot je tu naštet.

Na slovenski nacionalni ravni ureja meroslovje predvsem Urad za meroslovje RS (MIRS), ki je sicer institucija Ministrstva za visoko šolstvo, znanost in tehnologijo, vendar je njegovo delovanje bistveno širše, posebej tudi za gospodarstvo. Razen strokovnega dela Urad predstavlja Slovenijo v večih mednarodnih in regionalnih meroslovnih organih, vendar pa ne v standardizacijskih, kjer deluje Slovenski inštitut za standardizacijo (SIST), ki sicer z delom svoje dejavnosti posega tudi v meroslovje.

2.1 Merske enote

Osredotočili se bomo predvsem na stanje v Sloveniji, pri čemer je treba upoštevati zahteve, ki izhajajo iz mednarodnih in regionalnih aktov. Temeljni slovenski akt, ki navaja osnovne zahteve glede uporabe merskih enot, je Zakon o meroslovju (Ur. list RS, št. 26/05), ki določa, da se v Republiki Sloveniji uporablja Mednarodni sistem merskih enot (SI). Izjemoma pa lahko minister, pristojen za meroslovje, predpiše uporabo enot izven SI, če se te uporabljajo mednarodno in jih SI neposredno ne določa. Podrobno pa o vrstah in uporabi merskih enot govori Odredba o merskih enotah (Ur. list RS, št. 26/01).

2.1.1 Mednarodni sistem merskih enot (The International System of Units-SI)

Nastajanje sodobnega Mednarodnega sistema merskih enot (SI) sega v leto 1875, ko je v Parizu 17 držav podpisalo Konvencijo o metru (Convention du Mètre). Najpomembnejša sklepa sta bila: definirani sta bili enoti meter za dolžino in kilogram za maso in osnovan je bil BIPM. Z leti so se dogajale spremembe in dopolnila, predvsem na Generalnih konferencah (CGPM) organizacije OIML. Tako ima današnji sodobni SI dve skupini enot: osnovne enote SI in izpeljane enote SI.

Osnovne enote SI

Tabela 2-1: Tabela osnovnih enot SI.

Osnovna veličina	Osnovna enota SI	
	Ime	Simbol
dolžina	meter	m
masa	kilogram	kg
čas	sekunda	s
električni tok	amper	A
termodinamična temperatura	kelvin	K
množina snovi	mol	mol
svetilnost	kandela, candela	cd

Definicija osnovnih enot SI

Enota za dolžino

Meter je dolžina poti, ki jo prepotuje svetloba v vakuumu v časovnem intervalu $1/299\,792\,456$ sekunde.

Enota za maso

Enota za maso je kilogram; kilogram je enak masi mednarodnega etalona prototipa kilograma.

Enota za čas

Sekunda je trajanje $9\,192\,631\,770$ period sevanja, ki ustreza prehodu med dvema hiperfinima nivojema osnovnega stanja atoma cezija - 133.

Enota za električni tok

Amper je konstantni električni tok, ki bi pri prehodu skozi dva premočrtna, vzporedna, neskončno dolga vodnika zanemarljivega

krožnega prereza, postavljena v vakuumu v medsebojni razdalji 1 m, povzročil med njima silo $2 \cdot 10^{-7}$ newtona na meter dolžine.

Enota za termodinamično temperaturo

Kelvin, enota termodinamične temperature, je $1/273,16$ termodinamične temperature trojne točke vode.

Enota za množino snovi

Mol je množina snovi v sistemu, ki vsebuje toliko osnovnih edink (entitet), kolikor je atomov v 0,012 kilograma ogljika. Pri uporabi mola je treba navesti osnovne edinke (entitete), ki so lahko atomi, molekule, ioni, elektroni, drugi delci ali določene skupine takšnih delcev.

Enota za svetilnost

Kandela (candela) je svetilnost vira, ki v dani smeri oddaja monokromatsko sevanje frekvence $540 \cdot 10^{12}$ hertzov in seva z jakostjo $1/683$ vata na steradian.

Definicije enot morajo temeljiti na pojavih, ki so časovno in okoljsko nespremenljivi, saj le tako definirana enota ostane vselej enaka. Z neprestanim razvojem znanosti in tehnike so se nekatere definicije spreminjale, praviloma s temeljitimi raziskavami v visoko usposobljenih laboratorijih. Klub temu definicije niso absolutno točne. Najtočnejša je definicija sekunde, sledijo ji ostale. Še vedno pa izstopa definicija kilograma, ki velja v svoji prvotni obliki iz leta 1875, vendar se tudi zanjo intenzivno išče nova, kakovostnejša in kaže, da bo do nje kmalu prišlo.

Za opisovanje temeljnih pojavov v različnih naravoslovnih vedah je potrebno različno število osnovnih veličin in s tem tudi osnovnih enot. Tako na primer geometrija rabi le eno osnovno veličino, dolžino (meter), kinematika dve, dolžino in čas (meter, sekunda), dinamika tri, maso, dolžino in čas (kilogram, meter, sekunda), elektrotehnika pa štiri, dolžino, maso, čas in električni tok (meter, kilogram, sekunda, amper). Pomembno je, da so mednarodno določene le merske enote, ne pa veličine.

Izpeljane enote SI

To so enote, ki so izpeljane iz osnovnih enot SI in so določene kot algebrski izrazi v obliki zmnožkov potenc osnovnih enot SI s številskim faktorjem 1. Vsako izpeljano enoto je mogoče izraziti z osnovnimi enotami. Delimo jih v tri vrste: a) izpeljane enote izražene le z osnovnimi enotami, b) izpeljane enote s posebnimi imeni in c) izpeljane enote, izražene s kombinacijo osnovnih enot in enot s posebnimi imeni. Navajamo le nekaj izrazitih primerov za elektrotehniko.

Tabela 2-2: Primeri izpeljanih enot SI.

Veličina	Ime enote	Simbol enote	Izražena z osnovno enoto SI
površina	kvadratni meter	m ²	m ²
prostornina	kubični meter	m ³	m ³
magnetna poljska jakost	amper na meter	A/m	A/m
ravninski kot	radian	rad	m/m
frekvenca	hertz	Hz	1/s
tlak, napetost	pascal	Pa	kg/(m·s ²)
energija, delo, toplota	joule	J	kg·m ² /s ²
električna upornost	ohm	Ω	kg·m ² /(s ³ ·A ²)
kapacitivnost	farad	F	A ² ·s ⁴ /(kg·m ²)
induktivnost	henry	H	kg·m ² /(A ² ·s ²)
magnetni pretok	weber	Wb	kg·m ² /(A ² ·s ²)
moment sile	newtonmeter	N·m	kg·m ² /s ²
kotna hitrost	radian na sekundo	rad/s	m/(m·s) = 1/s
permeabilnost	henry na meter	H/m	kg·m/(A ² ·s ²)

Desetiški mnogokratniki in simboli predpon SI enot

Velikokrat se zgodi, da je merilni rezultat, izražen z njegovo definirano (osnovno ali izpeljano) enoto veličine, nepregleden. To se dogaja tako pri velikih kot majhnih vrednostih. Zato osnovnemu simbolu dodamo ustrezno predpono. Predpona predstavlja pravzaprav določen faktor, s katerim moramo pomnožiti merilni rezultat, da ga izrazimo z njegovo definirano enoto. Glede na definicijo SI enot take desetiške enote niso več enote SI.

Tabela 2-3: Tabela desetiških mnogokratnikov.

Faktor	Predpona	
	Ime	Simbol
10 ²⁴	jota	Y
10 ²¹	zeta	Z
10 ¹⁸	eksa	E
10 ¹⁵	peta	P
10 ¹²	tera	T
10 ⁹	giga	G
10 ⁶	mega	M
10 ³	kilo	k
10 ²	hekto	h
10 ¹	deka	da

Faktor	Predpona	
	Ime	Simbol
10 ⁻¹	deci	d
10 ⁻²	centi	c
10 ⁻³	mili	m
10 ⁻⁶	mikro	μ
10 ⁻⁹	nano	n
10 ⁻¹²	piko	p
10 ⁻¹⁵	femto	f
10 ⁻¹⁸	ato	a
10 ⁻²¹	zepto	z
10 ⁻²⁴	jokto	y

Nekaj primerov:

$$1000 \text{ A} = 1 \text{ kA},$$

$$0,00001 \text{ V} = 10 \text{ μV}.$$

$$0,001 \text{ V} = 1 \text{ mV}$$

2.1.2 Enote izven SI

Povsem zakonito se uporabljajo tudi določene enote, ki niso enote SI. Najbolj značilne so enote za čas, dolžino, prostornino, maso, tlak, ravninski kot, energijo. Za nekatere enote iz te skupine velja omejitev uporabe le za določena področja.

Tabela 2-4: Primeri enot izven SI.

Veličina	Ime enote	Simbol enote	Vrednost v SI enotah
čas	minuta	min	1 min = 60 s
	ura	h	1 h = 60 min = 3600 s
	dan	d	1 d = 24 h = 86400 s
prostornina	liter	L, l	1 L = 1 dm ³ = 10 ³ cm ³ = 10 ⁻³ m ³ , 1 l = 1 dm ³ = 10 ³ cm ³ = 10 ⁻³ m ³
ravninski kot	stopinja	°	1° = ($\pi / 180$) rad
masa	tona	t	1 t = 10 ³ kg
tlak	bar	bar	1 bar = 10 ⁵ Pa
dolžina	morska milja	M	1 M = 1852 m
hitrost	vozel	kn	1 kn = (1852/3600) m/s

Tudi pri nekaterih, ne pa vseh, enotah izven SI se sme uporabiti desetiške predpone, nikakor pa ne pri časovnih enotah, kot so: minuta, ura, dan in še nekaterih drugih.

2.1.3 Uporaba in pisava merskih enot

Uporaba in pisava enot mora biti skladna z zahtevami standardov SIST ISO 2955, SIST ISO 31 in SIST ISO 1000. Nekaj najvažnejših pravil:

1. Simbole merskih enot pišemo pokončno (opomba: simbole veličin pišemo poševno).
2. Če je sestavljena enota zmnožek dveh ali več enot, mora biti med njimi pika na polovici višine znakov ali presledek med znaki. Le izjemoma je lahko zapis skupaj.
3. Med numeričnim rezultatom in simbolom enote mora biti en presledek.
4. Simbolu merske enote smemo dodati le eno desetiško predpono. Med simbolom predpone in simbolom enote ni presledka.
5. Praktični nasvet: pri izračunih vstavljajmo v enačbe vrednosti v definiranih enotah posameznih veličin. Če je potrebno, šele končno vrednost izrazimo z desetiško enoto.

2.2 Etaloni

Po definiciji je etalon opredmetena mera, merilni instrument, referenčni material ali merilni sistem, katerega namen je, da definira, realizira, ohranja ali reproducira neko enoto ali eno ali več vrednosti veličine, tako da služi kot referenca.

Etaloni so hierarhično razvrščeni v določene razrede, ki predstavljajo njihovo kakovost. Ena od delitev je delitev v mednarodne etalone in nacionalne etalone. Mednarodni etalon je z mednarodnim dogovorom priznana podlaga za ugotavljanje

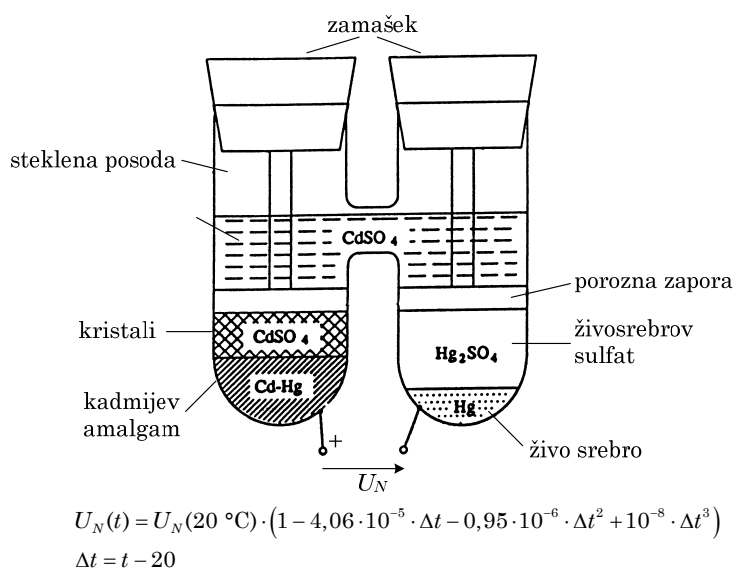
vrednosti drugih etalonov določene veličine. Nacionalni etalon pa je z državnim odlokom priznana podlaga za ugotavljanje vrednosti drugih etalonov te veličine v državi. Druga delitev je še izraziteje povezana s kakovostjo etalonov. Največjo meroslovno kakovost ima primarni etalon, katerega vrednost je sprejeta brez sklicevanja na druge etalone iste veličine. Sekundarni etalon je tisti, katerega vrednost se ugotovi primerjalno s primarnim etalom. Sledi delovni etalon. Uporablja se še nekaj drugih poimenovanj: referenčni, posredniški, prenosni etalon, vsak s svojim pomenom oziroma funkcijo. Praviloma je tako, da so etaloni najvišjega razreda posameznih veličin hranjeni in vzdrževani v svetovno priznanih meroslovnih laboratorijih (BIPM, NIST, PTB, ...), ostali pa v manj znanih, vendar strokovno usposobljenih ustanovah oziroma laboratorijih. Delovni etaloni se na primer nahajajo v industrijskih merilnicah, včasih pa tudi na posameznih delovnih mestih v proizvodnih procesih.

2.2.1 Etaloni v elektrotehniki

Tehnična realizacija etalona toka, skladna z definicijo ampera je tehnično težavna in ne zagotavlja vrhunske točnosti. Zato se je uveljavil etalon napetosti, ki skupaj z etalom ohmske upornosti zagotavlja točnejšo realizacijo ampera.

Westonov etalon napetosti

Ta etalon je pravzaprav kadmijev galvanski člen in se kot etalon uporablja okoli 100 let. Ima vrsto dobrih lastnosti, ki jih stabilno ohranja v primernem okolju in ob skrbnem vzdrževanju. Ob čistih sestavinah in temperaturi 20 °C zavzame etalon v neobremenjenem stanju napetost $U = 1,01865$ V, z negotovostjo okoli 10^{-6} .



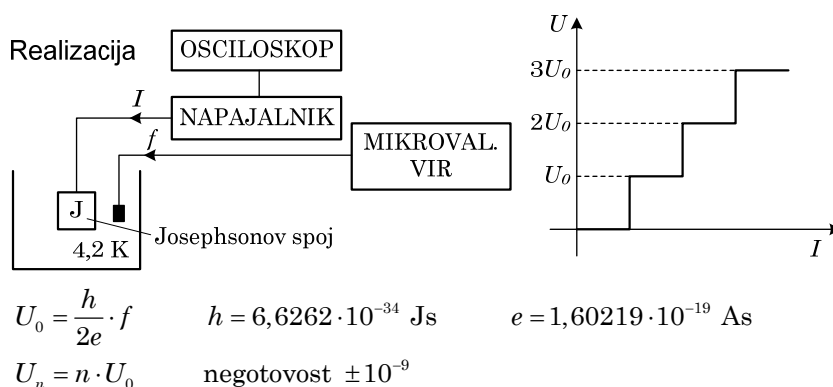
Slika 2-1: Westonov etalon napetosti.

Pogoji vzdrževanja in uporabe so: konstantna temperatura, neobremenjevanje etalona, brez mehanskih vplivov, čas za stabilizacijo po transportu,...

Westonov etalon spada v razred sekundarnih etalonov. Slovenski nacionalni etalon napetosti je skupina šestih enakih Westonovih etalonov.

Josephsonov etalon napetosti

Pri tem etalonu je izkoriščen kvantni Josephsonov pojav. Josephsonov spoj, to sta dva prevodnika (na primer niobij), ločena z zelo tanko plastjo izolacije, je v supraprevodnem stanju (temperatura 4,2 K) izpostavljen visokofrekvenčnemu elektromagnetnemu polju velikostnega reda več GHz. Če ta spoj napajamo z zvezno naraščajočim enosmernim tokom, nastaja na njem stopničasto naraščajoča napetost.



Slika 2-2: Josephsonov etalon napetosti.

Napetost n -te stopnice se izračuna z enačbo:

$$U_0 = \frac{h}{2e} \cdot f = \frac{f}{K_J} \quad (2-1)$$

$$U_n = n \cdot U_0$$

f je frekvenca elektromagnetnega polja, h Planckova konstanta, e naboj elektrona. Razmerje $2e/h$ je Josephsonova konstanta, ki znaša po mednarodnem dogovoru iz leta 1990 $K_{J-90} = 483.597,9 \text{ GHz/V}$.

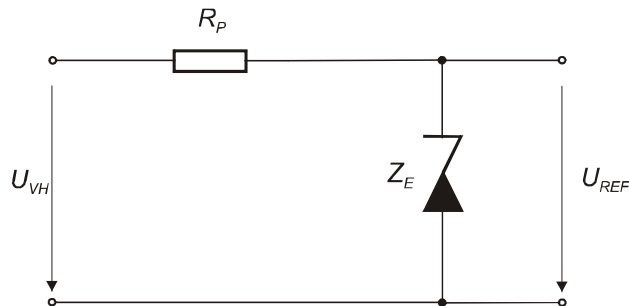
Ker je napetost enega spoja nizka, na primer pri 100 GHz okoli 200 μV , je potrebno veliko število zaporedno vezanih spojev za etalon 1 V in 10 V.

Vsi vplivni faktorji v enačbi se dajo določiti z visoko točnostjo in je zato negotovost napetost okoli 10^{-8} . Ta etalon spada v razred primarnih etalonov.

Elektronski etalon napetosti

Kot napetostni etaloni se uporabljajo tudi visoko stabilni elektronski izvori napetosti tako imenovani napetostni kalibratorji. Referenca v njih je izvedena z uporabo Zenerjevih diod. Izdelani so za različna napetostna območja za enosmerne, pa

tudi izmenične napetosti. Na trgu jih ponujajo renomirani svetovni proizvajalci, nekaj pa tudi slovenski. Ta vrsta etalonov je posebej uporabna pri sistematični kontroli točnosti merilnih instrumentov in naprav, kalibriranju.



Slika 2-3: Stabilizacija napetosti z Zener diodo.

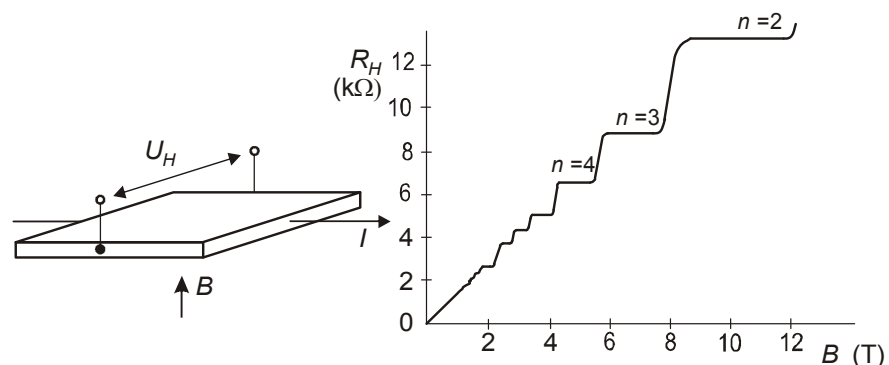
Kvantni Hallov etalon upornosti

Za realizacijo tega etalona je uporabljen 1980. leta odkriti von Klitzingov efekt. Upornost etalona v močnem magnetnem polju (nad 2 T) za zelo tanek sloj polprevodnika v supraprevodnem stanju (temperatura 0,2-2 K) znaša:

$$R_H = \frac{U_H}{I} = \frac{h}{e^2 \cdot n} = \frac{25.812,807}{n} = \frac{K_K}{n}. \quad (2-2)$$

Pri tem pomenijo:

- U_H - Hallova napetost
- I - tok skozi polprevodnik
- h - Planckova konstanta
- e - naboj elektrona
- n - celo število
- K_K - von Klitzingova konstanta, $K_K = 25.812,807 \, \Omega$



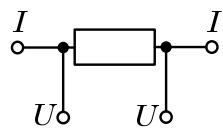
Slika 2-4: Karakteristika kvantiziranega Hallovega upora.

Upornost zavzame v takih razmerah določen diskretni nivo, določljiv z visoko točnostjo, negotovost je okoli 10^{-8} . Ta etalon spada v razred primarnih etalonov.

Materialni etalon upornosti

To so upori, izdelani najpogosteje iz manganina, zlitine bakra, mangana in niklja (okoli 84 % bakra, 12 % mangana in 4 % niklja), katere dobra lastnost je zelo nizek temperaturni koeficient. Za primerjavo, temperaturni koeficient bakra je nekaj stokrat večji. Za majhne vrednosti upornosti je izvedba v obliki manganinske ploščice, za večje pa so upori naviti iz manganinske žice. Zaradi zmanjšanja parazitnih induktivnih in kapacitivnih vplivov se uporabljajo posebni načini navijanja. Ena teh rešitev je bifilarno navijanje, ki pa tudi ne reši vseh problemov. Zato je eden od podatkov o kakovosti etalona tudi njegova časovna konstanta.

Etaloni te vrste imajo praviloma štiri priključne sponke, dve masivnejši tokovni in dve napetostni, da se pri uporabi izloči vpliv povezovalnih vodnikov. To je posebej pomembno pri majhnih vrednostih upornosti. Etaloni so izdelani v dekadnih stopnjah od $1\ \mu\Omega$ do $1\ \text{M}\Omega$. Negotovost je okoli 10^{-4} do 10^{-5} . Spadajo v razred sekundarnih etalonov.



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

pri $\omega^2 LC \ll 1$

$$\tau \doteq \frac{L}{R} - RC \quad \text{negotovost od } 10^{-4} \text{ do } 10^{-5}$$

Slika 2-5: Materialni etalon upornosti.

2.2.2 Promet z merili

Promet z merili je reguliran z zakonom o meroslovju in pomeni, da morajo vsa merila, ki gredo v promet, ustrezati meroslovnim predpisom, kar se potrdi s posebnimi postopki preverjanj in ustreznimi dokumenti, listinami o skladnosti. Kdo in na kakšen način izvaja preverjanja in izdaja dokumente, določi na predpisan način minister, pristojen za meroslovje. Vsa merila morajo imeti zagotovljeno tudi sledljivost, kar pomeni, da morajo imeti verificirano navezavo na etalone višje hierarhične stopnje. To dejansko pomeni, da pelje sledljivost vsakega merila do nacionalnega etalona in preko njega do mednarodnega. Trajnost te povezave se zagotavlja z rednimi, pa tudi izrednimi overitvami meril. Overitve so v pristojnosti pooblaščenih organov, laboratorijev, ki morajo za to dejavnost izpolnjevati posebne pogoje.

3. POGREŠKI PRI MERJENJIH

Želja vsake meritve je določitev prave, resnične vrednosti merjene fizikalne veličine, ki bi jo lahko ugotovili le z idealnim merjenjem. Realno pa lahko kljub vrhunski merilni opremi in najboljšim merilnim metodam dobimo le merilni rezultat, ki se bolj ali manj razlikuje od prave vrednosti merjene veličine. Pravimo, da smo dobili izmerjeno vrednost. Razlika izmerjene x_i in prave vrednosti x_{pr} predstavlja merilni pogrešek. Ta daje oceno točnosti meritve in je lahko absolutni (merilni) pogrešek:

$$E = x_i - x_{pr}, \quad (3-1)$$

ki ga dobimo v enotah merjene veličine ali relativni (merilni) pogrešek:

$$e = \frac{x_i - x_{pr}}{x_{pr}}, \quad (3-2)$$

ki je število brez enote.

Relativni pogrešek izražamo včasih tudi v odstotkih:

$$e(\%) = e \cdot 100 = \frac{x_i - x_{pr}}{x_{pr}} \cdot 100 (\%). \quad (3-3)$$

Prave vrednosti merjene veličine praviloma ne poznamo, vendar kljub temu želimo podatek o točnosti, torej kakovosti merilnega rezultata. Pomagamo si z dogovorjeno pravo vrednostjo (veličine), ki je vrednost, za katero lahko upravičeno trdimo, da je boljši približek pravi vrednosti kot posamezen merilni rezultat. To je lahko vrednost etalona ali kaka druga referenčna vrednost, velikokrat pa tudi aritmetična srednja vrednost ponovljenih merjenj merjene veličine.

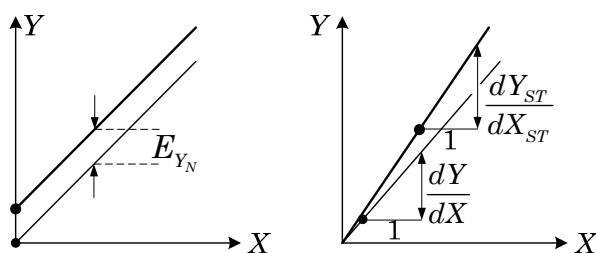
3.1 Vrste pogreškov

3.1.1 Sistematski pogreški

Vzrok sistematskih pogreškov je lahko nepopolno merilo, izbrana merilna metoda, pa tudi konstanten vpliv zunanje vplivne veličine (temperature, električnega polja, magnetnega polja,...). Njihova značilnost je, da vplivajo na merilni rezultat vedno na enak način.

Sistematski pogrešek je lahko ves čas meritve enak po vrednosti in predznaku, lahko pa se spreminja. Na primer da se povečuje, če merjena veličina narašča. Enak po vrednosti in predznaku je na primer ničelni pogrešek, enakomerno naraščajoč pa pogrešek strmine, glej sliko 3-1.

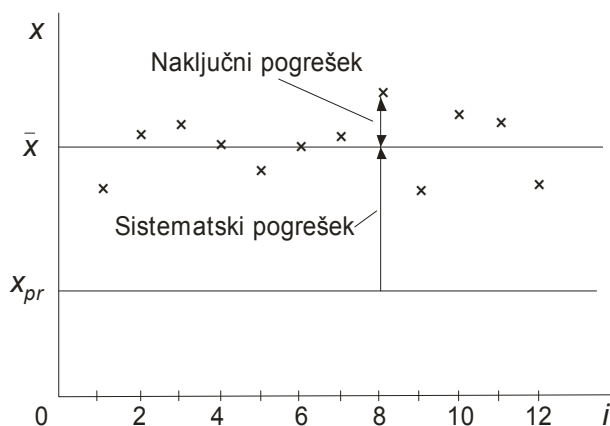
Če sistematski pogrešek odkrijemo, ga skušamo izločiti že pred meritvijo. Če ga pa ugotovimo po meritvi, lahko merilne rezultate popravimo za vrednost sistematskega pogreška, ne da bi ponovno merili. Če za prisotnost sistematskega pogreška ne vemo, je naš merilni rezultat kljub najbolj skrbnemu delu netočen.



Slika 3-1: Grafični prikaz ničelnega pogreška in pogreška strmine.

3.1.2 Naključni pogreški

Vzroka naključnih pogreškov ne moremo natančno določiti, pa tudi ne predvideti njihove vrednosti in predznakov. Vzamemo jih lahko kot posledico več vplivov v trenutku odčitka merilnega rezultata. Izhajajo iz trenutnega stanja merilne naprave in vpliva vplivnih veličin. Pri naslednji meritvi je ta vpliv lahko že nekoliko drugačen, naključni pogrešek se je spremenil. To dogajanje je naključno in neobvladljivo. Vpliv naključnih pogreškov opazimo takrat, kadar meritev ponavljamo v nespremenjenih pogojih in zaporedoma dobivamo bolj ali manj različne (sipane) merilne rezultate, slika 3-2. Če je sipanje večje, je meritev manj natančna, če pa manjše, je bolj natančna. Večja natančnost pa še ni zagotovilo visoke točnosti. Pojemov točnosti in natančnosti ne smemo zamenjavati.



Slika 3-2: Prava vrednost, sistematski pogrešek, naključni pogrešek.

Pri tem pomenijo:

- x_{pr} - prava vrednost merjene veličine
- $\bar{x}$ - aritmetična srednja vrednost
- i - zaporedna številka ponovljene meritve

3.2 Statistična obdelava merilnih rezultatov

Če želimo dobiti kakovosten, zanesljiv merilni rezultat in če nam razmere to omogočajo, napravimo več zaporednih meritev merjene veličine. Seveda prej odpravimo vse ugotovljene sistematske pogreške. Tako bodo na merilne rezultate vplivali le neugotovljeni sistematski in naključni pogreški.

Vzemimo, da smo izvedli meritev merjene veličine večkrat zaporedoma, v enakih pogojih in dobili merilne rezultate $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$. Tako dobljeni rezultati se sicer med sabo razlikujejo, lahko so nekateri med njimi tudi enaki, vsi pa so enakovredni, nobeden nima prednosti pred drugim. Z vsemi rezultati izračunamo prvi statistični parameter, aritmetično srednjo vrednost:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i. \quad (3-4)$$

Velja, da je v danih razmerah aritmetična srednja vrednost najboljši približek pravi vrednosti merjene veličine. Če bi opravili neskončno število meritev bi dobili aritmetično srednjo vrednost μ , ki bi vključevala samo neugotovljene sistematske pogreške. Sklepamo tudi, da bi se aritmetična srednja vrednost izenačila s pravo vrednostjo, če bi opravili neskončno število meritev in ne bi bilo sistematskih pogreškov.

Naslednji statistični parameter je eksperimentalni standardni odmik:

$$s_x = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_N - \bar{x})^2}{N - 1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}}, \quad (3-5)$$

ki označuje raztros merilnih rezultatov in je pravzaprav povprečni pogrešek te meritve, izračunan iz kvadratov pogreškov posameznih merjenj. Eksperimentalni standardni odmik neskončnega števila merilnih rezultatov je standardna deviacija σ . Če eksperimentalni standardni odmik kvadriramo, dobimo naslednji statistični parameter, eksperimentalno varianco s_x^2 .

Zamislimo si, da smo z meritvami dobili več nizov merilnih rezultatov, torej tudi niz aritmetičnih srednjih vrednosti in niz eksperimentalnih standardnih odmikov. Kolik bi bil eksperimentalni standardni odmik niza aritmetičnih srednjih vrednosti? Izkaže se, da je mogoče izraziti (napovedati) eksperimentalni standardni odmik aritmetičnih srednjih vrednosti z izrazom:

$$s_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{N}}, \quad (3-6)$$

torej je manjši, kar je razumljivo, saj smo za njegovo oceno predvideli večje število merilnih rezultatov. Vidi pa se tudi, da se $s_{\bar{x}}$ manjša počasneje, kot povečujemo število meritev, kar vodi v razmislek, koliko smiselno je povečevati število meritev z namenom povečevanja točnosti merilnega rezultata. Samo nekaj meritev ne zadošča, močno povečanje pa tudi ne doprinese bistvenega povečanja točnosti. Praktično se priporoča okoli 20-30 meritev.

3.2.1 Histogram, porazdelitve (Gauss)

Z zaporednimi meritvami neke fizikalne veličine dobimo merilne rezultate, ki jih praviloma vnesemo v tabelo, velikokrat pa predstavimo tudi v grafu, v katerem se lažje opazijo značilna spreminjanja. Z dobljenimi rezultati oblikujemo tudi histogram, ki pokaže porazdelitev, pogostost pojavljanja merilnih rezultatov v nekem območju njihovih vrednosti.

Poglejmo primer dvajsetih zaporednih meritev napetosti ($N = 20$), rezultati so podani v tabeli 3-1.

Tabela 3-1: Tabela izmerjenih vrednosti.

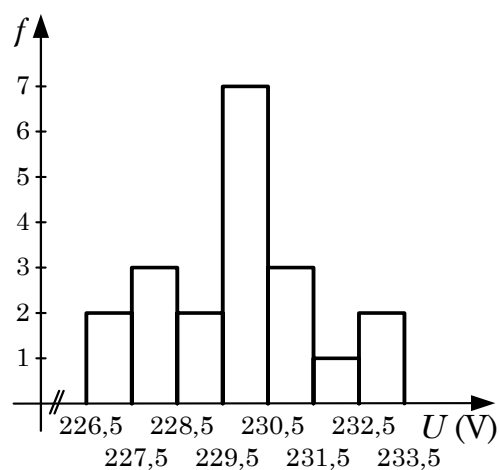
i	U_i (V)	i	U_i (V)
1	230,4	11	228,7
2	226,7	12	227,5
3	230,9	13	232,1
4	232,8	14	229,9
5	230,2	15	233,1
6	227,9	16	228,4
7	229,3	17	230,6
8	230,3	18	230,3
9	229,5	19	231,4
10	227,3	20	229,7

Če preverimo merilne rezultate, lahko ugotovimo najnižjo vrednost napetosti $U_{min} = 226,7$ V in najvišjo vrednost $U_{max} = 233,1$ V. Območje med tema vrednostma razdelimo na določeno število razredov. V našem primeru jih izberemo sedem. k -ti razred zajema merilne rezultate U_i , ki so med $U_{k,sp} \leq U_i < U_{k,zg}$. Število rezultatov uvrščenih v določen razred imenujemo frekvenco f_k . Izračunamo pa lahko tudi relativno frekvenco f_k/N . Ti rezultati so podani v tabeli 3-2.

Tabela 3-2: Tabela frekvenc.

k	$U_{k,sp}$ (V)	$U_{k,zg}$ (V)	f_k	f_k/N
1	226,5	227,5	2	0,1
2	227,5	228,5	3	0,15
3	228,5	229,5	2	0,1
4	229,5	230,5	7	0,35
5	230,5	231,5	3	0,15
6	231,5	232,5	1	0,05
7	232,5	233,5	2	0,1

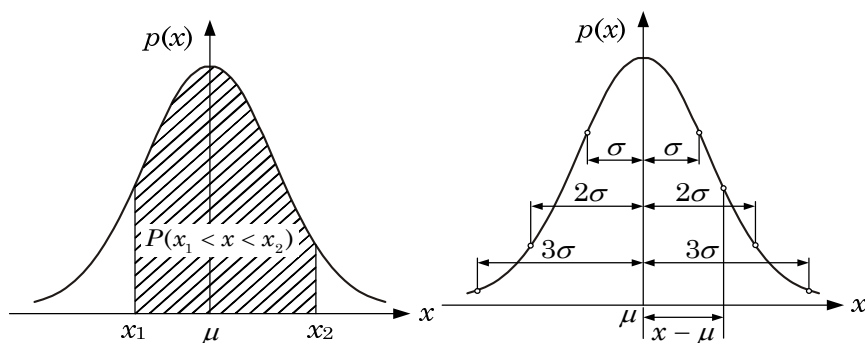
Grafična predstavitev rezultatov v tabeli je histogram, slika 3-3. V tem primeru ga podajamo s frekvenco, lahko bi ga pa tudi z relativno frekvenco.

**Slika 3-3:** Histogram izmerjenih vrednosti.

Če bi število meritev večali preko vseh meja, razrede pa ožili proti 0, bi histogram prešel v zvezni potek krivulje gostote verjetnosti. V merilni praksi je pogost primer Gaussova porazdelitev, imenovana tudi normalna porazdelitev. Pri tej na absciso (os x) nanašamo vrednosti merjene veličine, na ordinato (os y) pa gostoto verjetnosti $p(x)$.

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}, \quad (3-7)$$

pri čemer sta μ aritmetična srednja vrednost in σ standardna deviacija neskončnega števila merjenj.



Slika 3-4: Graf Gaussove porazdelitve.

Če želimo napovedati verjetnost, da se bo izmerjena vrednost nahajala med x_1 in x_2 , moramo s pomočjo integrala izračunati ploščino pod krivuljo med tema mejama.

$$P(x_1 \leq x \leq x_2) = \int_{x_1}^{x_2} p(x) dx = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{x_1}^{x_2} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx. \quad (3-8)$$

Glede na značilni potek Gaussove krivulje, ki se dotakne abscise (osi x) v minus neskončno in plus neskončno, dobimo verjetnost 1, če integriramo med tema mejama. Vse ostale izračunane verjetnosti so manjše od 1.

Integracija med značilnimi mejami, določenimi z eksperimentalnim standardnim odklikom, da tudi značilne vrednosti verjetnosti, ki jih podajamo v naslednji tabeli.

Tabela 3-3: Značilne vrednosti verjetnosti pri Gaussovi porazdelitvi.

Spodnja in zgornja meja		Verjetnost, da se x nahaja	
		znotraj meja	zunaj meja
$\mu - 0,674\sigma$	$\mu + 0,674\sigma$	0,5	0,5
$\mu - \sigma$	$\mu + \sigma$	0,6826	0,3174
$\mu - 2\sigma$	$\mu + 2\sigma$	0,9545	0,0455
$\mu - 3\sigma$	$\mu + 3\sigma$	0,9973	0,0027

3.3 Meja in območje zaupanja

Kot smo že ugotovili, aritmetična srednja vrednost ni enaka pravi vrednosti merjene veličine, tudi če smo odpravili vse sistematske pogreške, ampak ugotavljamo le meje, v katerih lahko z verjetnostjo P (stopnjo zaupanja) pričakujemo pravo vrednost. Če imamo na razpolago dovolj veliko število meritev, lahko predpostavimo, da je eksperimentalni standardni odklik s_x dovolj blizu standardni deviaciji σ . V takem primeru določimo meje in območje zaupanja na osnovi eksperimentalnega standardnega odklika aritmetičnih srednjih vrednosti $\bar{s}_x$ po naslednji tabeli:

Tabela 3-4: Območje zaupanja pri Gaussovi porazdelitvi.

Statistična verjetnost	Območje zaupanja
$P=0,683$	$\bar{x} \pm \frac{s_x}{\sqrt{N}}$
$P=0,95$	$\bar{x} \pm \frac{1,96 \cdot s_x}{\sqrt{N}}$
$P=0,99$	$\bar{x} \pm \frac{2,58 \cdot s_x}{\sqrt{N}}$
$P=0,9973$	$\bar{x} \pm \frac{3 \cdot s_x}{\sqrt{N}}$

Območje zaupanja je območje okrog srednje vrednosti, v katerem lahko z verjetnostjo P pričakujemo lego prave vrednosti merjene veličine.

Kadar imamo na razpolago majhno število meritev in je določitev eksperimentalnega standardnega odklona negotova, ne uporabljamo Gaussove porazdelitve, ampak Studentovo, imenovano tudi t porazdelitev.

3.3.1 Določanje meja pogreškov pri enkratnih merjenjih

Velikokrat v merilni praksi opravimo le eno meritev merjene veličine in imamo seveda le en merilni rezultat. Kakršnakoli statistična obdelava v takem primeru ni mogoča. Kljub temu je treba tudi v takem primeru rezultat kakovostno ovrednotiti. Uporabimo podatke instrumenta, ki to omogočajo, torej podatke o njegovi točnosti. Pri analognih merilnih instrumentih je to najpogostejše razred točnosti, pri digitalnih pa je praviloma podan izraz, s katerim izračunamo maksimalni mogoči pogrešek pri naši meritvi.

Meja pogreška pri analognih merilnih instrumentih

Kadar ustrezno overjene merilne instrumente uporabljamo v referenčnih razmerah, smemo privzeti, da njihov pogrešek ne preseže vrednosti, ki je dana s podatkom o njihovem razredu. Razred je praviloma le številčna oznaka, ki je običajno na čelni plošči instrumenta. To je za analogne merilne instrumente ena od standardiziranih vrednosti: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5 in 5. Ta številka pomeni odstotek, kar pa na instrumentu ni posebej označeno. Prav tako ni označeno, da velja predznak plus/minus ($\pm$). V veliki večini primerov pomeni razred r odstotek merilnega dosega x_D . Tako dobimo maksimalni absolutni pogrešek E_m z enačbo:

$$E_m = \pm \frac{r}{100} x_D. \quad (3-9)$$

Ta absolutna mejna vrednost velja pri katerikoli izmerjeni vrednosti x_i na tem območju. Seveda pa to pomeni, da je relativna meja pogreška e_m enaka razredu pri izmerjeni vrednosti, ki je

enaka dosegu in narašča z manjšanjem izmerjene vrednosti (oziroma odklona instrumenta), saj velja zanjo izraz:

$$e_m = \pm \frac{E_m}{x_i} = \pm \frac{r}{100} \frac{x_D}{x_i}. \quad (3-10)$$

Da bi relativna meja pogreška ostala v sprejemljivih mejah, skušamo v praksi izbirati merilna območja tako, da instrumenti kažejo v zadnji tretjini skale.

Zelo redko pa pomeni razred odstotek izmerjene vrednosti in ga označimo z $\textcircled{r}$. V takih primerih je absolutna meja pogreška:

$$E_m = \pm \frac{r}{100} x_i \quad (3-11)$$

in relativna meja pogreška:

$$e_m = \pm \frac{E_m}{x_i} = \pm \frac{r}{100}. \quad (3-12)$$

Tokrat je relativna meja pogreška v vsem merilnem območju konstantna, z manjšanjem izmerjene vrednosti pa se manjša absolutna meja pogreška.

Meja pogreška pri digitalnih merilnih instrumentih

Za digitalne merilne instrumente proizvajalci običajno navedejo mejo pogreška, sestavljeno iz dveh delov, iz dela, ki se nanaša na izmerjeno vrednost x_i in dela, ki se nanaša na merilni doseg x_D , na primer:

$$E_m = \pm (0,05\% \cdot x_i + 0,02\% \cdot x_D)$$

$$e_m = \pm \frac{E_m}{x_i}. \quad (3-13)$$

Namesto z merilnim dosegom, izrazijo proizvajalci včasih delež meje pogreška, ki se nanaša na merilni doseg s številom digitov d , na primer:

$$E_m = \pm (0,05\% \cdot x_i + 2d). \quad (3-14)$$

Digit je vrednost merjene veličine, ki ustreza najmanjšemu decimalnemu mestu na instrumentu oziroma njegovi ločljivosti. Relativno mejo pogreška e_m izrazimo enako kot v prejšnjem primeru.

Meja pogreška pri posredno merjenih veličinah

Posredno merjeno veličino y izračunamo s funkcijo f ene ali več spremenljivk, na primer za eno spremenljivko x :

$$y = f(x). \quad (3-15)$$

Sprememba x za dx spremeni y za dy

$$y + dy = f(x + dx). \quad (3-16)$$

Desno stran enačbe razvijemo v Taylorjevo vrsto, zanemarimo člen drugega in višjih redov:

$$\begin{aligned} y + dy &= f(x) + f'(x) \cdot dx \\ dy &= f'(x) \cdot dx \end{aligned} \quad (3-17)$$

Izraženo s končnimi spremembami:

$$\Delta y = f'(x) \cdot \Delta x. \quad (3-18)$$

Za funkcije več spremenljivk velja:

$$\Delta y = \frac{\partial y}{\partial x_1} \cdot \Delta x_1 + \frac{\partial y}{\partial x_2} \cdot \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial y}{\partial x_N} \cdot \Delta x_N = \sum_{i=1}^N \frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot \Delta x_i. \quad (3-19)$$

Določitev sistematskega pogreška E_{s_y} posredno merjene veličine y :

$$\begin{aligned} \Delta y &= E_{s_y} \text{ in } \Delta x_i = E_{s_i} \\ E_{s_y} &= \frac{\partial y}{\partial x_1} \cdot E_{s_1} + \frac{\partial y}{\partial x_2} \cdot E_{s_2} + \dots + \frac{\partial y}{\partial x_N} \cdot E_{s_N} = \sum_{i=1}^N \frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot E_{s_i}. \end{aligned} \quad (3-20)$$

Določitev meje naključnega pogreška E_{n_y} posredno merjene veličine y :

$$E_{n_y} = \pm \left(\left| \frac{\partial y}{\partial x_1} \cdot E_{n_1} \right| + \left| \frac{\partial y}{\partial x_2} \cdot E_{n_2} \right| + \dots + \left| \frac{\partial y}{\partial x_N} \cdot E_{n_N} \right| \right) = \pm \sum_{i=1}^N \left| \frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot E_{n_i} \right|. \quad (3-21)$$

Meja relativnega pogreška pa je:

$$e_{n_y} = \pm \frac{E_{n_y}}{y}. \quad (3-22)$$

Splošni primeri:

$$\begin{aligned} \bullet \text{ vsota} \quad y &= x_1 + x_2 & e_{n_y} &= \pm \frac{|e_{x_1} \cdot x_1| + |e_{x_2} \cdot x_2|}{x_1 + x_2}, \end{aligned} \quad (3-23)$$

$$\begin{aligned} \bullet \text{ razlika} \quad y &= x_1 - x_2 & e_{n_y} &= \pm \frac{|e_{x_1} \cdot x_1| + |e_{x_2} \cdot x_2|}{x_1 - x_2}, \end{aligned} \quad (3-24)$$

$$\bullet \text{ produkt} \quad y = x_1 \cdot x_2 \quad e_{n_y} = \pm \left(|e_{x_1}| + |e_{x_2}| \right), \quad (3-25)$$

$$\bullet \text{ kvocient} \quad y = \frac{x_1}{x_2} \quad e_{n_y} = \pm \left(|e_{x_1}| + |e_{x_2}| \right), \quad (3-26)$$

$$\bullet \text{ potenciranje} \quad y = x^n \quad e_{n_y} = \pm |n \cdot e_x| \quad (3-27)$$

$$\text{in} \quad y = x^{\frac{1}{n}} = \sqrt[n]{x} \quad e_{n_y} = \pm \left| \frac{1}{n} e_x \right|. \quad (3-28)$$

Ti izrazi veljajo za najbolj neugoden primer:

- predznaki posameznih naključnih pogreškov so taki, da se vsi vplivi seštevajo;
- ko izhajamo pri oceni posameznih pogreškov iz danih meja (na primer razred instrumenta), pomeni, da predpostavljamo največji mogoči posamezni $E_1, \dots, E_n$ oziroma $e_1, \dots, e_n$.

Zato je ocena v tem primeru z veliko verjetnostjo prevelika oziroma meja preširoka. Novi meroslovni dokumenti priporočajo, da pri obravnavi vpliva naključnih pogreškov določamo merilno negotovost skladno z ustreznimi vodili.

3.4 Merilna negotovost

3.4.1 Pomen osnovnih izrazov

Merilna negotovost: parameter, ki je povezan z merilnim rezultatom in označuje raztros vrednosti, ki jih je upravičeno mogoče pripisati merjeni veličini.

Ovrednotenje negotovosti tipa A: metoda ovrednotenja standardne negotovosti s statistično analizo serije opazovanj (npr. več zaporednih merjenj napetosti, sledi izračun standardnega odmika).

Ovrednotenje negotovosti tipa B: metoda ovrednotenja standardne negotovosti s sredstvi, ki so različna od statistične analize serije opazovanj (npr. podatke potrebne za ovrednotenje merilne negotovosti pridobimo iz podatka o razredu merilnega instrumenta).

Standardna merilna negotovost $u(y)$: negotovost merilnega rezultata, izražena kot standardni odmik s_y . Standardni odmik je enak pozitivnemu kvadratnemu korenu variance s_y^2 . Če je y funkcija ene same spremenljivke x , izrazimo odgovarjajoči standardni odmik kot

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}}, \text{ kjer je srednja vrednost } \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i. \quad (3-29)$$

Kombinirana standardna negotovost $u_c(y)$: standardna negotovost merilnega rezultata, če je ta rezultat dobljen iz vrednosti nekega števila drugih veličin (npr. posredno merjene veličine). Kombinirana standardna negotovost je enaka pozitivnemu kvadratnemu korenu vsote izrazov, ki so variance ali kovariance teh drugih veličin, uteženih v skladu s tem, kako merilni rezultati variirajo v odvisnosti od spremembe teh drugih veličin.

Razširjena merilna negotovost u : označuje interval okrog merilnega rezultata, za katerega se lahko z odgovarjajočo verjetnostjo pričakuje, da obsega velik delež porazdelitve vrednosti, ki jih je moč upravičeno pripisati merjeni veličini. Izračunamo jo z množenjem kombinirane standardne merilne negotovosti $u_c(y)$ s faktorjem pokritja k .

Faktor pokritja k : numerični faktor, s katerim množimo kombinirano standardno negotovost, z namenom, da dobimo razširjeno merilno negotovost.

3.4.2 Standardna negotovost tipa A

Izhajamo iz niza merilnih rezultatov $x_1, \dots, x_N$, dobljenih s ponavljanjem meritev merjene veličine x . Izračunamo $\bar{x}$ in standardni odmik

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}, \quad (3-30)$$

ter varianco

$$s_x^2 = \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2. \quad (3-31)$$

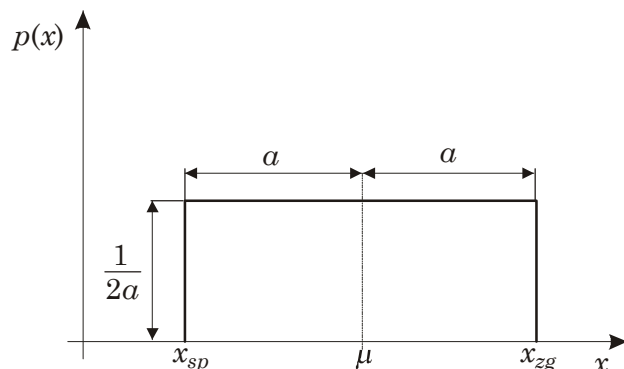
Kadar je število meritev $N \geq 10$, ocenimo negotovost tipa A:

$$u_x = \frac{s_x}{\sqrt{N}} = s_{\bar{x}}. \quad (3-32)$$

Če pa je število meritev $N < 10$, moramo $s_{\bar{x}}$ pomnožiti s faktorjem iz pripadajoče tabele v vodilu *A13: Merilna negotovost, USM 1996* (npr. $N = 5$, faktor je 1,4).

3.4.3 Standardna negotovost tipa B

Največkrat jo določimo na osnovi specifikacij merilne opreme, podatkov o umerjanju meril, podanih toleranc itd. Privzamemo določeno utemeljeno porazdelitev. Kadar opravimo samo eno meritev, na razpolago pa so podatki o razredu ali meji pogreška instrumenta, se najpogosteje predpostavi enakomerna porazdelitev, kar pomeni, da so vse vrednosti merjene veličine med zgornjo in spodnjo mejo enako verjetne, slika 3-5.



Slika 3-5: Enakomerna porazdelitev.

Pričakovana vrednost je μ :

$$\mu = \frac{1}{2} \cdot (x_{sp} + x_{zg}), \quad (3-33)$$

varianca pa:

$$\sigma^2 = \frac{1}{12} \cdot (x_{zg} - x_{sp})^2, \quad (3-34)$$

oziroma ob razliki mejnih vrednosti $2a$

$$\sigma^2 = \frac{1}{3} \cdot a^2, \quad (3-35)$$

standardna deviacija pa

$$\sigma = \frac{a}{\sqrt{3}}. \quad (3-36)$$

Pri enakomerni porazdelitvi je standardna negotovost tipa B

$$u_x = \sigma = \frac{a}{\sqrt{3}}. \quad (3-37)$$

3.4.4 Kombinirana standardna negotovost $u_c(y)$ pri nekoreliranih vhodnih veličinah

Izhajamo iz tega, da je izhodna veličina y funkcija ene ali več medsebojno neodvisnih vhodnih veličin x , katerih vrednosti dobimo npr. z merjenjem:

$$y = f(x_1, \dots, x_N), \text{ na primer } I = \frac{U}{R}. \quad (3-38)$$

Za nekorelirane vhodne veličine je kombinirana varianca

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u_{x_i}^2. \quad (3-39)$$

Za določitev kombinirane variance funkcije y je potrebno poznati merilne negotovosti u_{x_i} posameznih veličin x_i . Način določanja negotovosti lahko izhaja iz negotovosti tipa A in/ali tipa B. Iz variance $u_c^2(y)$ izračunamo kombinirano standardno negotovost

$$u_c(y) = \sqrt{u_c^2(y)}. \quad (3-40)$$

3.4.5 Razširjena negotovost u

Vrednost kombinirane standardne negotovosti pomnožimo s faktorjem pokritja k , ki ga običajno vzamemo $k = 2$, kar pomeni približno 95 % verjetnost. Razširjena negotovost je

$$u = k \cdot u_c(y). \quad (3-41)$$

3.4.6 Rezultat meritve

Rezultat meritve v končni obliki podamo z izrazom

$$y = y_i \pm u = y_i \pm k \cdot u_c(y). \quad (3-42)$$

Izraženo z relativno negotovostjo

$$y = y_i \cdot \left(1 \pm \frac{u}{y_i}\right) = y_i \cdot (1 \pm u'). \quad (3-43)$$

Pri tem moramo obvezno navesti tudi faktor pokritja k , ki je bil uporabljen za izračun razširjene negotovosti.

3.4.7 Primer izračuna merilne negotovosti

Podatki

$$I = \frac{U}{R}$$

a) Izmerjene vrednosti

	Meritev	$U_i [\text{mV}]$	$10^{-5} \cdot (U_i - \bar{U}) [\text{V}]$	$10^{-10} \cdot (U_i - \bar{U})^2 [\text{V}^2]$
<i>TIP A</i>	1	100,13	+10	100
	2	99,98	-5	25
	3	99,94	-9	81
	4	100,09	+6	36
	5	100,20	+17	289
	6	99,93	-10	100
	7	99,98	-5	25
	8	99,90	-13	169
	9	100,06	+3	9
	10	100,15	+12	144
	11	100,06	+3	9
	12	99,94	-9	81
	Σ	1200,36	0	1068

$$\bar{U} = \frac{\sum_{i=1}^{12} U_i}{12} = 100,03 \text{ mV} = 0,10003 \text{ V}$$

$$s_U = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{12} (U_i - \bar{U})^2}{12 - 1}} = 9,85 \cdot 10^{-5} \text{ V} \quad u_{U_A} = s_{\bar{U}} = \frac{s_U}{\sqrt{N}} = 2,84 \cdot 10^{-5} \text{ V}$$

$$u_{U_A}^2 = s_{\bar{U}}^2 = 8,08 \cdot 10^{-10} \text{ V}^2$$

b) V-meter:

$$U_D = 200 \text{ mV}, \quad E_U = \pm(0,025\% \cdot U_i + 0,01\% \cdot U_D)$$

$$U_i = 100,03 \text{ mV}, \quad E_U = \pm 4,5 \cdot 10^{-5} \text{ V}$$

$$\textbf{TIP B} \quad u_{U_B} = \sigma_{U_B} = \frac{E_U}{\sqrt{3}} = 2,60 \cdot 10^{-5} \text{ V}$$

$$u_{U_B}^2 = 6,76 \cdot 10^{-10} \text{ V}^2$$

c) R-kalibracija:

$$R = 0,010018 \, \Omega, \quad u' = 6 \cdot 10^{-4}, \quad k = 2$$

$$\textbf{TIP B} \quad u_{R_B}^2 = \left(R \cdot \frac{u'}{k} \right)^2 = 9 \cdot 10^{-12} \, \Omega^2$$

Kombinirana standardna negotovost

$$u_c^2(I) = \left(\frac{\partial \frac{U}{R}}{\partial U} \right)^2 (u_{U_A}^2 + u_{U_B}^2) + \left(\frac{\partial \frac{U}{R}}{\partial R} \right)^2 u_{R_B}^2 = 23,8 \cdot 10^{-6} \text{ A}^2$$

$$u_c(I) = 4,88 \cdot 10^{-3} \text{ A}$$

Razširjena merilna negotovost

$$k = 2 \quad u = k \cdot u_c(I) = 2 \cdot 4,88 \cdot 10^{-3} = 9,76 \cdot 10^{-3} \text{ A}$$

Po zaokrožitvi je razširjena absolutna merilna negotovost

$$u = 10 \text{ mA}.$$

Relativna razširjena merilna negotovost je

$$u' = \frac{u}{I} = \frac{9,76 \cdot 10^{-3}}{9,985} = 1,0 \cdot 10^{-3}.$$

Zapis končnega merilnega rezultata

Z absolutno razširjeno merilno negotovostjo

$$I = \frac{U}{R} \pm u = 9,985 \text{ A} \pm 10 \text{ mA}$$

in z relativno razširjeno merilno negotovostjo

$$I = \frac{U}{R} \cdot (1 \pm u') = 9,985 \cdot (1 \pm 1,0 \cdot 10^{-3}) \text{ A}.$$

4. MERILNI OJAČEVALNIKI IN PRETVORNIKI

4.1 Merilni ojačevalniki

Velikokrat imajo merjene veličine zelo majhne vrednosti in jih neposredno z merilnimi instrumenti ni mogoče izmeriti. V takih primerih uporabljamo merilne ojačevalnike v katerih napetostne ali tokovne signale preoblikujemo v signale večjih moči, ki jih lahko lažje prenašamo in pretvarjamo (na primer v digitalno obliko), priključimo pa lahko tudi merilne instrumente z večjo lastno rabo. Merilni ojačevalniki morajo čim boljše opravljati svoje naloge v vezjih, kjer merimo, zato morajo izpolnjevati nekaj posebnih zahtev:

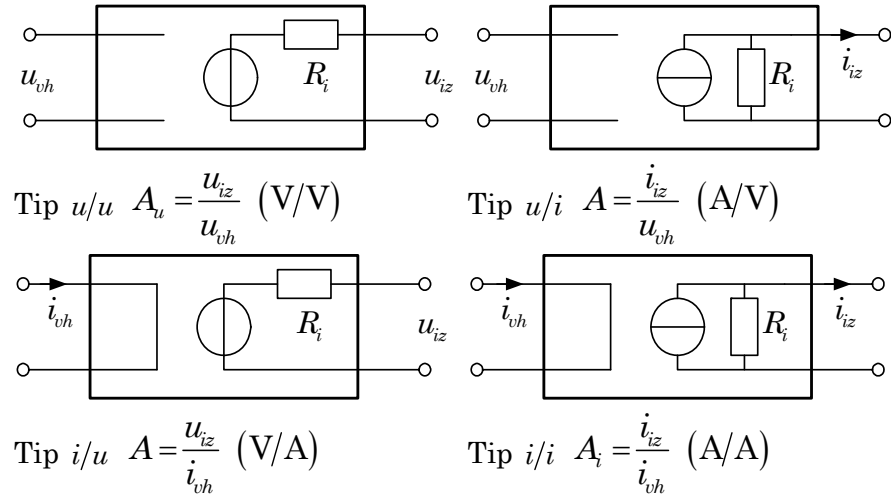
- njihov povratni vpliv na merjeno veličino mora biti minimalen, čim manj smejo obremeniti merilni objekt, zato mora biti njihova vhodna upornost pri merjenju napetosti zelo visoka, pri merjenju toka pa zelo nizka;
- imeti morajo visoko občutljivost, tudi pri zelo majhnih tokovnih in napetostnih signalih mora biti izhodni signal verna slika vhodnega signala;
- njihove prenosne lastnosti morajo biti točno definirane, izhodni signal mora biti enoumno odvisen od vhodnega signala;
- imeti morajo dobre dinamične lastnosti, izhodni signal ojačevalnika mora čim točneje slediti vhodnemu signalu, po vrednosti (amplitudi) in času;
- izhodni signal mora biti stabilen, ne sme se spreminjati zaradi priključenih merilnih naprav.

Merilni ojačevalniki imajo tudi nekaj zanje značilnih lastnosti, ki povzročajo dodatne zahteve, pa tudi pogoje pri meritvah. Ti so:

- nestabilno ojačenje,
- posebno (dodatno) napajanje,
- premaknitev (offset) napetosti ($2\ \mu\text{V}$ do $5\ \text{mV}$),
- lezenje (drift) napetosti ($0,001\ \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ do $15\ \mu\text{V}/^\circ\text{C}$).

Merilni ojačevalnik opazujemo kot generator, krmiljen z merjeno veličino. V idealnem primeru poteka krmiljenje brez moči. Pri merjenju napetosti je vhodna upornost ojačevalnika zelo velika (R_{vh} proti neskončno), pri merjenju toka pa majhna (R_{vh} proti nič). Ojačevalnik mora biti vedno napajan s posebnim virom energije, ki da moč na izhodu ojačevalnika. Izraz ojačenje se nanaša zlasti na razmerje izhodne in vhodne moči, vendar pa poznamo tudi drugačne definicije, na primer napetostno ali tokovno ojačenje. Tako napetostni kot tokovni signal na vhodu lahko povzročata

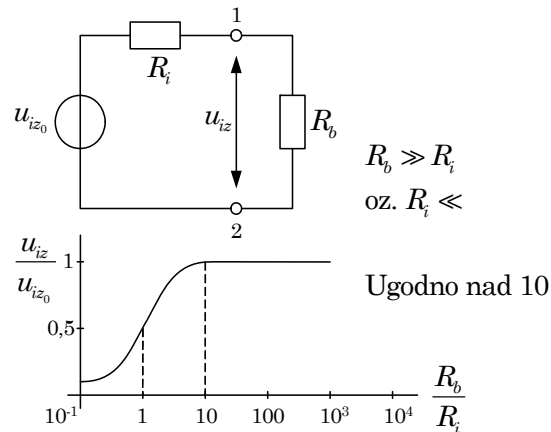
izhodno napetost ali izhodni tok. Faktor ojačenja A je definiran z razmerjem izhodne in vhodne veličine. Zato ločimo štiri osnovne tipe ojačevalnikov: u/u , u/i , i/u in i/i .



Slika 4-1: Osnovni tipi merilnih ojačevalnikov.

4.1.1 Izhodna stopnja ojačevalnika

Izhodna stopnja, kamor priključimo merilni instrument ali signal še naprej preoblikujemo, je lahko izvedena kot napetostni ali tokovni generator.

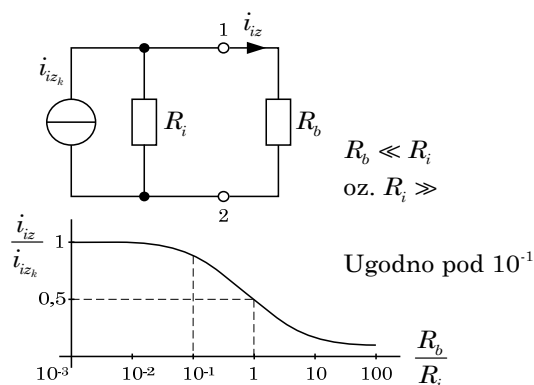


Slika 4-2: Merilni ojačevalnik kot napetostni generator.

Napetostni generator ima napetost praznega teka (ko je neobremenjen) u_{iz0} in notranjo upornost R_i . Med sponkama 1 in 2 pa dobimo napetost u_{iz} :

$$u_{iz} = \frac{R_b}{R_i + R_b} u_{iz0} . \quad (4-1)$$

Obe napetosti se le malo razlikujeta, dokler je upornost bremena (na primer merilnega instrumenta) R_b velika glede na notranjo upornost R_i . Zaželjena je torej visoka upornost R_b in nizka upornost R_i . Iz grafa je razvidno, katero razmerje R_b/R_i še zadostuje, da ostane pogrešek v sprejemljivih mejah, oziroma, da sta napetosti u_{iz_0} in u_{iz} blizu ena drugi. Praktično mora biti to razmerje najmanj 10.



Slika 4-3: Merilni ojačevalnik kot tokovni generator.

Tokovni generator je predstavljen s kratkostičnim tokom i_{iz_k} in s paralelno prikazano notranjo upornostjo R_i . Čez breme (na primer merilni instrument) R_b teče tok i_{iz} in je med sponkama 1 in 2 napetost:

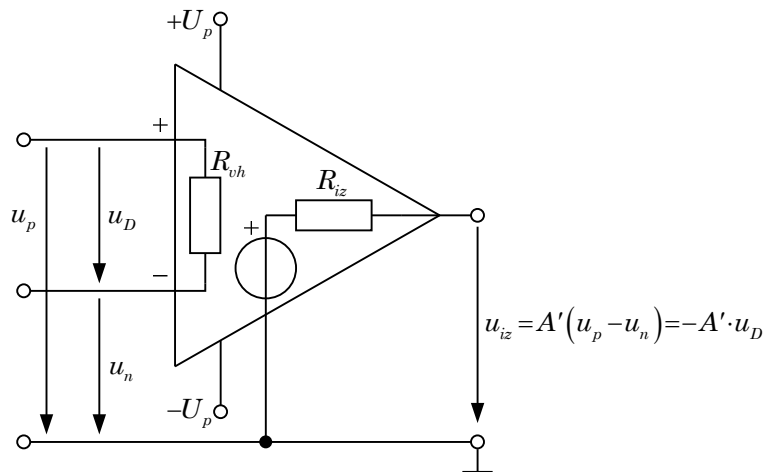
$$i_{iz} R_b = R_i (i_{iz_k} - i_{iz}). \quad (4-2)$$

Oba toka se le malo razlikujeta dokler je upornost bremena R_b majhna glede na notranjo upornost R_i . Zaželjena je torej nizka upornost R_b in visoka upornost R_i . Iz grafa je razvidno, katero razmerje R_b/R_i še zadostuje, da ostane pogrešek v sprejemljivih mejah, oziroma da sta toka i_{iz_k} in i_{iz} blizu eden drugemu. Praktično sme biti to razmerje največ 10^{-1} .

4.2 Operacijski ojačevalniki

Operacijski ojačevalniki so v merilni tehniki pogosto uporabljeni. To so integrirana elektronska vezja, s katerimi izvedemo želene računske operacije z merilnimi signali. Poleg štirih osnovnih računskih operacij so potrebne tudi druge, na primer korenjenje, potenciranje, integriranje, odvajanje. Vrsta računske operacije se doseže z ustrezno izvedbo povratne zveze, to je z uporabo uporov, kondenzatorjev, diod in drugih elementov. Značilnost teh vezij je visoko napetostno ojačenje in visoka vhodna R_{vh} ter nizka izhodna upornost R_{iz} .

Operacijski ojačevalnik ima dva vhoda in ojačuje razliko napetosti u_p na pozitivnem (+) vhodu in u_n na negativnem (-) vhodu, ki se nanašata na potencial mase.



Slika 4-4: Štiripolna slika operacijskega ojačevalnika.

Ojačenje ojačevalnika A' in napetost na izhodu u_{iz} v neobremenjenem stanju sta:

$$A' = \frac{u_{iz}}{u_D} = \frac{u_{iz}}{u_p - u_n} . \quad (4-3)$$

$$u_{iz} = A'(u_p - u_n)$$

Ojačenje A' ima vrednosti med 10^4 in 10^6 . Izhodna napetost narašča linearno z vhodno napetostjo, ne more pa preseči napajalne napetosti $\pm U$.

Pogosto se + vhod veže na maso ($u_p = 0$) in zato imata vhodna in izhodna napetost različna predznaka:

$$u_{iz} = -A' \cdot u_n \quad \text{pri } u_p = 0 . \quad (4-4)$$

V tem primeru je ojačevalnik inverter.

4.2.1 Povratna vezava pri operacijskih ojačevalnikih

Visoka vrednost ojačenja operacijskih ojačevalnikov ni niti natančno znana niti stabilna. Ta pomanjkljivost se popravi s povratno vezavo, tako dobi ojačevalnik definirane lastnosti. Princip negativne povratne vezave je v tem, da del izhodnega signala vodimo na vhod tako, da se odšteva od vhodnega signala. Na vhod ojačevalnika pripeljemo torej njuno razliko:

$$u_{iz} = A' \cdot u_d = A'(u_{vh} - k \cdot u_{iz}) . \quad (4-5)$$

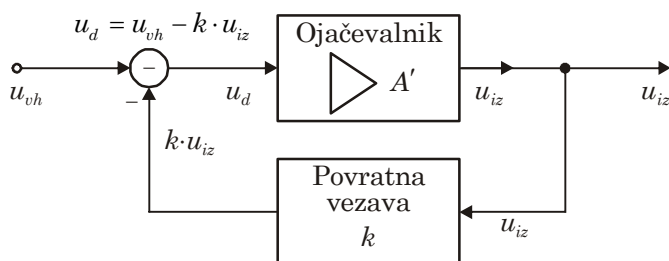
Iz tega dobimo ojačenje celotne vezave

$$A = \frac{u_{iz}}{u_{vh}} = \frac{A'}{1 + k \cdot A'} \quad (4-6)$$

Običajno je ojačenje A' veliko ter $k \cdot A' \gg 1$, zato lahko to enačbo zapišemo v obliki

$$A \cong \frac{1}{k} \quad (4-7)$$

Torej je ojačenje vezja A praktično določeno le z vezjem povratne vezave.

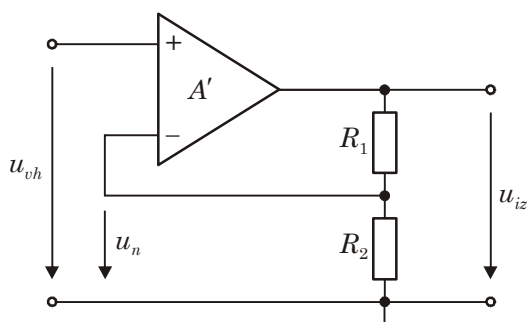


Slika 4-5: Operacijski ojačevalnik z negativno povratno vezavo.

Povratna vezava sicer stabilizira ojačenje, vendar je ojačenje vezja bistveno manjše od ojačenja ojačevalnika A' . Za primer navajamo: če je ojačenje vezja $A=100$, ojačenje ojačevalnika $A'=10^5$, se pri spremembi A' za 10 % A spremeni le za 0,01 %. Ostali vplivi povratne vezave so:

- vhodna upornost napetostnega ojačevalnika se poveča, tokovnega pa zmanjša;
- notranja upornost napetostnega generatorja se zmanjša, tokovnega pa poveča;
- mejna frekvenca se poveča, prav tako tudi pasovna širina.

Za primer pogledjmo razmere napetostne povratne vezave pri neinverzirajočem ojačevalniku oziroma elektrometrskem sistemu, slika 4-6.



Slika 4-6: Elektrometrski sistem.

Napetost, ki jo iz izhoda vodimo na vhod, je

$$u_n = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_{iz} = u_{iz} \frac{1}{1 + R_1/R_2}, \quad (4-8)$$

torej je

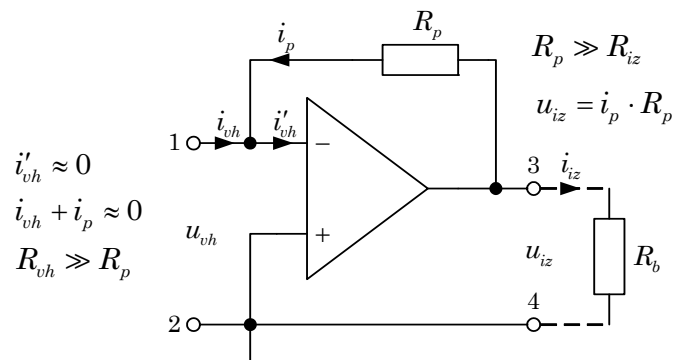
$$k = \frac{1}{1 + R_1/R_2} \quad (4-9)$$

in ojačenje vezja je

$$A \cong \frac{1}{k} = 1 + \frac{R_1}{R_2}. \quad (4-10)$$

4.2.2 Operacijski tokovno napetostni ojačevalnik (i/u)

Ta vrsta ojačevalnika je zelo uporabna za merilno tehniko. Ojačevalnik ima povratno vezavo, kar lahko prikažemo s štiripolno in tripolno shemo. Pozitivni (+) vhod ojačevalnika je povezan z maso. Povratna vezava povzroči nizko vhodno upornost, zato je to tokovni ojačevalnik.

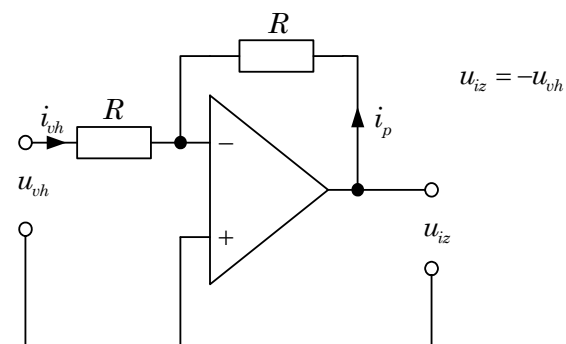


Slika 4-7: Tripolna shema operacijskega ojačevalnika s povratno vezavo.

Upoštevali bomo, da ima operacijski ojačevalnik zelo veliko vhodno upornost, zato je tok v ojačevalnik i'_{vh} praktično enak nič. V tem primeru je vhodni tok i_{vh} po velikosti enak, po predznaku pa nasproten toku v povratni vezavi i_p .

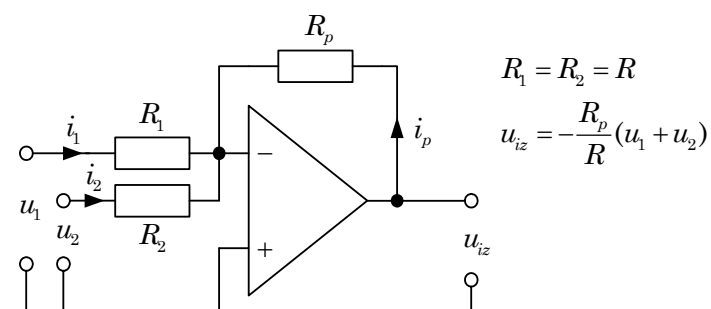
Izvedbe i/u ojačevalnikov

Inverter



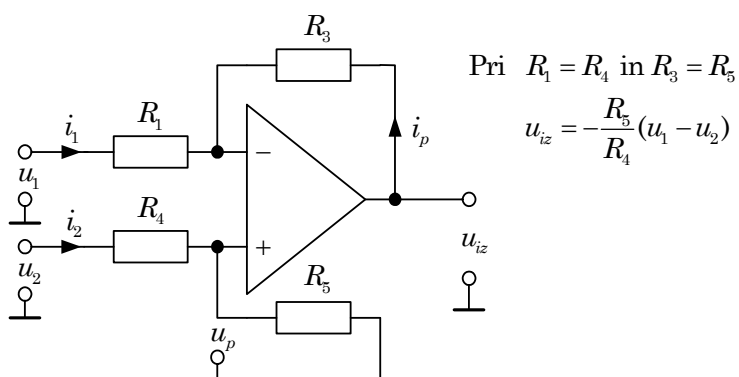
Slika 4-8: Vezje inverterja.

Seštevalnik



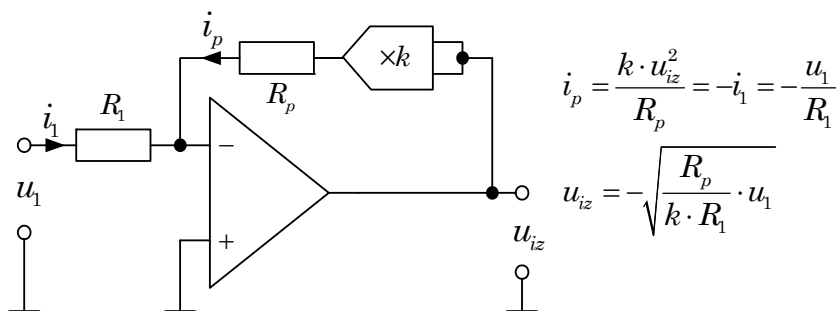
Slika 4-9: Vezje seštevalnika.

Odštevalnik



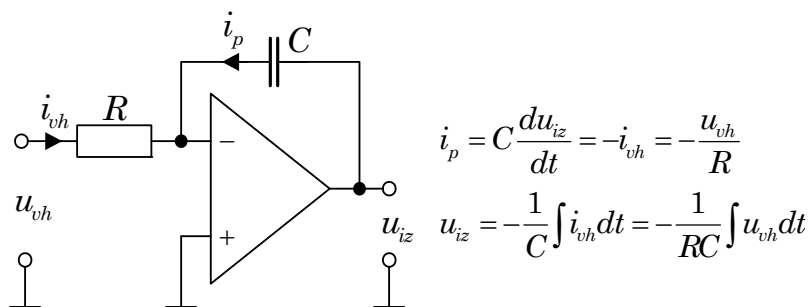
Slika 4-10: Vezje odštevalnika.

Korenjenje



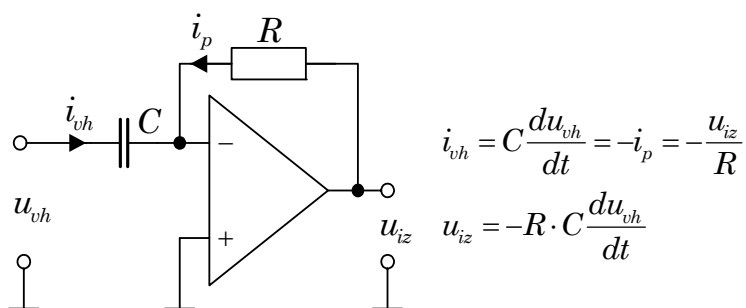
Slika 4-11: Vezje za korenjenje.

Integrator



Slika 4-12: Vezje integratorja.

Diferenciator



Slika 4-13: Vezje diferenciatorja.

4.2.3 Primeri vezij z operacijskimi ojačevalniki

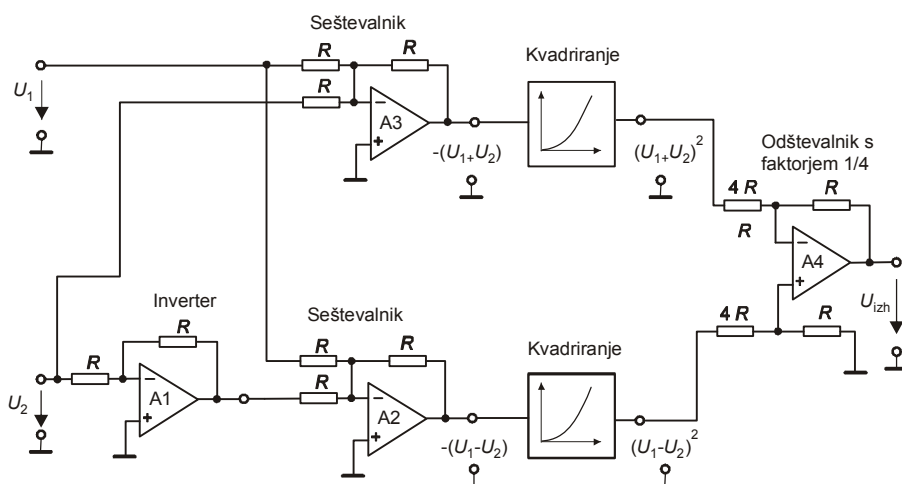
Analogni množilnik

Pri meritvah pogosto določamo veličine, ki se dajo izraziti s produktom večih drugih veličin. Značilen primer je moč P , ki jo lahko izrazimo kot produkt napetosti U in toka I . Množilnik na

izhodu daje zvezen potek napetosti u_{izh} , katere vrednost je odvisna od produkta trenutnih vrednosti dveh napetosti na vhodu. Ena teh napetosti je proporcionalna napetosti v vezju, druga pa toku.

Za realizacijo množilnika zapišemo produkt dveh napetosti v obliki, ki omogoči izvesti množenje z operacijskimi ojačevalniki.

$$u_{izh} = \frac{1}{4} \left((u_1 + u_2)^2 - (u_1 - u_2)^2 \right) = u_1 \cdot u_2 \quad (4-11)$$



Slika 4-14: Vezje analognega množilnika.

Seštevanje u_1 in u_2 izvede seštevalnik, odštevanje $u_1 - u_2$ pa inverter in seštevalnik. Člena za kvadriranje sta prikazana le simbolično, končno odštevanje pa je izvedeno z odštevalnikom. Z izbiro uporov na odštevalniku R in $4R$ pa vnesemo faktor $1/4$.

Na izhod množilnika je lahko priključen voltmeter, umerjen tako, da neposredno odčitamo vrednost veličine v ustrezni enoti.

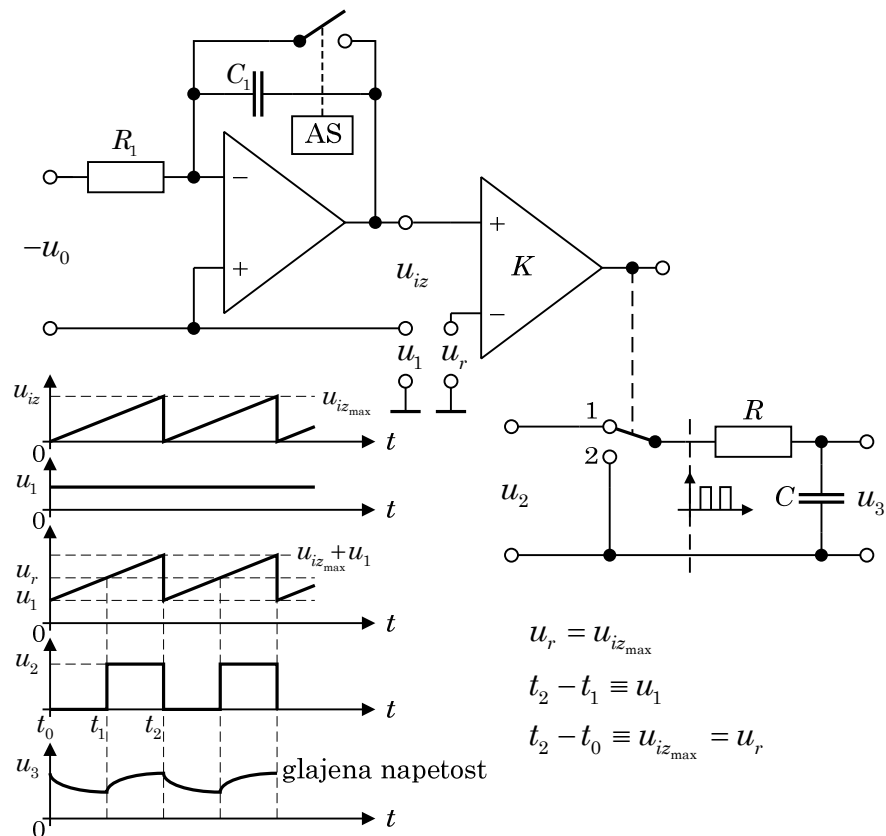
Impulzni množilnik

Izhodni signal impulznega množilnika je impulz, katerega amplituda je sorazmerna eni od vhodnih napetosti, čas trajanja pa drugi napetosti. Ti impulzi se ponavljajo z določeno frekvenco in se razlikujejo glede na spreminjanje vhodnih napetosti. Produktu vhodnih napetosti ustreza ploščina pod impulzom.

Naloga tega vezja je tvoriti impulz oziroma produkt napetosti u_1 in u_2 . Napetosti u_0 in u_r sta pomožni napetosti v vezju.

Krmiljeno stikalo v zgornjem delu vezja je najprej izključeno, zato se napetost u_{iz} integratorja enakomerno povečuje. Po kratki vključitvi stikala se kondenzator C izprazni, zato se u_{iz} zniža na 0. Vključevanje in izključevanje stikala teče z določeno frekvenco. Na (+) vhod komparatorja priključimo vsoto napetosti u_{iz} in u_1 , na (-) vhod pa konstantno referenčno napetost u_r . Ko se napetosti na obeh vseh izenačita, komparator spremeni izhodno stanje in posredno povzroči prekllop stikala v spodnjem delu vezja v položaj 1. Zato se takoj za stikalom pojavi začetek impulza z amplitudo u_2 . Ta traja toliko časa, dokler se vsota u_{iz} in u_1 ne zniža pod vrednost u_r , kar se zgodi takrat, ko se stikalo v zgornjem delu vezja vključi.

Iz časovnega poteka napetosti se vidi, da je s povečanjem napetosti u_1 impulz dalj časa na visokem nivoju, s povečanjem napetosti u_2 pa se poveča njegova amplituda. V vezju je prikazano še glajenje impulzne napetosti z RC vezjem, tako da ima napetost u_3 zvezen potek, njena vrednost pa je sorazmerna produktu napetosti u_1 in u_2 .



Slika 4-15: Vezje impulznega množilnika in časovni potek napetosti v vezju.

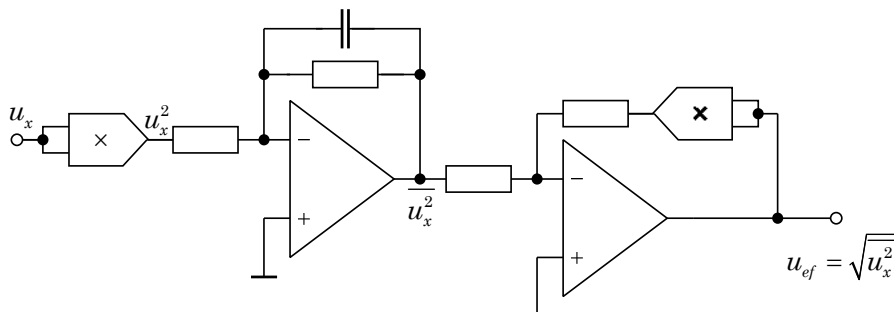
Tvorba efektivne vrednosti izmenične napetosti

V večini primerov z meritvami določamo efektivno vrednost izmenične napetosti. To omogočajo različni merilni instrumenti. Vendar so pri nekaterih določene omejitve uporabe, saj merijo pravilno le sinusno obliko napetosti. Vezje, ki je prikazano na sliki 4-16, da na izhodu pravo efektivno vrednost napetosti ne glede na njeno obliko. Preoblikovanje signala se namreč izvede skladno z definicijo efektivne vrednosti napetosti oziroma se izvedejo vse računske operacije, ki so za to potrebne.

$$u_{ef} = \sqrt{u_x^2} \quad (4-12)$$

Če merjena napetost vsebuje konice, ki povzročajo zasičenje ojačevalnikov, lahko voltmeter meri netočno. Proizvajalci zato

podajajo mejno vrednost temenskega faktorja, pri kateri je merilni rezultat še v mejah definirane točnosti. Temenski faktor je razmerje med temensko in efektivno vrednostjo signala.



Slika 4-16: Vezje za tvorbo efektivne vrednosti izmenične napetosti.

4.3 Merilni pretvorniki

4.3.1 Analogno digitalna pretvorba merilnega signala

Pri digitalnih merjenjih je temeljni člen digitalnih merilnih instrumentov analogno digitalni (AD) pretvornik. Ta je vmesni člen med največkrat analognim fizikalnim svetom in svetom digitalne obdelave signala. Analogna vhodna veličina je napetost u , ki jo lahko pretvorimo v "digitalno prijazni veličini", čas ali frekvenco. Ti veličini je mogoče meriti z visokimi točnostmi s štetjem impulzov, kar se da lahko predstaviti kot številko, razen tega pa nadalje obdelati z metodami digitalne tehnike.

Nosilci informacij so torej časovni ali frekvenčni signali. Gotovo pa je zaradi neidealne pretvorbe v diskretne signale del informacije, ki jo vsebuje analogni signal, izgubljen. Vendar pa imajo ti signali vrsto prednosti, ki omogočajo bistveno povečanje kakovosti merenj. Naštejmo nekatere:

- neobčutljivost na spremembe parametrov vodov,
- manjša občutljivost na elektromagnetne vplive,
- enostavna galvanska ločitev,
- ojačenje brez izgube točnosti,
- enostavna obdelava: seštevanje, odštevanje, množenje, deljenje, integriranje.

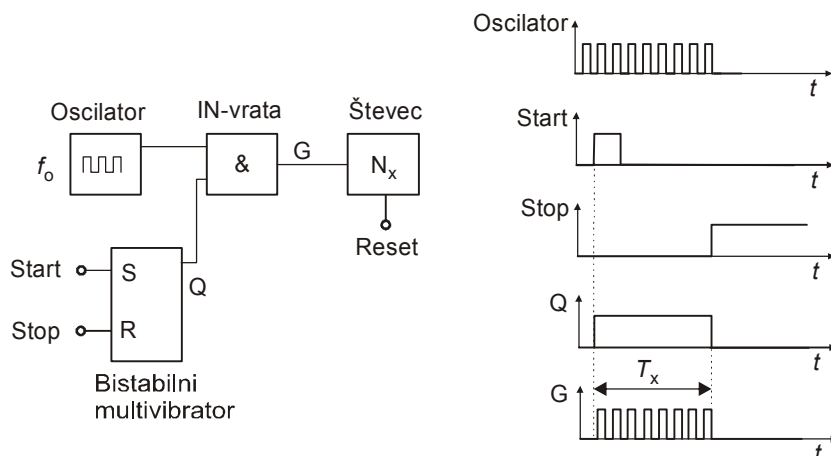
Časovne in frekvenčne meritve s štetjem impulzov so zelo podobne. Tok impulzov frekvence f teče med časovnim intervalom T v števec in povzroči v njem številčno stanje N .

$$N = f \cdot T. \quad (4-13)$$

Pri merjenju časa je znana frekvenca in je številčno stanje merilo za iskani čas T , pri merjenju frekvence pa je merilni čas konstanten in se iz številčnega stanja ugotovi frekvenca.

Merjenje časa

Merjenje časa prikazujemo z blokovno shemo na sliki 4-17. Na prvi vhod logičnega IN-vezja pripeljemo impulze iz oscilatorja z visoko točnostjo znane konstantne frekvence f_o , na drugi vhod pa signal iz bistabilnega multivibratorja. Impulz na "Start" postavi izhod vezja Q v stanje 1, ki odpre IN-vrata in števec začne šteti impulze oscilatorja. Po času T_x impulz na "Stop" postavi izhod vezja Q v stanje 0, ki zapre IN-vrata in števec preneha šteti.



Slika 4-17: Blokovna shema merjenja časa.

Prešteto število impulzov je:

$$N_x = f_o \cdot T_x \text{ in}$$

$$T_x = \frac{N_x}{f_o}. \quad (4-14)$$

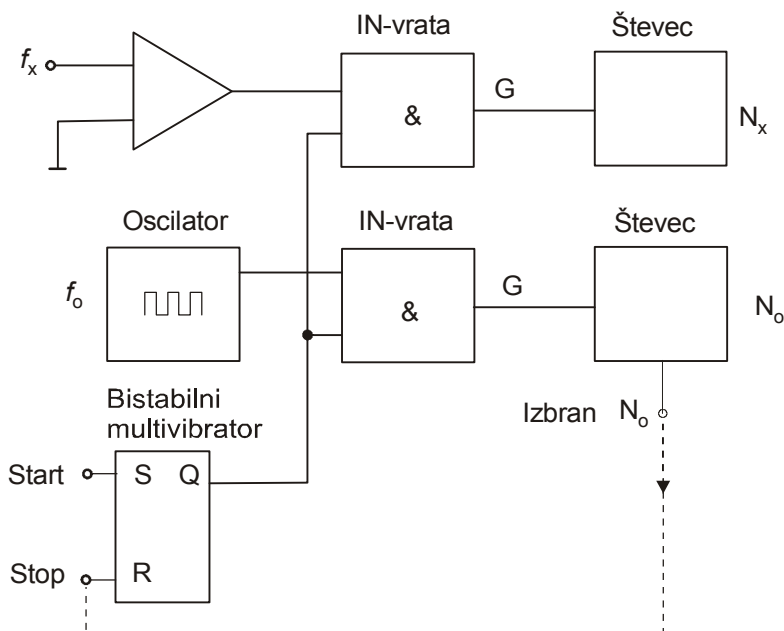
Pogrešek, ki lahko nastane pri štetju, imenujemo pogrešek kvantizacije. Za popolnoma enak čas T_x lahko namreč preštejemo za en impulz razlike, kar je odvisno od trenutka začetka prevajanja IN-vrat glede na tok impulzov iz oscilatorja znane frekvence. Torej merimo z negotovostjo $N_x \pm 1$ impulz. Zato je ugodno, da je frekvenca oscilatorja čim višja in s tem relativna negotovost manjša.

Merjenje frekvence

Merjenje frekvence prikazujemo z blokovno shemo na sliki 4-18. Signale, katerih frekvenco f_x določamo, v komparatorju najprej pretvorimo v pravokotne impulze, ki med merilnim časom T tečejo čez IN-vrata v števec in v njem povzročijo številčno stanje N_x . To je merilo za merjeno frekvenco f_x :

$$f_x = \frac{N_x}{T}. \quad (4-15)$$

Konstanten merilni čas T zagotavlja oscilator konstantne frekvence f_o , katerega impulzi tečejo čez druga IN-vrata, kjer povzročijo številčno stanje N_o .



Slika 4-18: Blokovna shema merjenja frekvence.

Merjenje poteka na naslednji način: s startnim impulzom na vhodu bistabilnega multivibratorja se njegov izhod Q postavi v stanje 1 in oboja IN-vrata se odprejo, oba števca štejeta. Ko števec, ki šteje impulze znanega oscilatorja, doseže že predhodno nastavljeno stanje N_o , pošlje impulz stop na vhod bistabilnega multivibratorja, njegov izhod se postavi v stanje 0, oboja IN-vrata se zaprejo in števca nehata šteti. Stanje N_o predstavlja merilni čas T , saj velja:

$$T = \frac{N_o}{f_o}. \quad (4-16)$$

Zato je merjena frekvenca f_x :

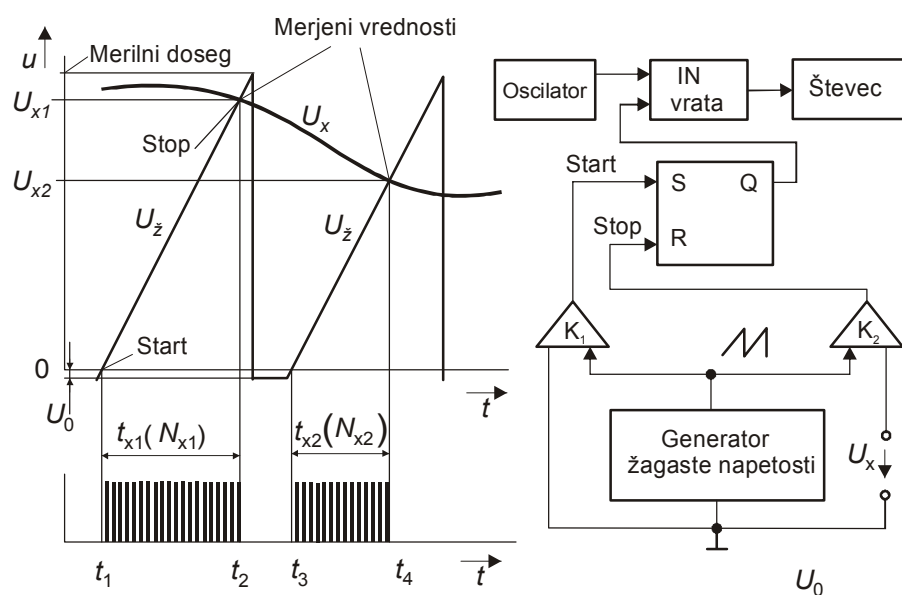
$$f_x = \frac{N_x}{T} = \frac{f_o}{N_o} N_x. \quad (4-17)$$

AD-pretvorba u/t z enojno žagasto napetostjo

To je osnovni princip pretvorbe, ki ga predstavljamo z blokovno shemo in časovnim potekom signalov na sliki 4-19. Pretvarjanje se izvede tako, da merimo čas t_x v katerem žagasta napetost iz generatorja žagaste napetosti U_z doseže vrednost enosmerne napetosti U_x , ki jo pretvarjamo. Žagasta napetost začne svoj tek z negativnim potencialom U_o , kar omogoči točno določen trenutek izenačitve žagaste napetosti z napetostjo nič. V tem trenutku se odprejo IN-vrata in impulzi iz oscilatorja znane zelo konstantne

frekvence tečejo v števec, ki šteje in prikazuje njihovo število. Ko se napetost generatorja žagaste napetosti izenači z enosmerno napetostjo, se IN-vrata zaprejo. Žagasta napetost se povečuje do svoje maksimalne vrednosti, nato pa zavzame svojo izhodiščno vrednost. Po kratkem časovnem intervalu, v katerem odčitamo merilni rezultat, se števec resetira in merilni postopek se ponovi. Če se je medtem merjena napetost U_x spremenila, bo naslednji merilni rezultat zaradi drugačnega časovnega intervala t_x , drugačen, saj bomo ob konstantni frekvenci oscilatorja odčitali drugo vrednost N_x .

Meritev se torej ponavlja v enakih intervalih. Hitrost merjenja je odvisna od frekvence generatorja žagaste napetosti.



Slika 4-19: AD pretvorba u/t z enojno žagasto napetostjo.

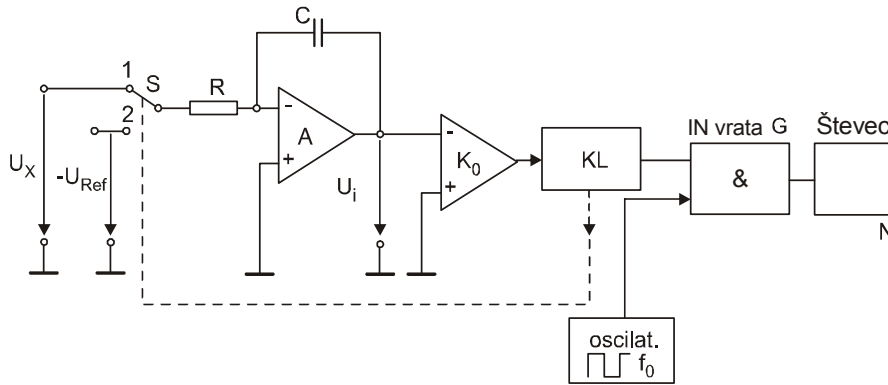
AD-pretvorba u/t z dvojnimi nagibom

Blokovna shema AD-pretvornika z dvojnimi nagibom je na sliki 4-20, časovni poteki signalov za dve vhodni napetosti U_{x1} in U_{x2} pa so prikazani na sliki 4-21.

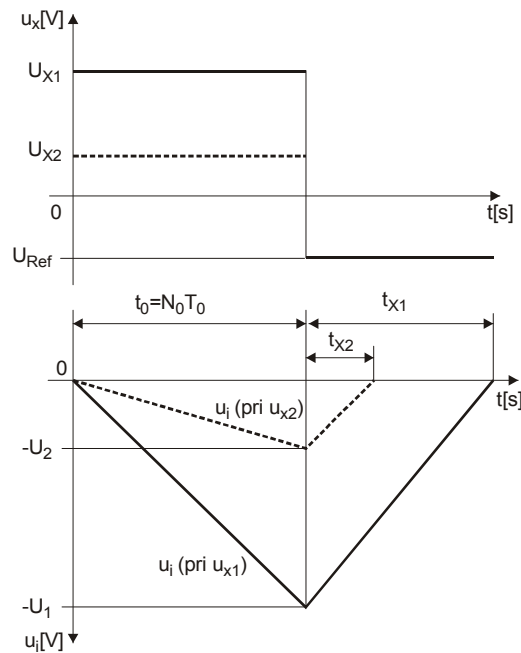
Meritev se prične, ko krmilna logika KL preklopi stikalo S v položaj 1 in s tem priključi neznano napetost U_X na vhod integratorja. Krmilna logika hkrati odpre vrata G in števec prične šteti impulze oscilatorja s frekvenco f_0 . V primeru pozitivne polaritete U_X bo izhodna napetost integratorja U_i padala (integrator obrne predznak) od 0 V k negativnim vrednostim. Strmina upadanja je konstantna in proporcionalna velikosti neznane napetosti U_X .

V primeru dvomestnega dekadnega števca lahko preštejemo največ $N_0 = 100$ impulzov (0-99). Števec se po preteku N_0 impulzov oziroma po času trajanja $t_0 = N_0 T_0$ (T_0 je čas periode impulzov oscilatorja) resetira in hkrati krmilna logika preklopi stikalo S v položaj 2. Zdaj je na vhod integratorja priključena referenčna napetost $-U_{Ref}$, ki je nasprotna polaritete od merjene napetosti U_X . Izhodna napetost integratorja U_i zdaj narašča k pozitivnim

vrednostim s strmino naraščanja, ki je sorazmerna velikosti referenčne napetosti U_{Ref} . V trenutku, ko izhodna napetost integratorja doseže vrednost 0 V, primerjalnik K_0 spremeni logično stanje na izhodu in zapre vrata G . Število prešteti impulzov N v času t_{X1} oz. t_{X2} je proporcionalno velikosti analogne vhodne napetosti U_X in se ohrani na prikazovalniku, dokler se ne zaključi naslednji merilni cikel.



Slika 4-20: Blokovna shema AD-pretvornika z dvojn timer nagibom.



Slika 4-21: Časovni poteki signalov AD-pretvornika z dvojn timer nagibom.

Za čas integriranja t_0 , ki je konstanten za vsako vhodno napetost, velja enačba

$$\frac{U_X}{R} + C \frac{du_i}{dt} = 0 \quad \text{in} \quad u_i \approx u_C, \quad (4-18)$$

ki zapisana v drugi obliki

$$\frac{du_i}{dt} = -\frac{1}{R \cdot C} \cdot U_X \quad (4-19)$$

pokaže, da je naklon v času integriranja t_0 negativen in odvisen od merjene napetosti U_X . Obe strani enačbe integriramo

$$\int_0^{-U_1} du_i = -\frac{1}{R \cdot C} \cdot \int_0^{t_0} U_{X1} dt \quad (4-20)$$

in dobimo rešitev

$$U_1 = \frac{N_0 \cdot T_0}{R \cdot C} \cdot \bar{U}_{X1}. \quad (4-21)$$

$\bar{U}_{X1}$ je povprečna vrednost neznane napetosti v času integriranja t_0 .

Ko je na vhodu integratorja referenčna napetost $-U_{Ref}$, pa velja enačba

$$-\frac{U_{Ref}}{R} + C \frac{du_i}{dt} = 0, \quad (4-22)$$

ki v spremenjeni obliki

$$\frac{du_i}{dt} = \frac{1}{R \cdot C} \cdot U_{Ref} \quad (4-23)$$

pokaže, da je naklon izhodne vrednosti integratorja pozitiven in neodvisen od neznane napetosti U_X . Po integriranju obeh strani enačbe

$$\int_{-U_1}^0 du_i = \frac{1}{R \cdot C} \cdot \int_{t_0}^{t_0+t_{X1}} U_{Ref} dt \quad (4-24)$$

je rešitev

$$U_1 = \frac{t_{X1}}{R \cdot C} \cdot U_{Ref}. \quad (4-25)$$

Iz obeh enačb za U_1 izračunamo čas t_{X1}

$$t_{X1} = \frac{N_0 T_0}{U_{Ref}} \cdot \bar{U}_{X1}. \quad (4-26)$$

Število impulzov N , ki jih prešteje števec v času t_{X1} , je $N = \frac{t_{X1}}{T_0}$.

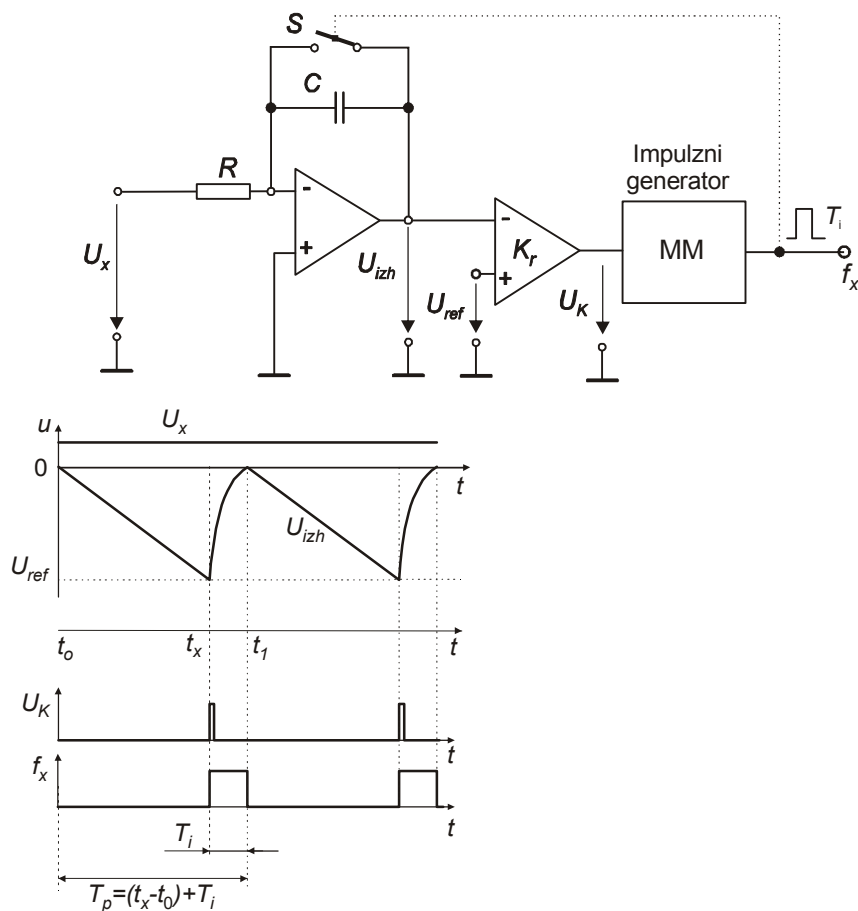
Iz zadnjih dveh enačb sledi:

$$N = \frac{N_0}{U_{Ref}} \cdot \bar{U}_{X1}. \quad (4-27)$$

Število impulzov N na prikazovalniku števca je proporcionalno srednji vrednosti merjene napetosti $\bar{U}_{X1}$ na intervalu pretvorbe t_0 . Na točnost pretvornika vpliva le stabilnost referenčne napetosti U_{Ref} , drift integratorja in primerjalnika; prav nič pa elementa integratorja R in C in prav tako ne frekvenca oscilatorja f_0 . V primeru, da je čas integracije t_0 mnogokratnik periode motilne frekvence, na primer omrežne napetosti 50 Hz, te ne vplivajo na rezultat meritve. Čas pretvorbe je večji kot pri drugih vrstah AD-pretvornikov. Pogosto znaša 200 ms ali več. Zato pa je možno doseči veliko ločljivost. Te vrste AD-pretvornikov uporabljamo v digitalnih voltmetrih.

AD-pretvorba u/f

Napetostno frekvenčni pretvornik daje na izhodu pravokotne impulse, katerih frekvenca je proporcionalna merjeni napetosti. Vezje pretvornika enosmerne napetosti v frekvenco in časovni potek pretvorbe sta predstavljena na sliki 4-22.



Slika 4-22: AD-pretvorba u/f .

Pretvornik u/f je v tem primeru sestavljen iz integratorja, komparatorja in impulznega generatorja. V začetku pretvorbe t_1 naj bo izhodna napetost integratorja u_{izh} enaka 0. Tok v integrator i_x je:

$$i_x = \frac{u_x}{R}. \quad (4-28)$$

Izhodna napetost integratorja u_{izh} ob pozitivni napetosti u_x narašča v negativni smeri:

$$u_{iz} = -\frac{1}{C} \int i_x dt = -\frac{1}{RC} \int u_x dt. \quad (4-29)$$

Čas integracije $(t_x - t_0)$ je odvisen od napetosti u_x . Ko izhodna napetost doseže vrednost referenčne napetosti $u_{izh} = u_r$, komparator na izhodu zavzame stanje 1, vzbudi impulzni generator, ki odda le en kratek impulz trajanja T_i . Ta impulz za čas T_i vključi stikalo S, kondenzator se izprazni, kar pomeni, da se je izhodna napetost integratorja spremenila na 0. Impulz impulznega generatorja pa registrira tudi merilnik frekvence. En tak dogodek traja čas T_p in se ponavlja. Čas T_p od t_0 do trenutka t_1 je:

$$T_p = (t_x - t_0) + T_i. \quad (4-30)$$

Iz T_p določimo frekvenco:

$$f_x = \frac{1}{T_p} = \frac{1}{(t_x - t_0) + T_i}. \quad (4-31)$$

$$\text{V času } t_x \text{ je } u_{izh} = u_r = -\frac{1}{RC} \int_{t_0}^{t_x} u_x dt = -\frac{1}{RC} \bar{u}_x (t_x - t_0). \quad (4-32)$$

$$\text{Iz tega sedaj izračunamo } (t_x - t_0) = -\frac{u_r}{\bar{u}_x} RC. \quad (4-33)$$

Frekvenca f_x je torej:

$$f_x = \frac{1}{-\frac{u_r RC}{\bar{u}_x} + T_i} = \frac{\bar{u}_x}{-u_r RC + \bar{u}_x T_i}. \quad (4-34)$$

Frekvenco f_x lahko izmerimo, kakor smo že prikazali. Odvisna je od povprečne vrednosti u_x , vendar v tem primeru nelinearno. Linearna odvisnost je na primer pri u/f pretvorniku po postopku izenačevanja električnih nabojev.

4.3.2 Digitalno analogna pretvorba merilnega signala

V merilni praksi se večkrat zgodi, da moramo digitalne signale v merilnih napravah pretvoriti v analogno obliko, v analogni tokovni ali napetostni signal. To je lahko v primeru, ko je analogni prikaz merilnega rezultata zaradi določenih razlogov ugodnejši od digitalnega ali kadar moramo digitalni signal primerjati z analognim (na primer v digitalnem kompenzatorju, regulacijah), pa tudi v digitalnih osciloskopih kadar želimo, da se na zaslonu izriše resnični zvezni potek signala.

Tako pretvorbo omogoči digitalno analogni pretvornik (DA), ki digitalno obliko signala, torej neko binarno število N pretvori v analogno napetost U_{izh} . Splošno velja:

$$U_{izh} = U_{LSB} \cdot N \quad (4-35)$$

U_{LSB} je vrednost napetosti, kjer predstavlja LSB v digitalnem zapisu oziroma besedi bit z najmanjšo težo (LSB - least significant bit). Bit z največjo težo v digitalni besedi ima oznako MSB (MSB - most significant bit).

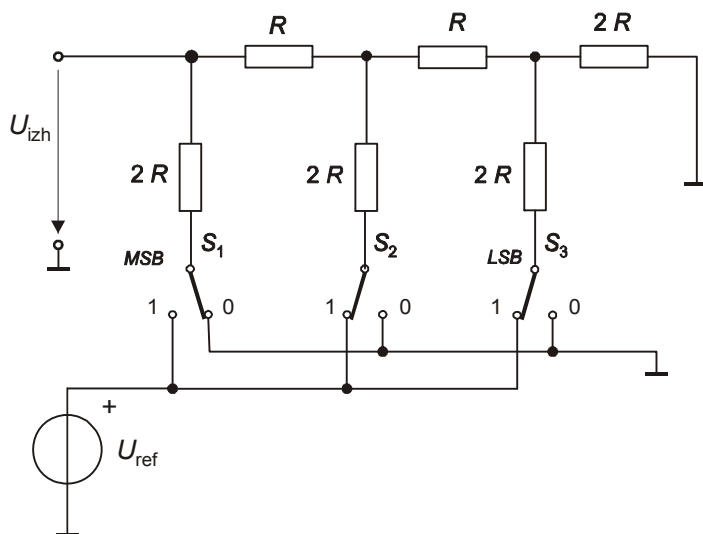
Poznamo več osnovnih izvedb DA-pretvornikov, na primer: s paralelnim postopkom, z utežnostnim postopkom, s števnim postopkom. Paralelni postopek je zaradi izvedbenih razlogov najmanj uporabljan. Nekoliko več se uporablja števeni postopek, predvsem v avdiotehniki. Največkrat pa srečamo utežnostni postopek.

DA-pretvornik z R - $2R$ uporovno lestvico

Ta pretvornik je izveden po utežnostnem postopku. Stikala S so izvedena v CMOS tehnologiji. Vezje je napajano z referenčno napetostjo U_{ref} . Uporovno vezje je izvedeno najpogosteje kot R - $2R$ vezava uporov. Izdelava kakovostnih uporov enakih vrednosti je namreč enostavnejša in točnejša kot izdelava uporov različnih vrednosti. V navedenem primeru so potrebni le upori z vrednostjo R , saj lahko $2R$ dobimo z zaporedno vezavo dveh uporov upornosti R . Izhodna analogna napetost U_{izh} tega pretvornika je:

$$U_{izh} = U_{ref} \cdot \frac{N}{N_{max}} \quad (4-36)$$

Na sliki 4-23 prikazujemo vezje 3 bitnega DA-pretvornika brez označbe polaritete pretvorjene napetosti.



Slika 4-23: 3 bitni DA-pretvornik.

Napetost U_{LSB} je v tem primeru:

$$U_{LSB} = \frac{U_{ref}}{2^n} = \frac{U_{ref}}{2^3} = \frac{U_{ref}}{8} \quad (4-37)$$

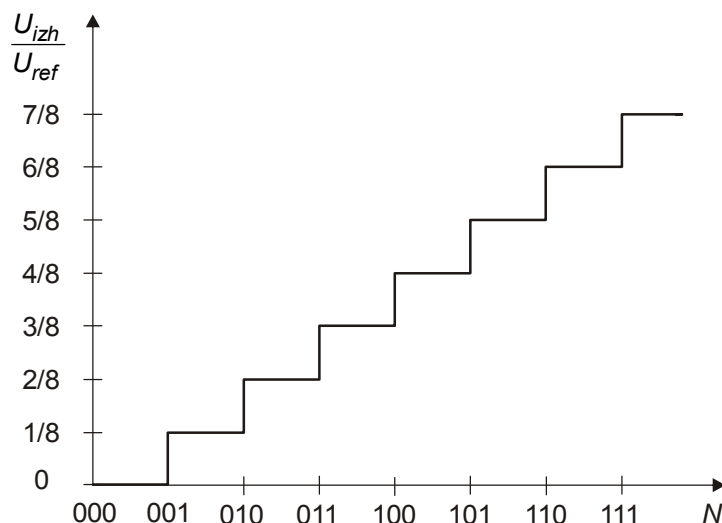
Največja napetost U_{izhm} za digitalno besedo 111, ko so vsa tri stikala v položaju 1, je:

$$U_{izhm} = \left(1 \cdot \frac{1}{2} + 1 \cdot \frac{1}{4} + 1 \cdot \frac{1}{8}\right) \cdot U_{ref} = \frac{7}{8} U_{ref} \quad (4-38)$$

Za primer digitalne besede 011, ko je stikalo S_1 v položaju 0, ostali dve pa v položaju 1, je napetost:

$$U_{izh} = \left(0 \cdot \frac{1}{2} + 1 \cdot \frac{1}{4} + 1 \cdot \frac{1}{8}\right) \cdot U_{ref} = \frac{3}{8} U_{ref} \quad (4-39)$$

Dobljena analogna napetost torej zavzame diskretne nivoje, kar prikazujemo na naslednji sliki.



Slika 4-24: Prenosna funkcija 3 bitnega DA-pretvornika .

4.4 Merilni transformatorji

V merilni praksi moramo pogosto meriti zelo velike ali majhne vrednosti merjenih veličin. Za vso množico različnih primerov seveda nimamo na razpolago primernih merilnih instrumentov. Zato moramo merjeno veličino na nek način prilagoditi temu, kar nam je na razpolago. Ena od možnosti je uporaba merilnih transformatorjev. Ti imajo razen osnovnega namena še nekatere druge za izvedbo meritev ugodne lastnosti. Seveda pa vnašajo tudi nekaj težav, ki jih skušamo, kolikor je mogoče, zmanjšati.

Razlogi za uporabo:

1. prilagoditev merjene veličine merilnim instrumentom oziroma razširitev ali zožitev merilnega območja;
2. galvanska ločitev merilnega tokokroga od primarnega tokokroga, v katerem ugotavljamo vrednost merjene veličine, kar je važno predvsem pri uporabi elektronskih merilnih instrumentov in naprav;
3. zaščita merilnih instrumentov na sekundarni strani ob neželenih velikih spremembah merjene veličine (motnjah) na primarni strani merilnega transformatorja.

Neželena posledica uporabe merilnih transformatorjev je ta, da vnašajo v meritev dodatni pogrešek oziroma merilno negotovost, ki se ji ne da izogniti in jo moramo pri oceni skupnega pogreška ali merilne negotovosti upoštevati.

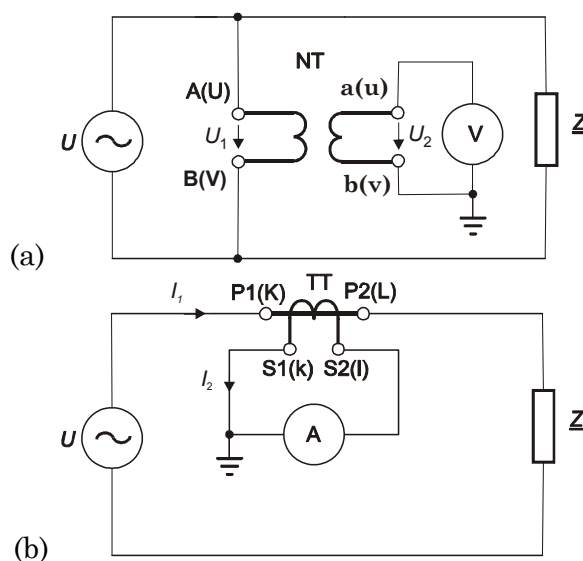
Merilni transformatorji so uporabni le za merjenje izmeničnih veličin. Njihove definirane lastnosti veljajo za sinusne veličine pri referenčnih razmerah.

Vsak merilni transformator je sestavljen iz feromagnetnega jedra ter primarnega in sekundarnega navitja. Primarno navitje vključimo v tokokrog merjenca, na sekundarno pa so priključeni merilni instrumenti in naprave, na primer: voltmeter, ampermeter, vatmeter, števec električne energije.

Idealni merilni transformator bi moral transformirati tako, da bi veličina na sekundarni strani ohranila vse tipične lastnosti

primarne, razen velikosti. Razmerje velikosti pa bi moralo biti točno poznano in bi moralo ustrezati razmerju primarnega N_1 in sekundarnega N_2 števila ovojjev, torej prestavnemu razmerju (prestavi) transformatorja.

Uporabljamo dve vrsti merilnih transformatorjev: merilne napetostne NT in merilne tokovne transformatorje TT oziroma merilne napetostnike in merilne tokovnike. Primarno navitje napetostnika je priključeno vzporedno v primarni tokokrog, tako kot bi bil priključen voltmeter, če bi bil na primarni strani. Primarno navitje tokovnika pa je priključeno zaporedno v primarni tokokrog, tako kot bi bil priključen ampermeter, če bi bil na primarni strani.

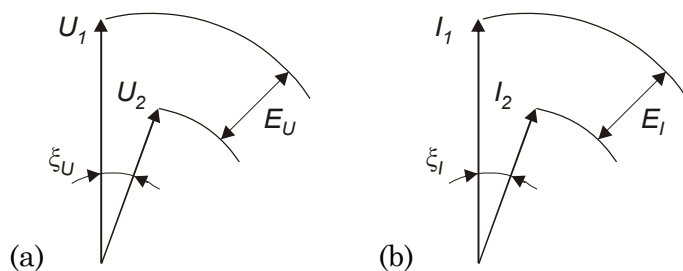


Slika 4-25: Vezje z NT in voltmetrom (a) in TT ter ampermetrom (b).

Osnovni namen meritev je določitev napetosti in toka na primarni strani merilnih transformatorjev. Zato moramo izmerjeno vrednost na sekundarni pomnožiti z nazivno (naznačeno) prestavo napetostnika ali tokovnika.

$$\begin{aligned} U_1 &= p_u \cdot U_2 & p_u &= \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} & \text{in} \\ I_1 &= p_i \cdot I_2 & p_i &= \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \end{aligned} \quad (4-40)$$

Idealnega merilnega transformatorja žal nimamo. Prestavno razmerje namreč ni popolnoma enako razmerju ovojjev, kar predstavlja tako imenovani napetostni (prestavni) pogrešek E_U in tokovni (prestavni) pogrešek E_I . Razen tega tudi primarni in sekundarni kazalec napetosti nista v fazi, enako pa velja za kazalca toka, kar predstavlja fazni (kotni) pogrešek ξ_U in ξ_I .



Slika 4-26: Kazalčni diagram pogreškov $p=1$, (a) za napetostni in (b) za tokovni merilni transformator.

Merilni transformatorji so uvrščeni v standardizirane razrede točnosti, ki niso popolnoma skladni z razredi merilnih instrumentov. Mejne vrednosti pogreškov so zanje podane v tabelah.

Tabela 4-1: Meje pogreškov napetostnih merilnih transformatorjev.

razred	meje pogreškov	
	napetostni $e_{NT}(\%)$	fazni $\xi_{NT}(\text{minute})$
0,1	$\pm 0,1$	± 5
0,2	$\pm 0,2$	± 10
0,5	$\pm 0,5$	± 20
1	$\pm 1,0$	± 40
3	$\pm 3,0$	niso predpisani

Tabela 4-2: Meje pogreškov tokovnih merilnih transformatorjev.

razred	meja tokovnega pogreška e_{TT} v odstotkih				meja faznega pogreška ξ_{TT} v minutah			
	$0,05I_n$	$0,2I_n$	$1,0I_n$	$1,2I_n$	$0,05I_n$	$0,2I_n$	$1,0I_n$	$1,2I_n$
0,1	$\pm 0,40$	$\pm 0,2$	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	± 15	± 8	± 5	± 5
0,2	$\pm 0,75$	$\pm 0,35$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	± 30	± 15	± 10	± 10
0,5	$\pm 1,5$	$\pm 0,75$	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$	± 90	± 45	± 30	± 30
1	$\pm 3,0$	$\pm 1,5$	$\pm 1,0$	$\pm 1,0$	± 180	± 90	± 60	± 60
3	od 0,5 do $1,2I_n$; $\pm 3,0$				niso predpisani			
5	od 0,5 do $1,2I_n$; $\pm 5,0$				niso predpisani			

Pomemben podatek pri merilnih transformatorjih je njihova nazivna (naznačena) moč. Zato mora biti zagotovljena ustrezna obremenitev na sekundarni strani, ki naj bo med 25 % in 100 % nazivne. Predstavljajo jo merilni instrumenti. Le tako bo merilni transformator transformiral neoporečno s točnostjo, ki mu je pripisana.

Za merilni napetostni transformator je nazivna moč S_n vrednost moči, ki jo daje merilni napetostni transformator pri nazivni obremenitvi Z_n in nazivni vrednosti sekundarne napetosti U_{s_n} .

Primarne nazivne napetosti so standardizirane in skladne z napetostmi v sistemih, kjer merilne transformatorje uporabljamo. Sekundarna nazivna standardizirana napetost je praviloma 100 V.

$$S_n = \frac{U_{S_n}^2}{Z_n} \quad Z_n = \frac{U_{S_n}^2}{S_n} \quad (4-41)$$

Za tokovni merilni transformator je nazivna moč S_n vrednost moči, ki jo daje merilni transformator pri nazivni obremenitvi Z_n in nazivni vrednosti sekundarnega toka I_{S_n} . Primarni nazivni tokovi so standardizirani za več vrednosti, sekundarni standardiziran tok je največkrat 5 A, le redko pa 1 A.

$$S_n = I_{S_n}^2 Z_n \quad Z_n = \frac{S_n}{I_{S_n}^2} \quad (4-42)$$

Posebej je treba opozoriti na nevarnost, ki lahko nastane pri prekinitvi sekundarnega merilnega tokokroga tokovnika, ko ta obratuje, torej ko teče primarni tok. Ker je tok skozi primarno navitje praktično odvisen le od bremena, bo ob prekinitvi sekundarnega kroga izpadlo magnetenje jedra transformatorja s sekundarnimi amperovoji. Zato pride predvsem pri starejših tokovnikih do močnega povečanja magnetne gostote B v jedru, saj magneti le primarno navitje, kar pomeni visoko inducirano napetost na odprtih sekundarnih sponkah in močno povečanje izgub v železu P_{Fe} . Posledica je lahko napetostni preboj in pregrevanje transformatorja. Zato moramo, preden prekinemo sekundarni tokokrog, tega kratko skleniti, na primer zamenjati instrument in nato odstraniti kratko zvezo.

Standardizirane so tudi oznake primarnih in sekundarnih priključnih sponk merilnih transformatorjev. Veljavne so oznake po SIST IEC standardih. Ker v praksi pogosto na starejših transformatorjih najdemo VDE oznake, smo v slikah teh zapisov označili oboje (VDE oznake so v oklepajih).

4.5 Pretvorba neelektričnih v električne veličine

Električna merilna tehnika se je zaradi svojih prednosti uveljavila tudi pri merjenju neelektričnih veličin. Osnovna naloga je kakovostna pretvorba neelektrične veličine v električno na osnovi določene fizikalne zakonitosti. Dobljeni električni signal mora vsebovati vse lastnosti originalne neelektrične veličine.

Pretvorbo omogočijo merilni pretvorniki. Delimo jih v pasivne in aktivne pretvornike.

Pri pasivnih pretvornikih merjena neelektrična veličina povzroči spremembo ohmske upornosti, induktivnosti, kapacitivnosti ali kake druge lastnosti nekega elementa, ki jo nato izmerimo in z znano fizikalno zvezo ugotovimo iskane podatke o neelektrični veličini. V tem primeru je potreben dodatni napajalni vir.

Pri aktivnih pretvornikih pa se neelektrična veličina pretvori na primer v električno napetost na osnovi indukcijskega, termoelektričnega, piezoelektričnega, fotoelektričnega ali kakšnega drugega delovanja, ki jo izmerimo in z znano fizikalno

zvezo določimo podatke za neelektrično veličino. Tu za osnovno pretvorbo dodatnega napajalnega vira ne potrebujemo.

Od merilnega pretvornika zahtevamo čim bolj linearno zvezo med merjeno neelektrično in izhodno električno veličino, karakteristiko neodvisno od vplivnih veličin, v določenih primerih pa tudi hiter odziv na spremembo merjene veličine.

Velikokrat se da isto merilno nalogo rešiti na več različnih načinov. Izbrati je treba tistega, ki je glede na dane zahteve najprimernejši in upošteva vse kriterije. V nadaljevanju bomo predstavili nekatere najznačilnejše izvedbe pretvornikov za najpogostejše pretvarjane neelektrične veličine.

4.5.1 Uporovni termometri

To vrsto pretvornikov uporabljamo pri merjenju temperatur in veličin, ki so povezane s temperaturo, na primer vlažnosti. Pri teh pretvornikih povzroči sprememba temperature spremembo ohmske upornosti kovinskega ali polprevodniškega materiala. Pogostejše se uporabljajo kovinski, manj pa polprevodniški uporovni termometri.

Kovinski termometri so izdelani tako, da je žica iz platine ali niklja navita na izolacijsko telo, zalita v stekleni ali keramični valj, ki je mehansko zaščiten s kovinskim ohišjem, na katerem so nameščeni tudi priključki uporovnega termometra. Upornost žice se s spremembo temperature spreminja. Če ima žica v začetnem stanju pri temperaturi T_0 upornost R_0 , je njena upornost R_T pri temperaturi T po nekoliko poenostavljeni enačbi:

$$R_T = R_0 (1 + \alpha(T - T_0)). \quad (4-43)$$

α je temperaturni koeficient, odvisen od vrste materiala.

Z uporovnimi termometri iz platine lahko merimo temperature med -220 in $+750$ °C. Njihova upornost se med 0 in 100 °C spremeni za 38,5 %.

Z uporovnimi termometri iz niklja lahko merimo temperature med -60 in $+180$ °C. Njihova upornost se med 0 in 100 °C spremeni za 61,7%.

Standardizirana upornost uporovnih termometrov je 100Ω pri 0 °C zato imajo standardno oznako Pt 100 in Ni 100.

Upornost žičnih uporovnih termometrov merimo z različnimi metodami za merjenje upornosti. Pri priključevanju merilnih instrumentov, ki neposredno pokažejo temperaturo, moramo primerno upoštevati tudi upornost povezav.

Polprevodniški uporovni termometri imajo negativni temperaturni koeficient. Če ima ta termometer pri temperaturi T_0 upornost R_{T_0} se njegova upornost R_T zmanjšuje z naraščanjem temperature po enačbi:

$$R_T = R_0 e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}. \quad (4-44)$$

B je konstanta, imenovana karakteristična temperatura, in je odvisna od polprevodnika ter začetne temperature T_0 .

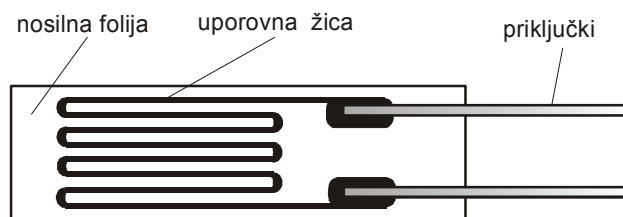
Polprevodniške uporovne termometre uporabljamo med -40 in $+200$ °C. Njihova občutljivost je veliko večja kot pri kovinskih uporovnih termometrih, njihova reakcija na spremembo temperature pa je zaradi manjše mase bistveno hitrejša. So pa časovno manj stabilni in jih je treba pogosteje umerjati.

4.5.2 Raztezni merilni lističi

Z razteznimi merilnimi lističi merimo sile pri tlačnih, vlečnih in torzijskih obremenitvah, uporabljamo jih pri tehtnicah, za merjenje tlakov, pri določanju deformacij nosilcev konstrukcij.

Njihovo delovanje temelji na spremembi ohmske upornosti kovinske žice, ki se zaradi mehanske obremenitve spremeni po dolžini in istočasno po preseku. To dogajanje je v območju elastičnosti materiala, kjer ne prihaja do trajnih deformacij.

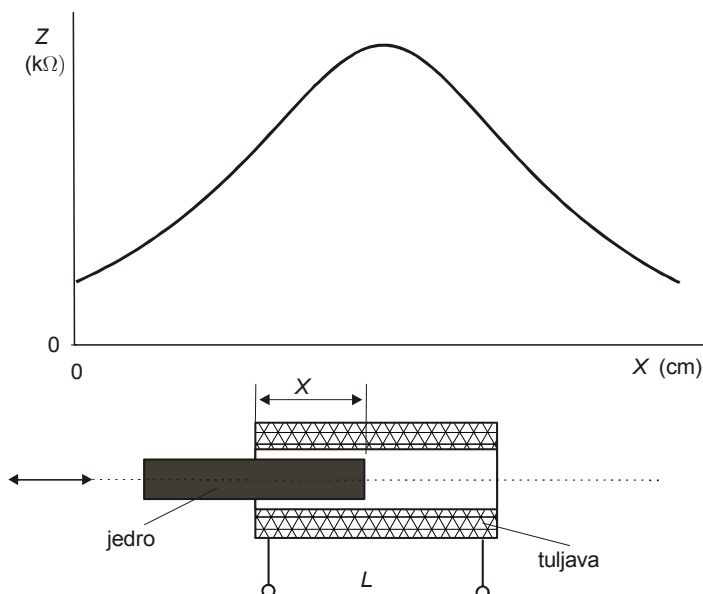
Merilni listič je običajno iz tanke uporovne žice iz konstantana, premera od 20 do 30 μm , ki je navita ali nanesena na nosilno folijo v vijugasti obliki. Uporovni material je lahko tudi trak iz silicija. Nosilno folijo s specialnim lepilom nalepimo na preizkušani predmet, tako da se smer raztezka ujema s smerjo žice na podlogi. Merilni lističi so običajno nameščeni v eni veji mostičnega merilnega vezja. Merilni instrument, ki je priključen v diagonalo vezja, je umerjen tako, da lahko vrednost neelektrične merjene veličine na njem neposredno odčitamo.



Slika 4-27: Merilni listič.

4.5.3 Induktivni merilni pretvorniki

Princip delovanja induktivnih merilnih pretvornikov je, da neelektrična merjena veličina povzroči spremembo induktivnosti neke tuljave. Ta se lahko doseže s spremembo števila ovojev ali s spremembo lege železnega jedra v tuljavi, pa tudi s spremembo permeabilnosti jedra, če ga mehansko obremenimo. V vsakem primeru pomeni sprememba induktivnosti sprememba reaktance oziroma impedance tuljave. Impedanco oziroma neelektrično veličino merimo z metodami za merjenje upornosti.



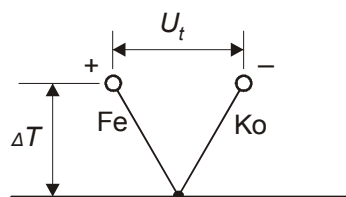
Slika 4-28: Tuljava s spremenljivo lego jedra.

4.5.4 Kapacitivni merilni pretvorniki

Merjena neelektrična veličina pri teh pretvornikih povzroči spremembo kapacitivnosti nekega kondenzatorja. Možnosti za to je več. Za merjenje pomikov, sil, hitrosti, se kapacitivnost kondenzatorja spremeni zaradi spremembe razdalje med elektrodama kondenzatorja ali njune medsebojne aktivne površine. Za merjenje vlažnosti, temperature, nivoja pa se sprememba kapacitivnosti doseže s spremembo dielektričnosti snovi med elektrodama kondenzatorja. Tudi pri teh pretvornikih merjeno neelektrično veličino ugotovimo z merjenjem reaktance oziroma impedance, ki se spreminja zaradi spremembe kapacitivnosti pretvornika.

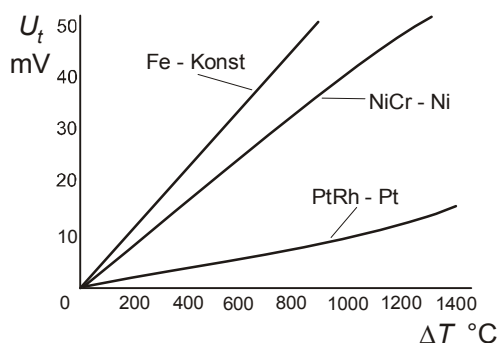
4.5.5 Termoelektrični merilni pretvorniki (termopretvorniki, termoelementi)

Termoelektrični pretvornik je izdelan tako, da sta dve žici iz različnih materialov na enem koncu spojeni (zvarjeni), druga konca sta prosta. Če zvarjeno mesto segrevamo, nastane temperaturna razlika med njim in prostima koncema. Med tema se pojavi enosmerna napetost, katere vrednost je odvisna od temperaturne razlike med tako imenovanim toplim in hladnim koncem termoelektričnega pretvornika in vrste materialov, iz katerih so žice.



Slika 4-29: Termopretvornik železo-konstantan.

Najčešče kombinacije materialov so: baker-konstantan, železo-konstantan, nikeljkrom-nikelj, platinarodij-platina. Pozitivni pol (+) je na prvem navedenem materialu. Termopretvorniki se razlikujejo po temperaturnem območju in višini napetosti med prostima koncema (občutljivosti).



Slika 4-30: Graf $U=f(T)$ za nekatere termopretvornike.

Ker je napetost termopretvornika odvisna od temperaturne razlike, je za pravilno merjenje pomembno, da nanj ne vplivajo spremembe temperature na hladnem koncu. Eden način izločanja tega vpliva je termostatisiranje hladnega konca (0 °C, 20 °C ali 50 °C) ali pa uporaba posebnega vezja, ki kompenzira vpliv spremembe temperature. Povezava od termopretvornika do tega vezja pa mora biti izvedena z istim materialom, kot je termopretvornik.

Napetost termopretvornika oziroma temperaturo merimo z ustreznim milivoltmetrom, uporabimo lahko merilni ojačevalnik, merimo pa lahko tudi s kompenzacijsko metodo, da ga ne obremenimo.

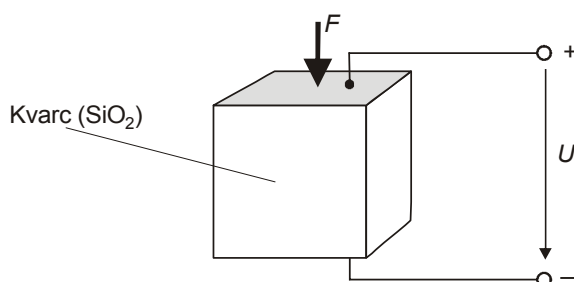
Če spojno mesto termopretvornika segrevamo z enosmernim ali izmeničnim tokom, lahko z merjenjem dobljene enosmerne napetosti določimo srednjo vrednost toka pri enosmernem in efektivno vrednost toka pri izmeničnem toku.

4.5.6 Piezoelektrični pretvorniki

Delovanje piezoelektričnih pretvornikov temelji na tem, da se na površini nekaterih vrst kristalov pojavi električni naboj, če tak kristal v določeni smeri na os kristala mehansko obremenimo. Primerni kristali so iz kvarca, turmalina, barijevega titanata. Zaradi te lastnosti piezoelektrične pretvornike uporabljamo za merjenje sil in tlakov tudi v primerih, ko se ti zelo hitro spreminjajo.

Vzemimo primer kocke iz kvarca s stranico 1 cm, ki ga obremenimo s silo $F=1$ N. Ob konstanti, piezomodulu, za kvarc $d=2,3 \cdot 10^{-12}$ As/N, se na površini pojavi naboj $Q=F \cdot d=2,3 \cdot 10^{-12}$ As. Med priključenima elektrodama, ki predstavljata kondenzator z dielektrikom kvarcem, se pojavi kapacitivnost približno $C=0,4$ pF. To pomeni, da je dobljena napetost $U=Q/C=2,3 \cdot 10^{-12}/0,4 \cdot 10^{-12}=5,75$ V. Kadar priključimo instrument ali merilni ojačevalnik, pa

se ta napetost bistveno zmanjša, saj priključni vodi močno povečajo kapacitivnost.



Slika 4-31: Kocka iz kvarca z označeno obremenitvijo in odjemom napetosti.

4.5.7 Indukcijski merilni pretvorniki

Indukcijski merilni pretvorniki delujejo na osnovi elektromagnetne indukcije in pretvarjajo mehanske veličine v električno. V navitju statorja, tuljavi pretvornika z N ovoji, se inducira električna napetost $u = -N \cdot d\phi / dt$. Pri pretvornikih hitrosti vrtenja inducira napetost v navitju vrteči rotor, ki je kakovosten trajni magnet. Pri pretvornikih vibracij pa se ohišje s trajnim magnetom pritrди na mirujočo podlago, na gibljivi vibrirajoči del pa se pritrди tuljava, ki vibrira v polju trajnega magneta in se v njej inducira električna napetost. Posebno izvedbo zahtevajo pretvorniki za merjenje vibracij zelo velikih objektov, na primer mostov. Pri teh je navitje pretvornika v ohišju obešeno na vzmet z velikim nihajnim časom, v istem ohišju pa se nahaja tudi trajni magnet. Ohišje, ki se položi na merjeni objekt, niha v ritmu vibracij, navitje pa ob dovolj visokih frekvencah merjenja praktično miruje.

5. MERILNI INSTRUMENTI

5.1 Analogni (odklonski) merilni instrumenti

Tako proizvodnja kot uporaba analognih (odklonskih, klasičnih, elektromehanskih) merilnih instrumentov že dalj časa močno upada. Nekateri pa še vedno srečujemo, predvsem v specifičnih primerih merjenj. Zato bomo opisali le instrument z vrtljivo tuljavico, instrument z vrtljivim železom, elektrodinamični instrument in indukcijski instrument. Opis bo omejen z uporabo posameznih vrst instrumentov.

Za vse analogne instrumente velja, da vsaki vrednosti merjene veličine ustreza določeno kazanje (na primer odklon) merilnega instrumenta. To pomeni, da na nekem merilnem območju, v katerem lahko merjena veličina zavzame neskončno vrednosti, dobimo neskončno veliko odklonov. Seveda je zaradi omejenih zmožnosti čutil človeka-merilca, njegove ločljivosti pri odčitavanju, odčitavanje takega števila stanj omejeno. Kljub temu pa lahko ugotovimo, da se ob zveznem spreminjanju merjene veličine zvezno spreminja tudi kazanje analognega merilnega instrumenta in je tudi smer spreminjanja lahko določljiva.

Osnova delovanja analognih merilnih instrumentov temelji na tem, da se v merilnem sistemu instrumenta merjena časovno zvezna električna veličina spremeni v analogno mehansko, katera povzroči spremembo stanja, ki je pokazatelj vrednosti merjene veličine. Običajno gre za odklon kazalca ob skali instrumenta, kjer novo mirujoče stanje pomeni novo vrednost merjene veličine. Merilni sistemi so zasnovani različno glede na vrsto instrumenta, različne so tudi njihove lastnosti. Te moramo zelo dobro poznati, saj moramo merilne instrumente izbirati skladno s specifičnimi razmerami pri posameznih merilnih nalogah.

5.1.1 Statične razmere v merilnem sistemu

Merilni sistem analognega merilnega instrumenta delimo v pomični in mirujoči del. Glede na vrsto merilnega instrumenta je vsak od teh delov iz različnih elementov. Vsekakor je praktično pri vseh instrumentih del pomičnega dela kazalec.

V merilnem sistemu se merjena veličina pretvori v mehansko, pojavi se (vrtilni) moment M_1 , ki zavrti pomični del in kazalec se odkloni ob skali instrumenta. Ta moment je funkcija merjene veličine x in odklona α :

$$M_1 = f(x, \alpha), \quad (5-1)$$

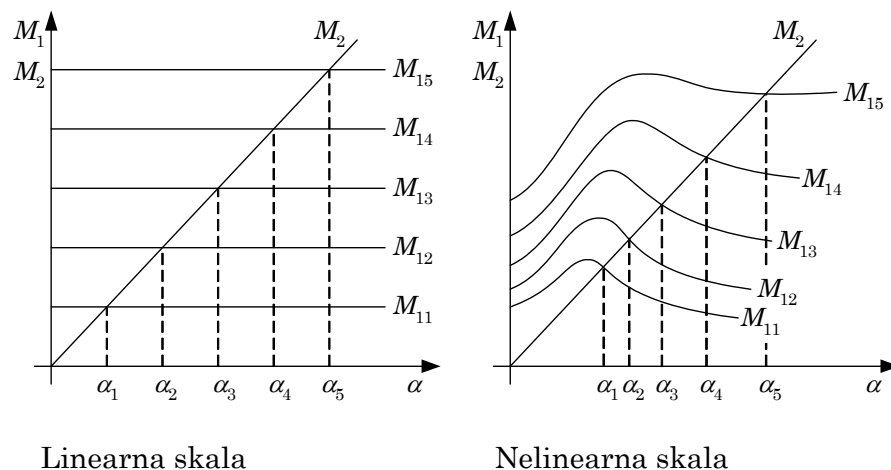
ki mu pravimo tudi električni vrtilni moment. Ne glede na velikost merjene veličine bi ta moment povzročil odklon merilnega sistema do neke skrajne fizične meje. Na tak način seveda merjenje ni izvedljivo. Zato na pomični del deluje tudi nasprotni mehanski moment M_2 , ki ga na primer povzroča torzijski trak ali spiralna vzmet in ki se povečuje ob večanju odklona:

$$M_2 = f(\alpha). \quad (5-2)$$

Ta moment lahko pri linearni vzmeti izrazimo s konstanto vzmeti D in mu zaradi njegove nasprotne smeri vrtilnemu momentu pripišemo negativni predznak:

$$M_2 = -D \cdot \alpha. \quad (5-3)$$

Ob začetku opazovanja sta oba momenta nič. Ko priključimo merjeno veličino, se pojavi M_1 in kazalec instrumenta se prične odklanjati. Zato začne naraščati moment M_2 . Ko se momenta izenačita in ker si nasprotujeta, se pomični del in z njim kazalec, ustavi. Velikost odklona je merilo vrednosti merjene veličine.



Slika 5-1: Graf momentov.

V grafu smo vrisali le nekaj karakteristik momenta M_1 za nekaj različnih vrednosti merjene veličine x . V prvem, ugodnejšem primeru, je M_1 neodvisen od odklona in je torej le funkcija merjene veličine, skala instrumenta je linearna ($M_1 = k \cdot x$). V drugem primeru je M_1 odvisen tudi od odklona in je zato skala instrumenta nelinearna.

Ravnotežno stanje za prvi primer, ko merilni sistem že miruje, je izraženo z enačbo:

$$M_1 + M_2 = f(x) + f(\alpha) = f(x) - D \cdot \alpha = 0. \quad (5-4)$$

Če iz te enačbe izrazimo odklon α , dobimo odklonsko enačbo:

$$\alpha = \frac{1}{D} f(x). \quad (5-5)$$

5.1.2 Dinamične razmere v merilnem sistemu

Če pride do trenutne spremembe merjene veličine, bi bilo idealno, da bi merilni sistem v trenutku, brez zakasnitve in brez prenehanj zavzel novo lego. To seveda ni mogoče, zato opazujemo na kakšen način se sistem v takem primeru postavi v novo ravnotežno stanje. Ob tem moramo ob obeh že navedenih momentih upoštevati vpliv še dveh dinamičnih momentov. To sta moment dušenja M_3 in vztrajnostni vrtilni moment M_4 .

Moment dušenja M_3 je posledica zaradi dušenja gibanja v zraku, tekočini, pa tudi elektromagnetnih vplivov in je odvisen od konstante dušenja P , ki jo ti vplivi določajo ter hitrosti premika pomičnega dela merilnega sistema. Podan je z enačbo:

$$M_3 = P \frac{d\alpha}{dt} \quad (5-6)$$

Vztrajnostni vrtilni moment M_4 je odvisen od vztrajnostnega momenta J pomičnega dela merilnega sistema in pospeška:

$$M_4 = J \frac{d^2\alpha}{dt^2} \quad (5-7)$$

Za opis gibanja izhajamo iz diferencialne enačbe:

$$M_1 + M_2 + M_3 + M_4 = 0 \quad (5-8)$$

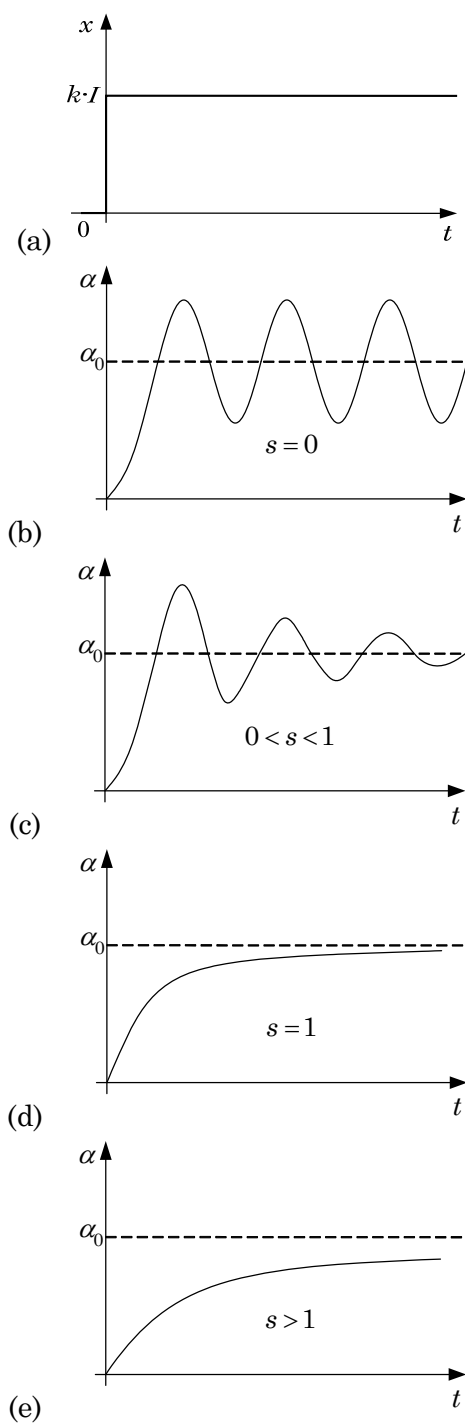
oziroma

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} + P \frac{d\alpha}{dt} + D \cdot \alpha = f(x). \quad (5-9)$$

Iz te enačbe izračunamo potek odklona α v odvisnosti od časa t , od trenutka, ko se je spremenila merjena veličina. Pred reševanjem vpeljemo stopnjo dušenja s :

$$s = \frac{P}{2\sqrt{D \cdot J}} \quad (5-10)$$

Ugotovimo, da se rešitve enačbe razlikujejo glede na vrednost stopnje dušenja s . Za primer pogledjmo grafično ilustriran potek odklona α , ki je posledica stopničaste spremembe merjene veličine, na primer vklopa tokokroga, ko se $M_1 = f(x) = 0$ spremeni na $M_1 = f(x) = k \cdot I$. Odziv je različen in ga podajamo za štiri značilne vrednosti stopnje dušenja, s je nič, s je med nič in 1, s je točno 1 in s je večji od 1.

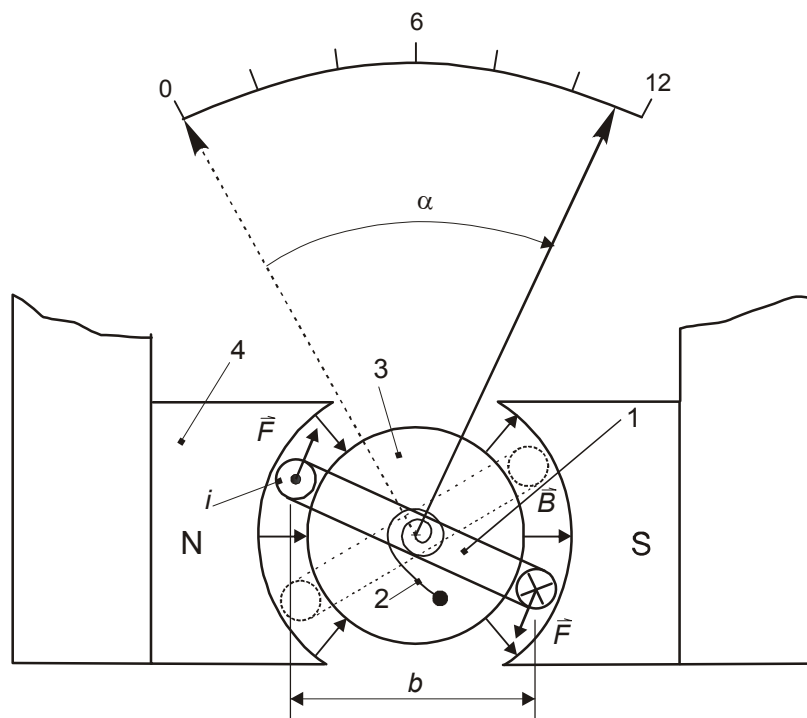


Slika 5-2: Graf prehodnega pojava. (a) stopničasta sprememba merjene veličine, (b) nedušeno nihanje, (c) podkritično dušenje, (d) kritično dušenje in (e) nadkritično dušenje.

Merilne sisteme s podanimi karakterističnimi odzivi imenujemo nedušen sistem, podkritično dušen sistem, kritično dušen sistem in nadkritično dušen sistem. Vidimo, da je za uspešno meritev primeren merilni sistem s stopnjo dušenja čim bližje 1. V takem primeru merilni sistem zavzame dovolj hitro novo mirujoče stanje z ne prevelikimi prenihinji ali celo brez njih.

5.1.3 Instrument z vrtljivo tuljavico

Instrument z vrtljivo tuljavico (IVT) je zaradi svojih dobrih lastnosti tudi v današnjem času velikokrat uporabljan instrument na področju enosmernih in izmeničnih meritev. V osnovi je zelo enostaven, širšo uporabnost dobi z raznimi dodatnimi elementi. Za njegovo delovanje je izkoriščen pojav sile F na vodnik, skozi katerega teče električni tok i in je ta vodnik v magnetnem polju gostote B . Izvedbo prikazuje slika 5-3.



- 1 - vrtljiva tuljavica
- 2 - vzmet
- 3 - jedro (mehko železo)
- 4 - trajni magnet

Slika 5-3: Skica izvedbe merilnega sistema IVT.

Vodnik predstavlja N ovojev vrtljive tuljavice, ki so v magnetnem polju gostote B v zračni reži med poloma trajnega magneta in jedra iz mehkega železa. Tuljavica je na uležajeni osi in se lahko zavrti. Nanjo je pritrjen kazalec, povezana pa je tudi z elementom za tvorbo nasprotnega mehanskega momenta, na primer s spiralno vzmetjo. Skozi tuljavico teče električni (merjeni) tok i in zato nanjo deluje sila F :

$$\vec{F} = i \cdot N \cdot \vec{a} \times \vec{B}. \quad (5-11)$$

Vektorja $\vec{a}$ in $\vec{B}$ sta med sabo pravokotna, zato smemo zapisati produkt skalarjev:

$$F = iNaB. \quad (5-12)$$

Moment M_1 je:

$$M_1 = 2F \frac{b}{2} = iNaBb = iN\phi = i\phi_0. \quad (5-13)$$

ϕ_0 je N -kratni magnetni pretok ϕ skozi tuljavico.

Mehanski moment M_2 je:

$$M_2 = -D \cdot \alpha \quad (5-14)$$

in ravnotežna enačba:

$$\phi_0 i - D \cdot \alpha = 0 \quad (5-15)$$

Iz nje izrazimo odklonsko enačbo:

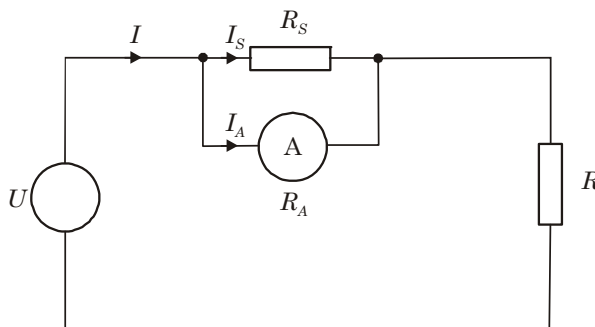
$$\alpha = \frac{\phi_0}{D} \cdot i. \quad (5-16)$$

Ta enačba pove, da je odklon instrumenta z vrtljivo tuljavico premo sorazmeren toku, ki teče skozi tuljavico. Mirujoči odklon dobimo le pri enosmernem toku, pri izmeničnem toku pa se smer odklona nenehno spreminja. Zato velja, da je tak instrument v svoji osnovni izvedbi sposoben meriti le enosmerne tokove.

Razširitev merilnega območja IVT

Z merilnim instrumentom brez dodatnih elementov lahko merimo le majhne vrednosti tokov, pa tudi nizke vrednosti napetosti. Temu primerna mora biti izvedba merilne tuljavice. Za merjenje toka je primerna tuljavica z manj ovoji žice večjega preseka, torej z nizko ohmsko upornostjo, za merjenje napetosti pa tuljavica z več ovoji žice manjšega preseka, torej z visoko ohmsko upornostjo. Vendar se širokega območja merjenj ne da rešiti le na tak način. Zelo prikladno se je izkazalo in se uveljavilo razširjanje merilnih območij s pomočjo ohmskih uporov.

Če želimo razširiti merilno območje instrumentu za merjenje toka, mu vežemo vzporedno (paralelno) ohmski upor primerne vrednosti, pravimo mu soupor.



Slika 5-4: Razširitev merilnega območja s souporom.

Za določitev soupora R_S moramo vedeti, na kolikšen tok I želimo razširiti merilno območje. Poznati moramo tudi podatka instrumenta, njegovo merilno območje I_A in notranjo upornost R_A . Sedaj lahko nastavimo enačbo:

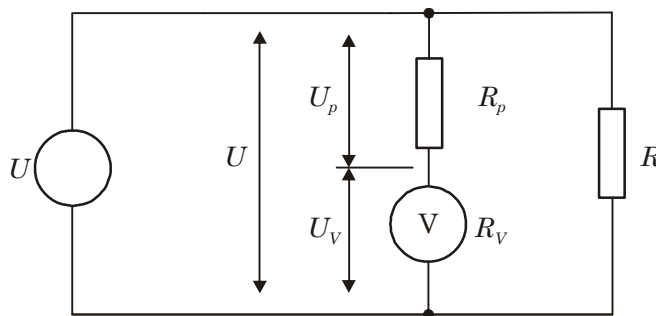
$$I_A R_A = I_S R_S = (I - I_A) R_S. \quad (5-17)$$

Torej mora biti upornost soupora R_S :

$$R_S = \frac{R_A I_A}{I - I_A}. \quad (5-18)$$

Soupor R_S ima tem manjšo vrednost, na čim večji tok I razširimo merilno območje. Običajno so soupori za različna tokovna območja vgrajeni v ohišja ampermetrov in jih izbiramo po potrebi. Za posebne primere jih moramo določiti sami, vendar moramo pri izvedbi biti pazljivi, saj nam predvsem neupoštevanje upornosti povezav lahko povzroči velike pogreške.

Če pa razširjamo merilno območje instrumentu za merjenje napetosti, mu ohmski upor vezemo zaporedno (predupor).



Slika 5-5: Razširitev merilnega območja s preduporom.

Za določitev predupora R_p moramo vedeti, na kolikšno napetost U želimo razširiti merilno območje. Tudi podatka instrumenta, njegovo merilno območje U_V in notranja upornost R_V , morata biti znana. Sedaj lahko nastavimo enačbo:

$$\frac{R_p}{R_V} = \frac{U_p}{U_V} = \frac{U - U_V}{U_V}. \quad (5-19)$$

Upornost predupora R_p mora biti:

$$R_p = R_V \frac{U - U_V}{U_V} \quad (5-20)$$

Na čim višjo napetost U razširimo merilno območje, tem večjo vrednost predupora R_p potrebujemo. Tudi predupori so običajno že vgrajeni v ohišja voltmetrov in jih izbiramo po potrebi. V primeru razširjanja območij voltmetrov praktično ni problemov zaradi

upornosti povezav, saj so te majhne v primerjavi z upornostjo preduporov. Včasih pri voltmetrih najdemo podatek o njihovi karakteristični upornosti R_K v Ω/V , kjer gre za razmerje med skupno upornostjo (predupora in instrumenta) in merilnim območjem instrumenta. Seveda je ugodno, če je ta vrednost velika.

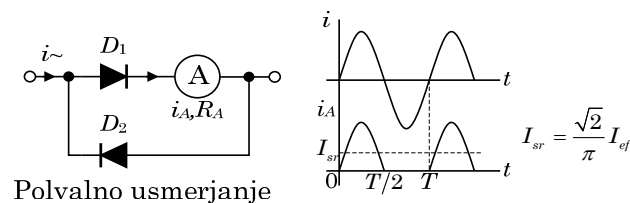
Instrument z vrtljivo tuljavico za merjenje izmeničnih veličin

Instrument z vrtljivo tuljavico ima nekatere zelo dobre lastnosti, to sta predvsem velika občutljivost in relativno majhna lastna poraba, zato ga uporabljamo tudi za merjenje izmeničnih veličin. Ker pa po načinu delovanja lahko meri le enosmerne tokove, je treba izmenično veličino najprej usmeriti. Najpogosteje se uporabijo polprevodniški usmerniki, redkeje pa termopretvorniki ali drugi načini.

IVT s polprevodniškim usmernikom

Za usmerjanje se uporabljajo polprevodniške diode (Ge, Si). $U-I$ karakteristike diod so v prevodni smeri v začetku približno kvadratičnega poteka, potem pa preidejo v linearni del, ta je praktično vedno tisti, ki se izkoristi za usmerjanje. Kljub temu je včasih skala takega instrumenta v začetnem delu nekoliko nelinearna.

Usmerjamo lahko z eno diodo, kjer imamo polvalno usmerjanje.



Slika 5-6: Vezje za polvalno usmerjanje.

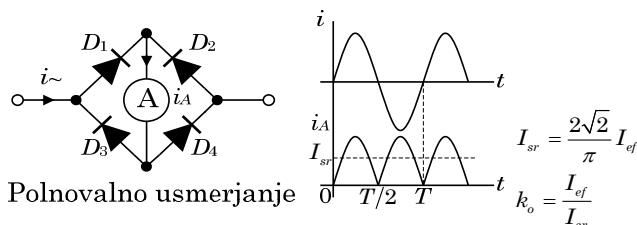
Praktično v tem primeru tečejo preko instrumenta le pozitivni polvali toka. Zaradi mehanske vztrajnosti zavzame merilni sistem lego, ki ustreza srednji vrednosti usmerjenega toka. Za sinusno obliko sta srednja vrednost toka in faktor oblike k_o enaka:

$$I_{sr} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} I_{ef}$$

$$k_o = \frac{I_{ef}}{I_{sr}} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} = 2,22$$
(5-21)

Pri izmeničnih veličinah najpogosteje določamo njihove efektivne vrednosti. Zato mora biti skala instrumenta izpisana za efektivne vrednosti. Praksa je ta, da se skala izpiše za sinusne veličine, kar pa pomeni, da instrument ne meri pravilno drugih oblik, saj je njihov faktor oblike k_o drugačen. To je torej omejitev uporabnosti takega instrumenta.

Pogostejše uporabljamo polnovalno usmerjanje z usmernikom imenovanim tudi Graetzovo usmerniško vezje, s štirimi polprevodniškimi diodami.



Slika 5-7: Vezje za polnovalno usmerjanje.

V primerjavi s polvalnim usmerjanjem teče pri istih vrednostih izmeničnega toka čez instrument dvakratna vrednost enosmernega toka. V bistvu gre za povečanje občutljivosti instrumenta, ki se prav tako postavi v lego, ki ustreza srednji vrednosti usmerjenega toka. Za sinusno obliko sta srednja vrednost toka in faktor oblike k_o enaka:

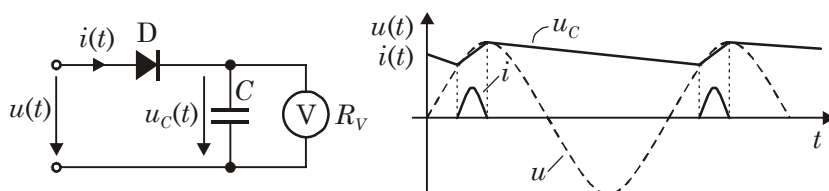
$$I_{sr} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_{ef}$$

$$k_o = \frac{I_{ef}}{I_{sr}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11$$
(5-22)

Tudi v tem primeru obstaja enaka omejitev uporabe instrumenta kot v prejšnjem primeru.

Omenjena nelinearnost skale instrumentov s polprevodniškim usmernikom je tem manjša, čim večja je upornost predupora k instrumentu, glej sliko 5-9. Opozoriti velja tudi na to, da imajo včasih ti instrumenti ločeni skali za enosmerno in izmenično merjenje. Zamenjava skal pri odčitavanju pomeni napačne merilne rezultate.

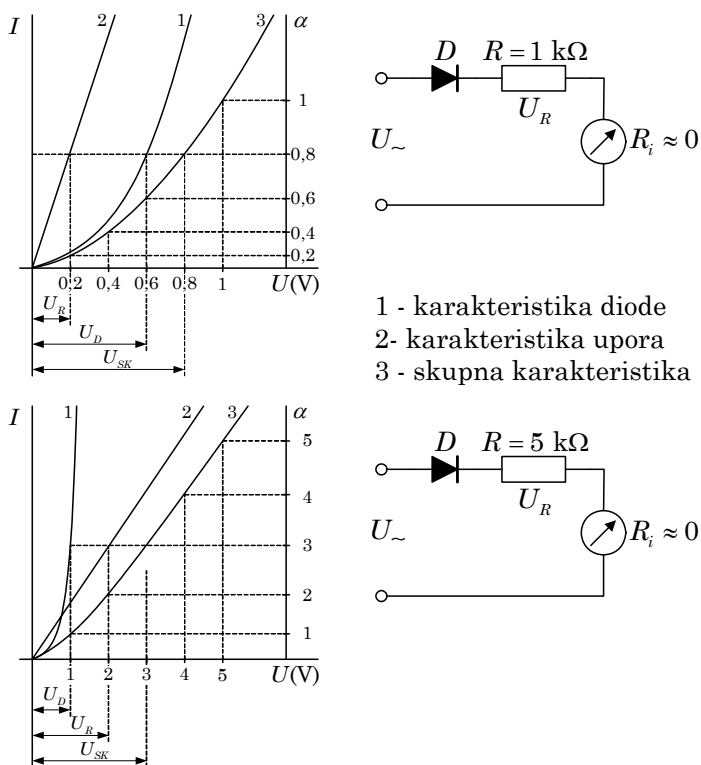
Kadar želimo meriti temensko vrednost merjene veličine, uporabimo usmernik za temensko usmerjanje, glej sliko 5-8.



Slika 5-8: Temensko usmerjanje in časovni potek veličin.

Merilni instrument kaže praktično sorazmerno temenski vrednosti merjene veličine s pogojem, da je njegova upornost (s preduporom) dovolj visoka in se kondenzator v negativni polperiodi merjene veličine le minimalno izprazni preko instrumenta. Zato je tudi polnilni tok kondenzatorja majhen in traja le kratek čas, kar

pomeni tudi minimalno obremenjevanje merjenca. Skala takega instrumenta je lahko izpisana tudi za efektivne vrednosti merjene veličine, ta takrat upošteva temenski faktor, kar pa prav tako pomeni omejitev uporabe instrumenta le za določeno obliko merjene veličine.



Slika 5-9: Karakteristike skale z manjšim in večjim preduporom.

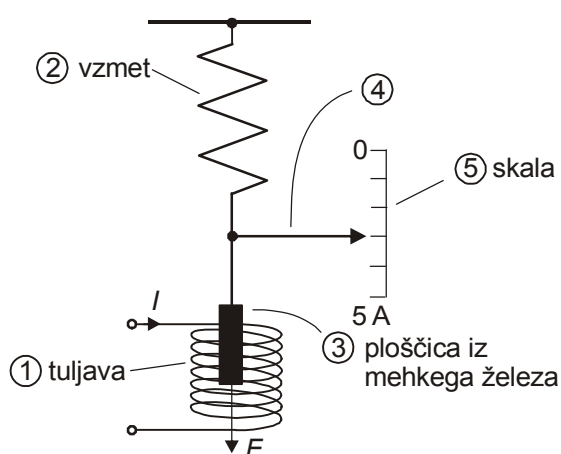
Instrument z vrtljivo tuljavico s termopretvornikom

Včasih, sicer redko, najdemo instrument z vrtljivo tuljavico, kjer je usmerjanje izvedeno s termopretvornikom. V tem primeru merjeni tok (ta je sicer lahko tudi enosmerni) segreva spojno mesto termopretvornika. Merilni instrument je priključen med oba prosta konca termopretvornika, med katerima se zaradi temperaturne razlike med segrevanim spojnim mestom in prostima koncema pojavi enosmerna napetost. Ta je približno premo sorazmerna temperaturni razliki oziroma efektivni vrednosti merjenega toka na kvadrat, saj je od tega odvisno segrevanje. To pomeni, da je kazanje merilnega instrumenta sorazmerno efektivni vrednosti merjenega toka, neodvisno od njegove oblike. V tem je temeljna razlika uporabe polprevodniškega usmernika in termopretvornika.

5.1.4 Instrument z vrtljivim železom

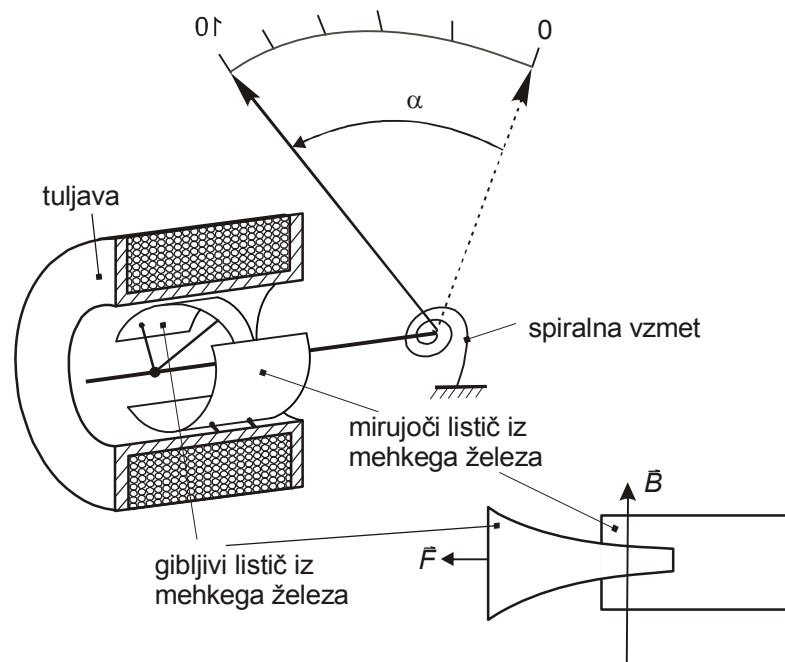
Ta vrsta instrumenta sicer nima visoke točnosti, je pa zelo enostavne konstrukcije in se odlikuje po odpornosti proti različnim preobremenitvam. Ima sorazmerno veliko lastno porabo, zato ni primeren za merjenja v nizko obremenljivih virih merilnega signala. Uporabljamo ga predvsem pri meritvah v energetiki.

Princip delovanja instrumenta z vrtljivim železom prikazujemo s tuljavo (1), skozi katero teče merjeni tok I . Magnetno polje tuljave pritegne na vzmeti (2), ki je element za mehanski moment, visečo ploščico iz mehkega železa (3), ki nosi kazalec (4) ob skali (5). Večji tok povzroči, da se listič bolj "potopi" v tuljavo. Kazalec se zato ustavi ob mirujoči skali na mestu, kakor to določi ravnotežje sistema, odvisno od vrednosti merjenega toka.



Slika 5-10: Princip delovanja instrumenta z vrtljivim železom.

Instrumenti so v sedanjem času izvedeni tako, da sta v tuljavi nameščena dva lističa iz mehkega železa, eden mirujoč, drugi pa gibljiv, nasproti ležeč, povezan z vrtljivo osjo. Oba lističa se v magnetnem polju tuljave namagnetita istosmiselno, zato se odbijata. Torej se gibljivi listič zavrti. Ker na isto os deluje tudi element za mehanski moment, na primer spiralna vzmet, se sistem ustavi v ravnotežnem položaju. Kazalec, prav tako pritrjen na gibljivi del, pokaže merjenemu toku proporcionalni odklon.



Slika 5-11: Instrument z vrtljivim železom.

Kaj pravzaprav meri ta instrument, prikažimo z osnovnimi enačbami.

Električni moment M_1 definirajmo kot odvod magnetne energije po premiku, torej odklonu:

$$M_1 = \frac{\partial W_m}{\partial \alpha} \quad (5-23)$$

$$W_m = \frac{L \cdot i^2}{2}$$

Zato je moment M_1 pri enosmernem toku

$$M_1 = \frac{I^2}{2} \frac{\partial L}{\partial \alpha} \quad (5-24)$$

Pri izmeničnem toku izhajamo iz trenutne vrednosti momenta m_1 , ki je

$$m_1 = \frac{i^2}{2} \frac{\partial L}{\partial \alpha} \quad (5-25)$$

Giblivi del instrumenta ne more slediti trenutnim vrednostim, postavi se pa v lego, ki je skladna s srednjo vrednostjo momenta

$$M_1 = \frac{1}{T} \int_0^T m_1 dt = \frac{I_{ef}^2}{2} \frac{\partial L}{\partial \alpha} \quad (5-26)$$

V tej enačbi je I_{ef} efektivna vrednost toka, ki jo instrument meri pravilno ne glede na obliko izmeničnega toka. Uporabljamo ga za merjenje enosmernih in izmeničnih tokov ter napetosti.

Ravnotežje se doseže z mehanskim momentom M_2

$$M_2 = -D \cdot \alpha \quad (5-27)$$

oziroma

$$\begin{aligned} M_1 + M_2 &= 0 \\ \frac{I_{ef}^2}{2} \frac{\partial L}{\partial \alpha} - D\alpha &= 0 \end{aligned} \quad (5-28)$$

in je odklonska enačba instrumenta z mehkim železom

$$\alpha = \frac{1}{2} \frac{I_{ef}^2}{D} \frac{\partial L}{\partial \alpha}. \quad (5-29)$$

S primernim oblikovanjem kovinskih lističev se skuša doseči, da je izraz $I_{ef} \frac{\partial L}{\partial \alpha}$ konstanten. Potem je skala instrumenta, ki je v principu kvadratična, linearizirana. Le v začetku ostane nekoliko nelinearna.

Merilno območje instrumenta se lahko razširi s predupori in soupori, vendar le za določeno frekvenco, ki je na instrumentih običajno tudi označena. Druga možnost je, da ima instrument več tuljav, ki jih različno povezujemo in s tem dosežemo različna merilna območja.

Instrumentov te vrste je vedno manj, proizvajalci ga praktično ne izdelujejo več. Vendar ga še marsikje uporabljajo, saj svoje merilne lastnosti kljub starosti dobro ohranja.

5.1.5 Elektrodinamični instrument

Ta izvedba instrumenta ima dve tuljavici, gibljivo in mirujočo. Tok I_1 skozi mirujočo tuljavico povzroči magnetno polje, v katerem se premika (zavrti) gibljiva tuljavica, skozi katero teče tok I_2 . Gre pravzaprav za pojav sile med vodnikoma, skozi katera tečeta električna toka.

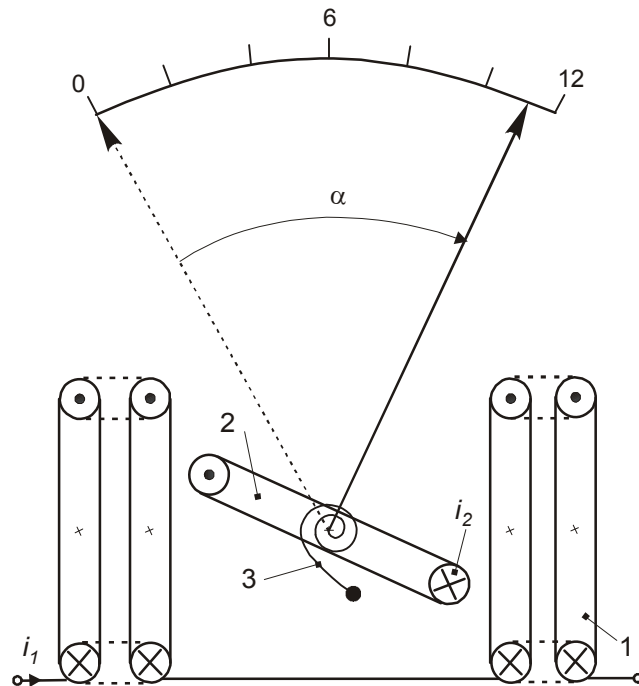
Električni moment M_1 določimo z znanim izrazom

$$M_1 = \frac{\partial W_m}{\partial \alpha}. \quad (5-30)$$

V tem primeru je energija magnetnega polja W_m

$$W_m = \frac{L_1 i_1^2}{2} + \frac{L_2 i_2^2}{2} + i_1 \cdot i_2 \cdot M, \quad (5-31)$$

pri čemer je L_1 induktivnost nepremične tuljavice, L_2 induktivnost vrtljive tuljavice in M njuna medsebojna induktivnost.



Slika 5-12: Elektrodinamični instrument.

Lastni induktivnosti tuljavic se z odklonom ne spreminjata, zato je trenutna vrednost momenta m_1 odvisna od spremembe njune medsebojne induktivnosti M

$$m_1 = i_1 \cdot i_2 \cdot \frac{\partial M}{\partial \alpha}. \quad (5-32)$$

Instrument se odkloni skladno s srednjo vrednostjo momenta M_1

$$M_1 = \frac{1}{T} \int_0^T m_1 dt = I_1 \cdot I_2 \cdot \frac{\partial M}{\partial \alpha}, \quad (5-33)$$

kadar tečeta v tuljavicah enosmerna toka, in

$$M_1 = I_1 \cdot I_2 \cos \delta \frac{\partial M}{\partial \alpha} \quad (5-34)$$

kadar sta I_1 in I_2 efektivni vrednosti izmeničnih tokov δ pa kot med njima.

S skrajšanjem mirujoče in omejitvijo vrtenja gibljive tuljavice v območju $\pm 45^\circ$ od vertikalne osi dosežemo, da je $\partial M / \partial \alpha$ konstantna vrednost.

Zato je moment M_1

$$M_1 = k \cdot I_1 \cdot I_2 \text{ za enosmerne oziroma} \quad (5-35)$$

$$M_1 = k \cdot I_1 \cdot I_2 \cos \delta \text{ za izmenične tokove.} \quad (5-36)$$

Pri $M_2 = -D \cdot \alpha$ je odklonska enačba za enosmerne tokove

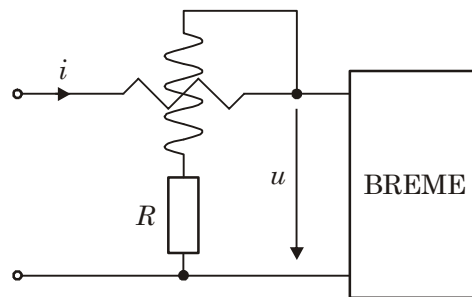
$$\alpha = K \cdot I_1 \cdot I_2 \quad (5-37)$$

in

$$\alpha = K \cdot I_1 \cdot I_2 \cos \delta \quad (5-38)$$

za izmenične tokove.

Elektrodinamični instrument uporabljamo praktično le kot vatmeter, torej merilni instrument za merjenje moči. Mirujoča tuljavica je tokovna, skozi njo teče tok merjenca, gibljiva pa napetostna, priključena na napetost merjenca, glej sliko 5-13.



Slika 5-13: Vezava vatmetra.

Pri merjenju v enosmernih sistemih velja

$$I_1 = I \text{ in } I_2 = \frac{U}{R_{nap} + R}, \quad (5-39)$$

kjer je R_{nap} ohmska upornost napetostne tuljavice vatmetra, R pa predupor. Zato je odklon

$$\alpha = K \cdot I \cdot \frac{U}{R_{nap} + R} = K_1 P. \quad (5-40)$$

Pri izmeničnih sistemih se napetostni del instrumenta izvede tako, da je ohmska upornost R_{nap} napetostne tuljavice veliko večja od njene induktivne upornosti X_{nap} . V takem primeru je I_2 praktično v fazi z napetostjo U , zato je kot δ enak faznemu kotu φ med U in I . Odklonska enačba je sedaj

$$\alpha = K_1 \cdot I \cdot U \cdot \cos \varphi = K_1 \cdot P \quad (5-41)$$

Torej meri elektrodinamični instrument v izmeničnem vezju delovno moč merjenca oziroma bremena.

Elektrodinamični vatmetri so glede na izvedbo tokovnega dela instrumenta lahko v izvedbi brez železa ali z železom. V prvem primeru je tokovna tuljavica zračna, torej brez jedra, v drugem pa

je navita na jedro iz mehkega železa. Prva izvedba omogoča točnejši instrument. Druga pa je ob večjih momentih pri istih tokovih sicer manj občutljiva za zunanje motnje, zaradi prisotnosti železa in izgub v njem pa je točnost takih izvedb zmanjšana.

Običajno so elektrodinamični vatmetri izdelani za dve tokovni in več napetostnih merilnih območij. Ker imajo le eno skalo, je ob različnih kombinacijah območij vsakokrat drugačna konstanta instrumenta. Praviloma so njene vrednosti že navedene na instrumentu. Če jih ni, jih izračunamo glede na izbrani merilni območji in $\cos\varphi$, na primer

$$k_W = \frac{U \cdot I \cdot \cos\varphi}{\alpha_m} \quad (5-42)$$

in jo dobimo v W/delec (razdelek).

Pomemben podatek vatmetra je tudi $\cos\varphi_w$, torej podatek samega instrumenta, ki ga ne smemo zamenjevati s $\cos\varphi$ bremena. $\cos\varphi_w$ vatmetra pove, pri katerem $\cos\varphi$ doseže instrument maksimalni (končni) odklon, če sta seveda tudi tok in napetost na končnih vrednostih izbranih območij. Največkrat je ta podatek $\cos\varphi_w=1$ in takrat pogosto niti ni posebej označen. Gotovo pa je označen, če je manjši od 1, na primer $\cos\varphi_w=0,5$ ali $\cos\varphi_w=0,2$. Vatmetre z manjšim $\cos\varphi_w$ uporabljamo takrat, kadar merimo delovno moč bremen z nizkim $\cos\varphi$, torej pretežno induktivnih ali kapacitivnih bremen, kjer kljub majhni delovni moči dobimo zadovoljivo velike odklone instrumenta, kar pomeni ožje meje pogreškov.

Elektrodinamični instrument je lahko izdelan tudi za merjenje jalove moči, torej je takrat varmeter. Razlika v primerjavi z vatmetrom je ta, da je s posebnim vezjem tok I_2 skozi napetostno tuljavico zakasnen za napetostjo U za 90° . Odklonska enačba zato dobi obliko

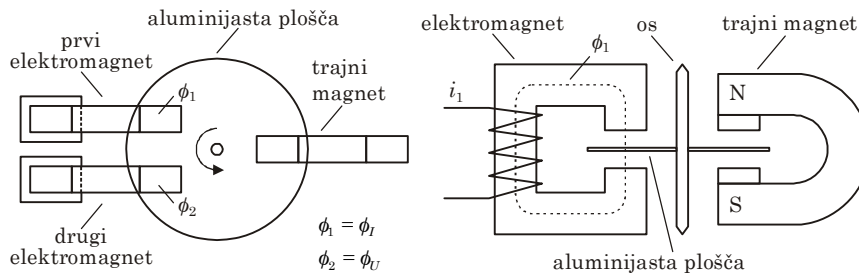
$$\alpha = K \cdot U \cdot I \cdot \cos(90^\circ - \varphi) = K \cdot U \cdot I \cdot \sin\varphi = K \cdot Q. \quad (5-43)$$

Varmetri se izdelujejo manj kot vatmetri. Jalovo moč v praksi merimo manjkrat kot delovno, vpliva pa še to, da lahko jalovo moč v trifaznih sistemih merimo tudi z vatmetri, kjer uporabimo poseben način priključitve napetostnih tuljavic.

5.1.6 Indukcijski instrument

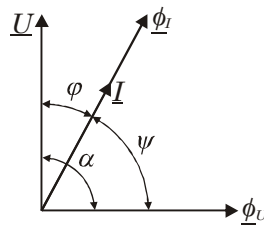
Indukcijski merilni instrument se praktično izdeluje le še kot indukcijski števec električne energije v izmeničnih sistemih, kjer se uporablja za manjše porabnike, predvsem gospodinjstva. Število teh instrumentov v uporabi je izredno veliko, proizvodnja pa prav tako.

Merilni sistem tega instrumenta je sestavljen iz dveh elektromagnetov. Jedri elektromagnetov imata zračni reži, v katerih se vrtili na osi pritrjena okrogla plošča iz aluminija. Ta plošča se istočasno vrtili tudi v zračni reži trajnega magneta. Vrtenje plošče se preko sistema povezanega z osjo prenaša na številčnik števca.



Slika 5-14: Indukcijski instrument.

Skozi navitje prvega elektromagneta teče tok bremena, zato je magnetni pretok (fluks) ϕ_I v njegovi zračni reži sorproportionalen toku I . Navitje drugega elektromagneta pa je priključeno na napetost bremena, zato je njegov magnetni pretok (fluks) ϕ_U sorproportionalen napetosti U . Oba pretoka sta izmenična in v aluminijasti plošči inducirata napetosti, ki za 90° zaostajata za pretokoma. Napetosti poženeta v plošči vrtnična tokova I_I in I_U , ki sta praktično v fazi z induciranimi napetostma, ki ju povzročata.



Slika 5-15: Kazalčni diagram indukcijskega instrumenta.

V takem sistemu pride do dveh mehanskih (električnih) momentov, ki delujeta v isti smeri, se torej seštevata. Momenta sta odvisna od enega pretoka in posledice drugega pretoka, torej

$$M'_1 = k_1 \phi_U I_I \cos(90^\circ - \psi) = k_1 \phi_U I_I \sin \psi = k_2 \phi_U \phi_I \sin \psi \quad (5-44)$$

in

$$M'_2 = k_3 \phi_I I_U \cos(90^\circ + \psi) = k_3 \phi_I I_U \sin \psi = k_4 \phi_I \phi_U \sin \psi. \quad (5-45)$$

Skupni moment je njuna vsota

$$M_1 = k_5 \phi_U \phi_I \sin \psi = k_6 UI \sin \psi. \quad (5-46)$$

Ob izpolnitvi pogoja $\psi = 90^\circ - \varphi$ velja

$$M_1 = k_6 UI \sin(90^\circ - \varphi) = k_6 UI \cos \varphi = k_6 P. \quad (5-47)$$

Torej je mehanski moment sorproportionalen delovni moči P .

Ravnotežje sistema dosežemo z vplivom trajnega magneta, v katerega zračni reži se vrti aluminijasta plošča in seka silnice

magnetnega polja, v kateri se zato inducira napetost, ki tudi požene vrtnični tok v njej. Zato na aluminijasto ploščo deluje moment M_2 , nasproten momentu M_1 in zavira vrtenje. M_2 je odvisen od lastnosti trajnega magneta in hitrosti vrtenja.

$$M_2 = k_7 \cdot v. \quad (5-48)$$

Hitrost vrtenja, ki je odvisna od delovne moči bremena, lahko izrazimo z razmerjem števila vrtljajev aluminijaste plošče in časa, v katerem se je to število vrtljajev zgodilo

$$v = \frac{n}{t}. \quad (5-49)$$

Zato je

$$M_2 = k_7 \frac{n}{t}. \quad (5-50)$$

Ravnotežje tega merilnega sistema je, kadar sta momenta M_1 in M_2 enaka oziroma, ko se aluminijasta plošča vrti enakomerno:

$$\begin{aligned} k_6 P &= k_7 \frac{n}{t} \\ n &= k_8 P \cdot t = k_8 W \end{aligned} \quad (5-51)$$

Torej je število vrtljajev v času porabe energije, na primer med dvema odčitavanjema števca, proporcionalno porabljeni energiji.

$$W = k_9 n. \quad (5-52)$$

Seveda je prenos na številčnik števca izveden tako, da neposredno odčitamo že energijo, na primer v kWh.

Indukcijski števcji imajo razrede točnosti 0,5, 1 in 2, kar popolnoma zadostuje za njihovo uporabo. V široki uporabi je praviloma razred 2. Na njih je vedno tudi značilen podatek za konstanto števca, ki pove, koliko vrtljajev opravijo za 1 kWh, torej v vrt./kWh. Običajno je ta velikostnega reda okoli 1000 vrt./kWh.

Števci morajo imeti glede na to, kje vse z njimi merimo, zelo široko območje obremenljivosti. Ta znaša tudi do 400 % nazivnega toka.

5.2 Analogni elektronski voltmetri

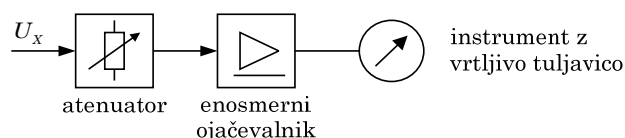
To so voltmetri, katerih bistveni del je merilni ojačevalnik, vrednost merjene veličine pa odčitamo na odklonskem instrumentu, praviloma na instrumentu z vrtljivo tuljavico. Taka izvedba instrumentov omogoča veliko občutljivost (okoli 1 μ V), visoko vhodno upornost (nad 10 M Ω), vendar pa nekoliko manjšo točnost, kot jo ima uporabljeni merilni instrument.

5.2.1 Enosmerni elektronski voltmeter

Enosmerni elektronski voltmeter je namenjen merjenju enosmernih napetosti. Zanj je lahko uporabljen enosmerni ali izmenični ojačevalnik. Izvedba z enosmernim ojačevalnikom omogoča točnejša merjenja, vendar pa ni primerna, kadar so merjene napetosti nizke. Takrat imajo pomanjkljivosti enosmernih ojačevalnikov, na primer offset (premaknitev) in drift (lezenje), premočan vpliv na izmerjeni rezultat.

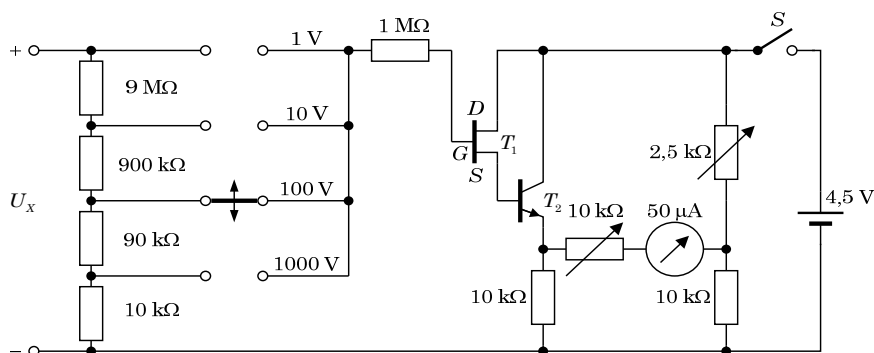
Enosmerni elektronski voltmeter z enosmernim ojačevalnikom

Blokovna shema enosmernega elektronskega voltmetra z enosmernim ojačevalnikom je sestavljena iz atenuatorja, na primer delilnika napetosti, enosmernega ojačevalnika in odklonskega instrumenta, glej sliko 5-16.



Slika 5-16: Blokovna shema enosmernega voltmetra z enosmernim ojačevalnikom.

Za boljše razumevanje na sliki 5-17 predstavljamo enostavno vezje, izvedeno po podani blokovni shemi.

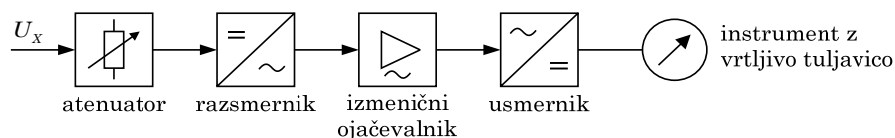


Slika 5-17: Vezje enosmernega voltmetra z enosmernim ojačevalnikom.

Atenuator je uporovni delilnik napetosti, tranzistor T_1 pa je FET tranzistor, ki zagotavlja visoko vhodno upornost voltmetra. Ostali del vezja je mostično ojačevalno vezje, ki ima v eni veji tranzistor T_2 , v ostalih treh pa ohmske upore. Odklonski instrument s preduporom, ki služi tudi za kalibracijo, je v eni diagonali, pomožno napajanje, prikazano z baterijo 4,5 V, pa v drugi diagonali mostiča. Pred začetkom merjenja lahko pri kratko sklenjenih vhodnih sponkah nastavimo ničelno kazanje instrumenta z uporom 2,5 kΩ.

Enosmerni elektronski voltmeter z izmeničnim ojačevalnikom

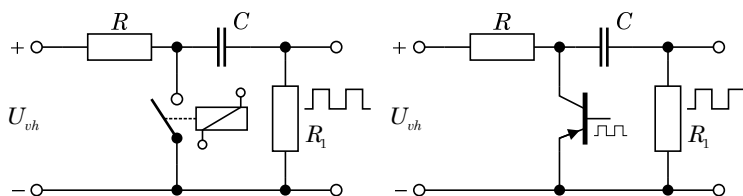
Enosmerni elektronski voltmeter z izmeničnim ojačevalnikom enosmerno napetost razsmeri, torej pretvori v izmenično napetost. Nato jo ojači v izmeničnem ojačevalniku ter ponovno usmeri, da jo lahko instrument z vrtljivo tuljavico prikaže.



Slika 5-18: Blokovna shema enosmernega voltmetra z izmeničnim ojačevalnikom.

Kot prikazuje slika 5-18, je število komponent pri tej izvedbi večje, posledica je nekoliko manjša točnost, kot pri izvedbi z enosmernim ojačevalnikom.

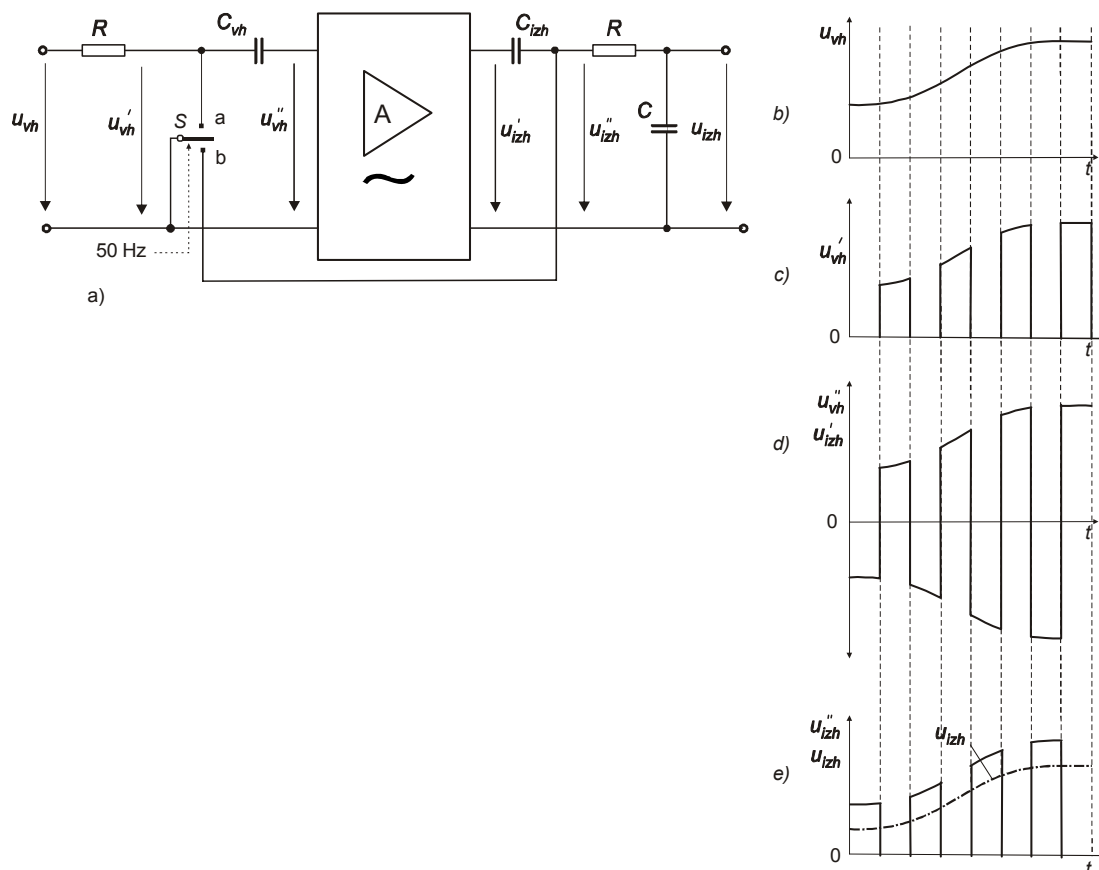
Razsmerjanje izvede razsmernik. V preteklosti so bili uporabljeni mehanski razsmerniki, ki pa imajo frekvenčne omejitve. Pri elektronskih razsmernikih je vlogo mehanskega stikala prevzel tranzistor, katerega bazo vzbujamo z višjo frekvenco in s tem dosežemo višjo frekvenco napetosti, ki jo vodimo v ojačevalnik.



Slika 5-19: Mehanski in elektronski razsmernik.

Na sliki 5-20 prikazujemo elektronski voltmeter z vsemi komponentami, tokrat zaradi nazornosti z mehanskim razsmernikom. Prikazani poteki napetosti ustrezajo po obliki in časovno, ne pa amplitudno.

Stikalo S mehanskega razsmernika razsmerja v položaju a vhodno napetost, v položaju b pa usmerja izhodno napetost iz izmeničnega ojačevalnika. RC -člen na izhodu pulzirajočo izhodno napetost gladi, tako da čez instrument teče neprekinjeni tok.

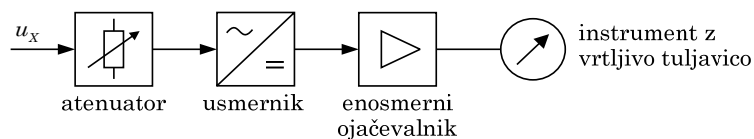


Slika 5-20: Elektronski voltmeter z izmeničnim ojačevalnikom: (a) vezje, (b, c, d, e) časovni poteki napetosti.

5.2.2 Izmenični elektronski voltmeter

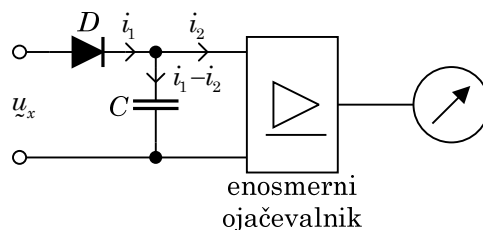
Z izmeničnim elektronskim voltmetrom merimo izmenične napetosti. Tudi za ta voltmeter lahko uporabimo enosmerni ali izmenični ojačevalnik. Za merjenje višjih napetosti lahko uporabljamo izvedbo z enosmernim, za merjenje nižjih pa izvedbo z izmeničnim ojačevalnikom.

Izmenični elektronski voltmeter z enosmernim ojačevalnikom izmenično napetost najprej usmeri, nato ojači in prikaže z odklonskim instrumentom.



Slika 5-21: Blokovna shema izmeničnega voltmetra z enosmernim ojačevalnikom.

Pri tej izvedbi je pogosto uporabljen temenski usmernik. Princip, brez atenuatorja, je prikazan na sliki 5-22.

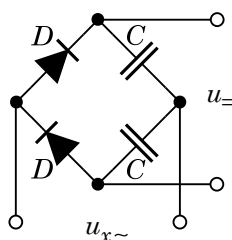


Slika 5-22: Izmenični voltmeter s temenskim usmerjanjem.

Temensko usmerjanje omogoča malo obremenjevanje izvora merilnega signala. To je nazorno razvidno iz časovnega poteka signalov v vezju na sliki 5-8.

Za zadovoljivo delovanje voltmetera mora biti časovna konstanta polnjenja kondenzatorja C majhna, kar omogoča majhna ohmska upornost na vходу usmernika (upornost diode v prevodni smeri in povezav), časovna konstanta praznjenja pa velika, kar omogoči velika ohmska upornost na izhodu usmernika (vhodna upornost ojačevalnika).

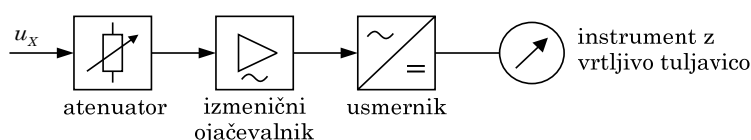
Za temensko usmerjanje pogosto uporabljamo vezje z dvema diodama in dvema kondenzatorjema, Greinacherjevo usmerniško vezje.



Slika 5-23: Greinacherjevo usmerniško vezje.

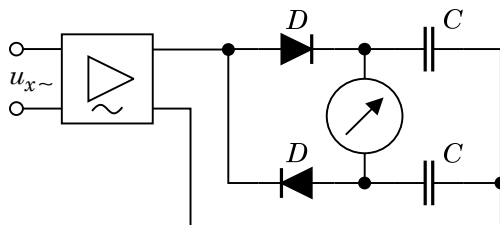
Na eno diagonalo tega vezja priključimo merjeno izmenično napetost, na drugi diagonali pa dobimo enosmerno napetost praktično dvakratne temenske vrednosti priključene izmenične napetosti. Občutljivost voltmetera smo z uporabo tega vezja močno povečali.

Izmenični elektronski voltmeter z izmeničnim ojačevalnikom usmeri že ojačeni signal, da ga lahko prikaže instrument z vrtljivo tuljavico.



Slika 5-24: Blokovna shema izmeničnega elektronskega voltmetera z izmeničnim ojačevalnikom.

Usmerjanje je lahko izvedeno z različnimi usmerniškimi vezji. Na naslednji sliki voltmetra smo uporabili Greinacherjev temenski usmernik (atenuator ni vrisan).

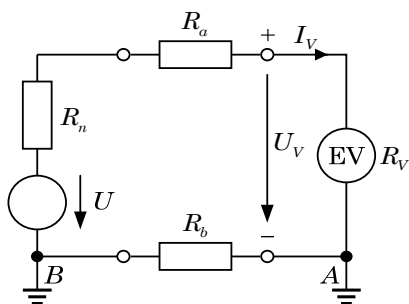


Slika 5-25: Izmenični elektronski voltmeter z izmeničnim ojačevalnikom in temenskim usmernikom.

Pri merjenju izmeničnih napetosti največkrat ugotavljamo njeno efektivno vrednost. Instrument v predstavljenih izvedbah s temenskim usmerjanjem pa kaže sorazmerno temenski vrednosti napetosti. Zato mora biti skala instrumenta ali njegova konstanta prirejena tako, da pri odčitavanju rezultata dobimo efektivno vrednost. Zato je pri tem upoštevan temenski faktor, ki pa je odvisen od oblike merjene napetosti. Praviloma so instrumenti prirejani za sinusno obliko, kar pomeni, da ne merijo pravilno napetosti nesinusnih oblik.

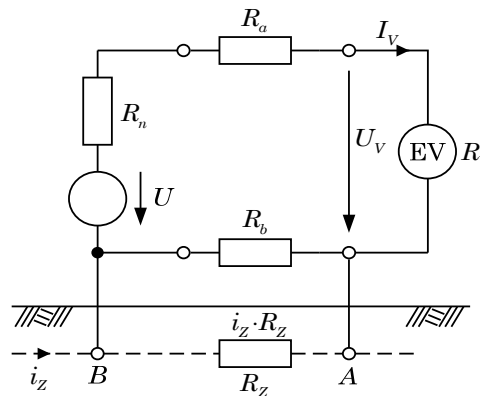
5.3 Problematika ozemljevanja pri elektronskih merilnih instrumentih

Praviloma je ena od vhodnih priključnih sponk elektronskih merilnih instrumentov in naprav ozemljena. Povezana je z zaščitnim vodnikom, ta pa z ohišjem instrumenta in je eden od vodnikov v kablu za napajanje instrumenta s pomožno energijo. Je rumeno-zelene barve. Preko te zveze nastane povezava z ozemljitvijo celotnega energetskega sistema. Velikokrat pa so ozemljeni tudi viri merilnih signalov. Tak primer lahko prikažemo z nadomestno vezavo na sliki 5-26.



Slika 5-26: Nadomestna vezava merjenja napetosti z elektronskim voltmetrom z ozemljenim vhodom.

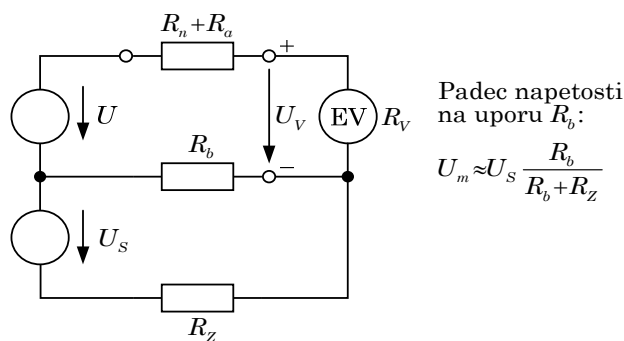
Dokler sta vir in merilni instrument blizu ($R_b = 0 \Omega$) ter ozemljena na isto ozemljilo, problema pri merjenju ni. Kadar pa so razdalje med njima večje in sta vezana na galvansko ločeni ozemljili, lahko merimo napačno.



Slika 5-27: Nadomestna vezava merjenja napetosti s krajevno ločenima ozemljiloma.

Med obema ozemljiloma je zemlja, ki ima ohmsko upornost R_Z . Ker pa v zemlji neprestano tečejo tokovi omrežne frekvence, tako imenovani blodeči tokovi i_Z , katerih izvor ni natančno določen (na primer električni vlaki), ki povzročajo padec napetosti U_S :

$$U_S = i_Z \cdot R_Z \quad (5-53)$$



Slika 5-28: Sofazna napetost v merilnem vezju.

Napetost U_S požene tok preko upornosti povezav R_a in R_b . Večina toka se sklene preko R_b , saj je zaradi velike upornosti merilnega instrumenta R_v tok preko R_a zelo majhen. Tok preko R_b povzroči motilni padec napetosti U_m . Voltmeter torej ne izmeri prave napetosti vira U , ampak za U_m večjo. Rešitev tega problema je instrument z neozemljenim (lebdečim) vhodom.

5.4 Digitalni merilni instrumenti

V digitalnih merilnih instrumentih AD-pretvorniki pretvorijo merjene analogne signale v digitalne, ki jih nato s pomočjo raznih logičnih krogov in števcov pretvorimo v numerični (številčni) podatek. Ta se prikaže na prikazovalniku ali zaslonu merilnega instrumenta. V primerjavi z analognimi imajo digitalni merilni instrumenti nekatere izrazite prednosti:

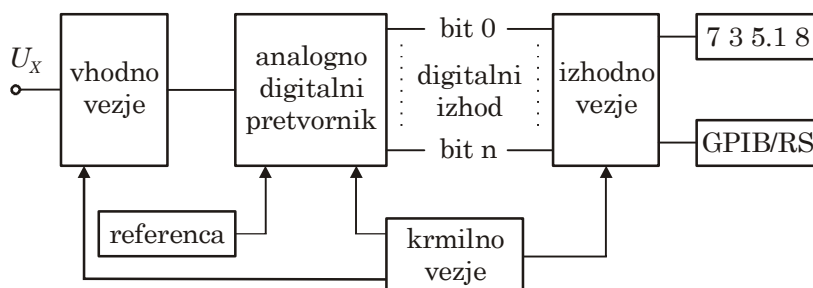
- veliko točnost,
- dobro ponovljivost,
- veliko občutljivost,
- visoko hitrost merjenj,
- enostavnejše in hitrejšo odčitavanje,
- enostavnejšo avtomatizacijo merjenj,
- enostavno obdelavo, prikaz in prenos merilnih rezultatov.

5.4.1 Digitalni voltmeter

Digitalni voltmetri (DVM) uporabljajo analogni digitalni (AD) pretvornik in kodirnik BCD (Binary Coded Decimal) za pretvorbo vhodne napetosti v številčni prikaz. Ker mora biti vhodni signal v AD-pretvornik v času trajanja pretvorbe konstanten, merjeno napetost z vhodnim vezjem predhodno pretvorimo v ekvivalentno enosmerno obliko, ki je sorazmerna srednji, efektivni ali temenski vrednosti.

Najbolj preprosti in poceni DVM s slabo ločljivostjo ($4\frac{1}{2}$ mestni) uporabljajo princip AD-pretvorbe napetosti v frekvenco u/f . Boljši in nekoliko dražji instrumenti imajo običajno AD-pretvornik z dvojnimi nagibom, ki je odporen na šum ter omogoča dobro ločljivost ($6\frac{1}{2}$ in večmestno). Takšen voltmeter lahko izmeri 15 do 30 meritev v sekundi. Kadar potrebujemo hitrejša merjenja (npr. pri velikem številu multipleksiranih kanalov), uporabimo DVM, ki ima AD-pretvornik s postopnim približevanjem.

Zaradi vse večjih potreb po avtomatizaciji merilnih postopkov imajo dražji instrumenti običajno vgrajen RS 232 vmesnik ali vodilo GPIB (General Purpose Interface Bus), novejši tudi USB ali ethernet.



Slika 5-29: Blokovna shema digitalnega voltmetra.

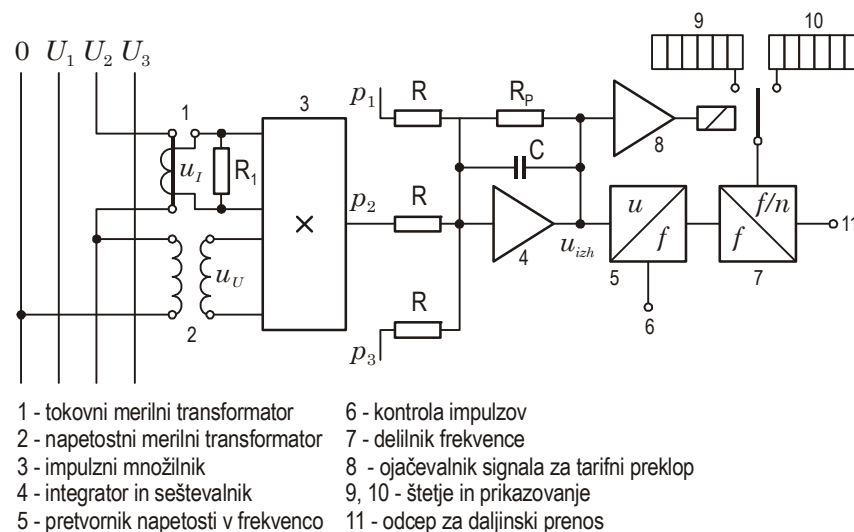
5.4.2 Digitalni števec električne energije

Indukcijski števeci električne energije zadostujejo zahtevam za merjenje energije v gospodinjstvih in so še vedno zelo številčni. V

energetskih sistemih in industriji pa jih praktično ne najdemo več. Pri veliki količini izmenjane energije so zahteve po veliki točnosti zelo poudarjene, razen tega pa je izkoriščena njihova primernost za avtomatizacijo merjenj in daljinski prenos merilnih podatkov. Ena od izvedb digitalnega števca električne energije v trifaznem sistemu predstavljamo na sliki 5-30. Vsaka faza ima svoj tokovni in napetostni merilni transformator, merilno informacijo o faznem toku in napetosti pa vodimo v impulzni množilnik ustrezne faze. Impulzni množilnik daje na izhodu pravokotne impulze določene frekvence, katerih amplituda je proporcionalna na primer napetosti, čas trajanja pa toku. V impulzu je zajet tudi vpliv $\cos\varphi$. Vse tri impulze vodimo v integrator in seštevalnik, ki da na izhodu analogno napetost u_{izh} , proporcionalno delovni moči trifaznega merjenca. To napetost v AD-pretvorniku pretvorimo v frekvenco f , ki je prav tako proporcionalna delovni moči. Iz praktičnih razlogov z delilnikom frekvence to frekvenco znižamo na f/n . Tudi ta reducirana frekvenca je proporcionalna delovni moči. Vodimo jo v del števca za štetje in prikazovanje impulzov. Štetje oziroma seštevanje impulzov je pravzaprav integriranje signala, ki je proporcionalen delovni moči, kar pomeni, da je prešteveto število impulzov v času merjenja proporcionalno delovni energiji, ki je stekla skozi števec v eni ali drugi smeri.

$$W = \int P dt = k_1 \int u_{izh} dt = k_2 \int f dt = k_3 \int f/n dt \quad (5-54)$$

Prešteveto število impulzov se dodatno preoblikuje tako, da neposredno odčitamo vrednost energije v Wh, kWh, MWh,...



Slika 5-30: Digitalni števec električne energije.

Različna smer pretoka energije povzroči različen predznak napetosti u_{izh} , ki jo ojačimo in z njo preklapimo stikalo na prvi (9) ali drugi (10) prikazovalnik. Tako je dana možnost različnega

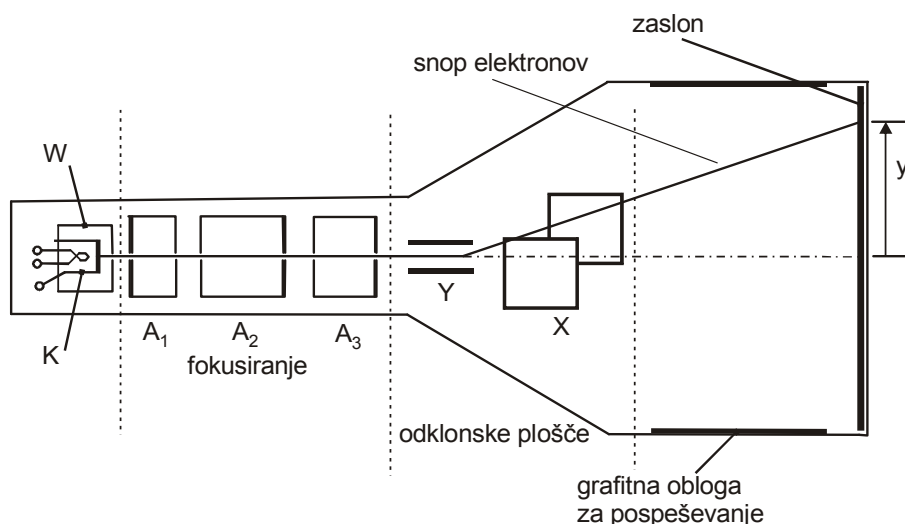
obračunavanja energije, ki jo porabnik prejema in energije, ki jo morda iz lastne proizvodnje oddaja.

Lastna poraba takih števcov je zelo majhna, okoli 0,1 VA, razred pa okoli 0,1 %. Za zanesljivo delovanje mora biti pomožno napajanje zagotovljeno iz posebnega vira.

5.5 Osciloskop

Osciloskop je v merilni tehniki ena od največ uporabljenih merilnih naprav. Pri običajnem osciloskopu je kazalec elektronski žarek, ki ima zelo majhno vztrajnost, zato lahko dobro sledi tudi hitrim spremembam merjenih veličin. Praktično lahko vzamemo, da osciloskop meri trenutne vrednosti. Njegova prednost je tudi ta, da omogoča opazovanje časovnih potekov periodičnih merjenih veličin, pa tudi aperiodičnih, vendar s spominskim osciloskopom. Posebne izvedbe osciloskopov omogočajo merjenje pri najvišjih frekvencah, v območju GHz.

Elektronski žarek dobimo in krmilimo v Braunovi elektronki, bistvenem delu osciloscopa.

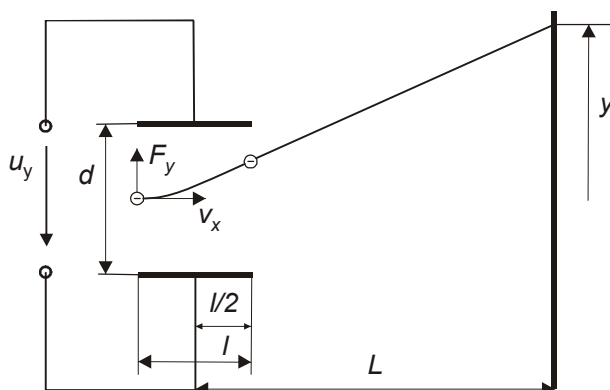


Slika 5-31: Braunova elektronka.

Iz segrevane katode K izstopajo elektroni, ki so zaradi potencialne razlike U_a (nekaj sto ali celo nekaj tisoč voltov) med katodo in cilindrično oblikovanimi anodami A_1 , A_2 , A_3 fokusirani in pospešeni proti fluorescentnemu zaslonu. Takoj za katodo je pred anodami še ena elektroda, Wehneltov cilindrični pokrov W, ki služi delno za fokusiranje, pa tudi za zapiranje toka elektronov proti zaslonu, kadar je na njem nižji potencial kot na katodi.

Za anodo sta dva para odklonskih plošč (Y, X), ki s svojima električnima poljema odklanjata elektronski žarek, eden vertikalno in drugi horizontalno. Pred zaslonom je še zadnja elektroda, grafita obloga na najvišjem potencialu, ki dodatno pospeši elektrone na njihovi poti proti zaslonu.

Poglejmo, kaj se dogaja z elektronom na njegovi poti proti zaslonu potem, ko z določeno hitrostjo prileti iz področja anod.



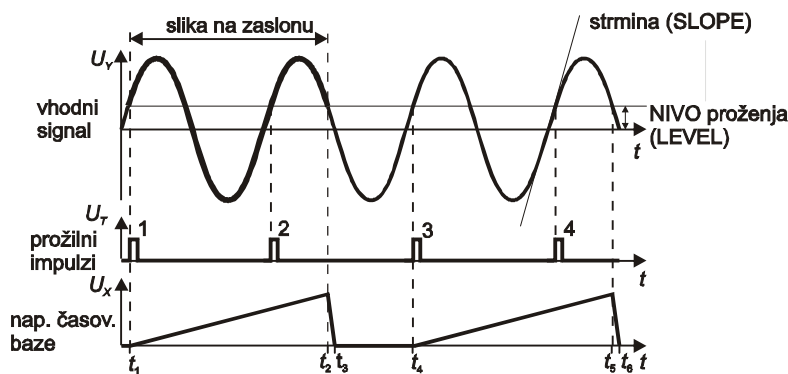
Slika 5-32: Prikaz y -odklona do zaslona.

Vzemimo, da prileti elektron v električno polje med ploščama za vertikalno odklanjanje, ki ga povzroča priključena merjena oziroma opazovana napetost u_y . Nanj deluje sila, ki spreminja njegovo smer leta, dokler se nahaja v tem polju. Ko elektron zapusti območje polja, nadaljuje pot v spremenjeni smeri proti zaslonu. V območju vpliva grafitne obloge je elektron dodatno pospešen v smeri leta in pridobi kinetično energijo. Zato se ob trku v zaslon sprosti več energije, kar pomeni tudi svetlejšo sled oziroma sliko na zaslonu. Če je napetost na odklonskih ploščah nič, dobimo sliko na zaslonu na nekem določenem mestu, če pa je priključena napetost u_y , je nova slika za neko razdaljo y oddaljena od prejšnjega izhodišča. To je tudi merilo za določitev vrednosti napetosti u_y . Pomemben podatek za Braunovo elektronko je njena občutljivost. Za y -odklonski sistem je to:

$$o_y = \frac{y}{u_y} = \frac{l \cdot L}{2dU_a} \quad (\text{mm/V}) \quad (5-55)$$

in znaša okoli 1 do 2 mm/V. V enačbi (5-55) je U_a napetost anode, geometrijski parametri pa so prikazani na sliki 5-32. Na enak način lahko opazujemo tudi dogajanje v smeri x .

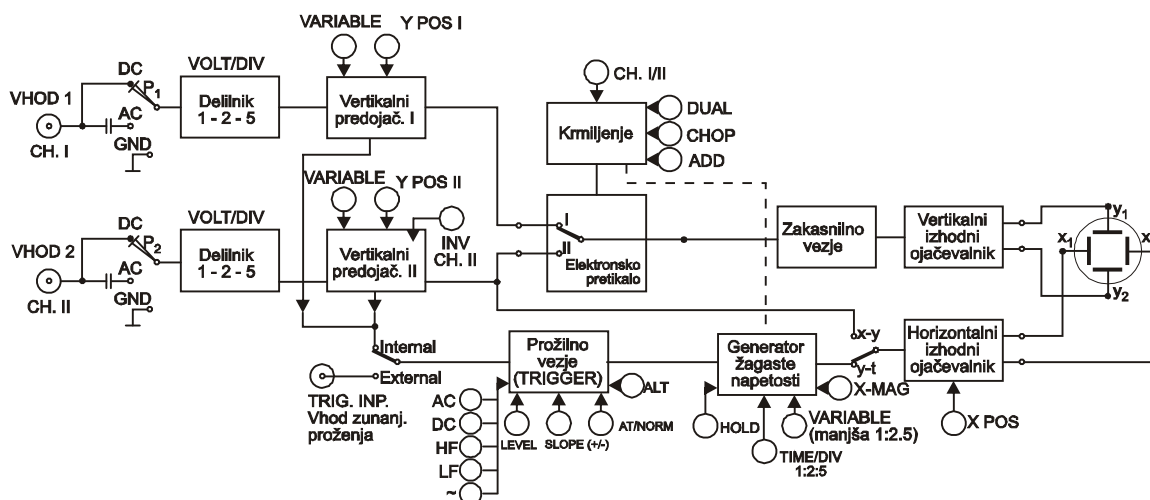
Kadar pa želimo opazovati časovni potek napetosti, ki jo priključimo na y -odklonski plošči, priključimo na x -odklonski plošči napetost, ki enakomerno, tako kot teče čas, premika elektronski žarek po zaslonu v smeri x od leve strani opazovanja proti desni. Ker ima zaslon končno dolžino, se mora žarek vrniti v izhodišče in svojo pot začeti znova. Napetost, ki omogoči tako gibanje, enakomerno narašča od vrednosti nič in pri neki določeni vrednosti pade na izhodiščno vrednost; idealno bi bilo v trenutku. Taki obliki napetosti pravimo žagasta napetost in jo dobimo v sistemu, ki je del osciloskopa, tako imenovani časovni bazi. Ta način delovanja osciloskopa imenujemo y - t delovanje.



Slika 5-33: Potek u_y in u_x , z označenim proženjem.

Vsekakor je treba za ustrezno sliko na zaslonu izpolniti več pogojev, da lahko razberemo vse karakteristike merjenega signala. Nastavljena mora biti prava velikost slike na zaslonu, izbrana mora biti ustrezna frekvenca žagaste napetosti, izvedeno mora biti proženje v x -smeri, kar pomeni, da sprožimo tek žarka v x -smeri šele takrat, ko merjena napetost u_y doseže določen prožilni nivo.

Osciloskop je naprava, ki vsebuje razen Braunove elektronke še vse sklope, ki so potrebni, da so ti pogoji izpolnjeni. Na sliki 5-34 predstavljamo dvokanalni osciloskop, s katerim se v praksi pogosto srečujemo in ki omogoča tudi istočasno opazovanje dveh merjenih napetosti.

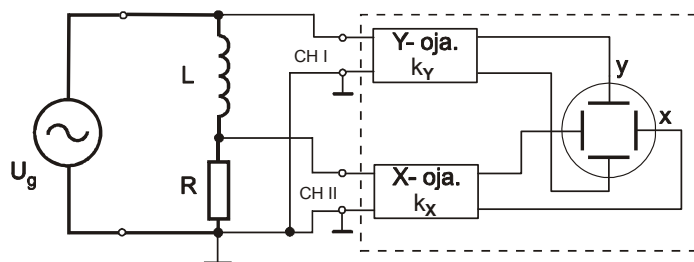


Slika 5-34: Dvokanalni osciloskop.

Kako pride do tvorbe dveh slik na zaslonu ob tem, da ima Braunova elektronka le en y -odklonski sistem? To je omogočeno z izmeničnim načinom delovanja, ko se nariše ena perioda prve opazovane napetosti u_{y1} , za njo pa po preklopu ena perioda druge opazovane napetosti u_{y2} . Nato se dogajanje ponavlja. Ob dovolj visoki frekvenci napetosti se sliki obnavljata, še preden njuna sled izgine z zaslona, ki ima neko določeno vztrajnost. Tako dobimo občutek trajne prisotnosti signala. Pri nizkih frekvencah pa pride do utripanja slike in težav pri odčitavanju podatkov. Takrat je

primerno odsekovno (choppersko) delovanje, ko se izmenično tvori slika prvega in drugega signala po delih, odsekih. Ob dovolj visoki frekvenci preklapljanja dobimo zadovoljivo rešitev tudi v tem primeru.

Osciloskop pa razen opazovanja časovnih potekov tudi omogoča, da na oba odklonska sistema pripeljemo zunanja signala. V tem primeru imamo tako imenovano x - y delovanje, pri katerem slika na zaslonu ponazarja medsebojno odvisnost dveh veličin. Na tak način lahko osciloskop uporabimo za določanje U - I karakteristik različnih elementov (na primer uporov, diod), magnetilnih karakteristik feromagnetnih materialov (na primer histerezne zanke) in še za vrsto drugih merenj.



Slika 5-35: Prikaz uporabe x - y delovanja osciloskopa.

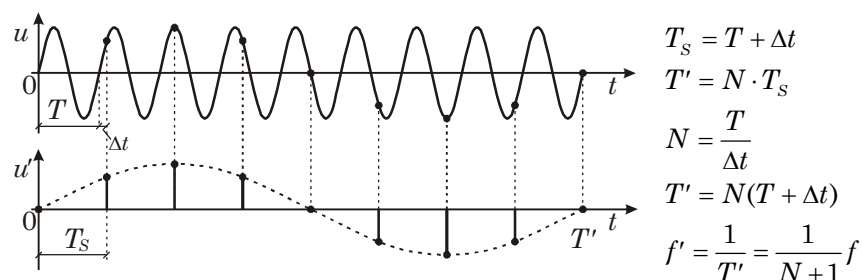
5.5.1 Posebne izvedbe osciloskopov

Vzorčevalni osciloskop

Z običajnimi analognimi osciloskopi lahko uspešno merimo le do frekvenc okoli 500 MHz. Za višje frekvence se uporablja tehnika jemanja vzorcev, iz katerih se na zaslonu osciloskopa tvori rekonstruirana slika opazovanega signala. Princip je ta, da se v vsaki periodi opazovanega signala odvzame po en vzorec, ki ustreza njegovi trenutni vrednosti. Perioda jemanja vzorcev T_s je za določen interval Δt večja od periode T opazovanega signala:

$$T_s = T + \Delta t. \quad (5-56)$$

Z manjšanjem Δt dobimo boljšo kakovost rekonstruiranega signala, postopek pa traja dalj časa.



Slika 5-36: Princip vzorčenja periodičnega signala.

Za tvorbo ene periode rekonstruirane slike, ki jo dobimo na zaslonu, potrebujemo N vzorcev.

$$N = \frac{T}{\Delta t}. \quad (5-57)$$

Zato je njena perioda

$$T' = N \cdot T_s = N \cdot (T + \Delta t), \quad (5-58)$$

frekvenca signala na zaslonu pa

$$f' = \frac{1}{T'} = \frac{1}{N+1} f. \quad (5-59)$$

Slika na zaslonu osciloskopa ustrezno predstavlja amplitudne lastnosti opazovanega signala, ne pa frekvenčnih. Frekvenca je namreč transformirana. Če je N zelo velik, je frekvenca f' približno N -krat manjša. Seveda je tako vzorčenje mogoče uporabiti le takrat, ko je opazovani signal periodičen.

Vzorčevalni osciloskopi lahko merijo tudi do frekvenc okoli 20 GHz.

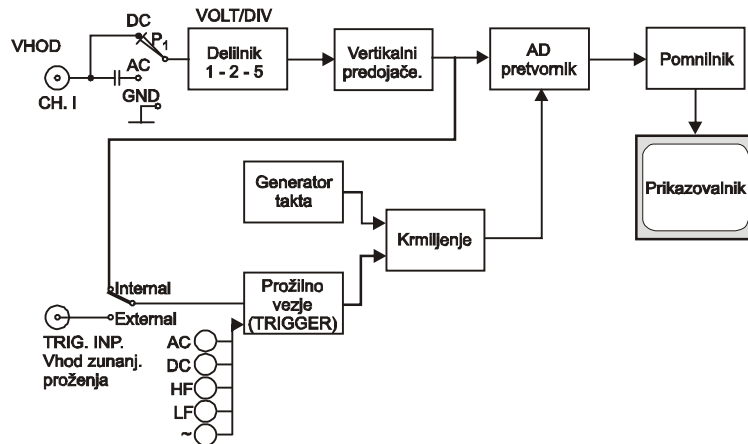
Digitalni osciloskop

Analogni osciloskopi omogočajo opazovanje periodičnih signalov na zaslonu katodne cevi. Pri neperiodičnih signalih, ki se ne ponavljajo, pa želimo sliko prehodnega pojava ohraniti na zaslonu dlje časa. Pojavi se potreba po shranitvi slike prehodnega pojava. Pri analognih osciloskopih so problem shranitve slike reševali na dva načina:

1. z bistabilnim premazom zaslona katodne cevi, ki ima lastnost, da zadrži svetlobni žarek dlje časa na zaslonu (persistenca) in
2. z dodatnim osvetljevanjem zaslona katodne cevi, kjer enakomerno osvetljujemo celoten zaslon, vendar z majhno kinetično energijo, ki zadošča le za osvetljevanje prej vzbujenih območij zaslona.

Konec osemdesetih let prejšnjega stoletja so se na tržišču uveljavili *digitalni osciloskopi*. Razlog temu je razvoj AD pretvornikov, ki predstavljajo osnovo digitalne obdelave signalov.

Slika 5-37 prikazuje blokovno shemo digitalnega osciloskopa.



Slika 5-37: Blokovna shema digitalnega osciloskopa.

Vhodni del digitalnega osciloskopa se veliko ne razlikuje od analognega. Izmenično - enosmernemu preklopniku sledi napetostni delilnik in vertikalni predojačevalnik, ki napetost ojači v merilno območje analogno digitalnega (AD) pretvornika. Digitalni osciloskop uporablja "krožni pomnilnik", v katerega se shranjujejo otipane vrednosti od trenutka proženja naprej. Po določenem času (ki je nastavljen z zadrževalnim števcem) vsebino pomnilnika prikažemo na zaslonu.

Prikazovanje signala na zaslonu je lahko izvedeno na dva načina:

- z digitalno analogni (DA) pretvorbo in katodno cevjo kot pri analognih osciloskopih in
- z rastrskimi zasloni, kakršne imamo v računalniški tehnologiji.

Digitalni osciloskop omogoča shranjevanje in enostavno obdelavo merilnega signala, ki je časovno in amplitudno diskretiziran. Zaradi tega omogočajo digitalni osciloskopi še dodatne možnosti obdelave signala, kot so:

- izračun mejnih (*peak to peak*), efektivnih in srednjih vrednosti,
- izračun periode in frekvence signala,
- izračun mrtvega časa in časa vzpona prehodne funkcije in druge možnosti.

Tipanje signala pri AD-pretvorbi

Pri uporabi digitalnega osciloskopa moramo biti pozorni na *frekvenco tipanja* f_s . Za pravilno rekonstrukcijo otipanega signala mora biti izpolnjen Shannonov teorem tipanja, ki zahteva, da je frekvenca tipanja vsaj dvakrat večja od največje frekvence otipanega signala:

$$f_{\max} < \frac{f_s}{2} = \frac{1}{2 \cdot T_s}, \quad (5-60)$$

kjer je T_s perioda tipanja. Če ta teorem ni izpolnjen, se pojavi prekrivanje frekvenčnih pasov ali tako imenovan Aliasing pojav, ki med drugim povzroči frekvenčno preslikovanje iz visokih frekvenc v nizkofrekvenčno območje. To pa pomeni napačno časovno predstavitev otipanega signala. Problem je v tem, da napaka ni neposredno opazna. Zato imajo nekateri osciloskopi

antialiasing filtre na vходу osciloskopa. To so v bistvu nizkoprepustni filtri z veliko strmino (>40 dB/dekado), ki frekvenčno omejijo vhodni signal na frekvenco manjšo od $f_s/2$.

Prikazovanje signalov

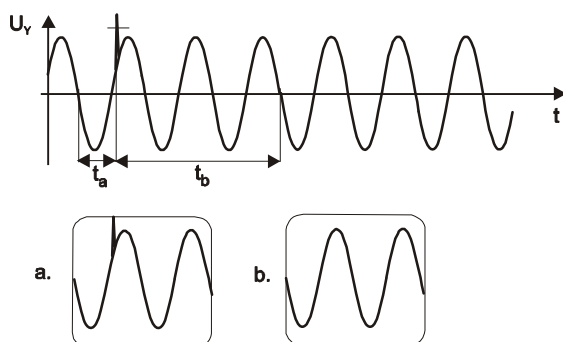
Otipani signali se pri digitalnem osciloskopu shranijo v krožni pomnilnik. Poznamo tri načine prikazovanja signala na zaslonu digitalnega osciloskopa:

- **ponovljiv izris** (*refresh mode*), kjer se novo shranjevanje v krožni pomnilnik začne takoj po prenosu podatkov v zaslonski pomnilnik in se signal izriše po koncu prenosa;
- **enojni izris** (*single shot*), kjer se signal po tipanju prenese v zaslonski pomnilnik in se novo tipanje ne začne ter slika ostane na zaslonu poljubno dolgo;
- **sprotni izris**, ki je primeren za opazovanje počasnih pojavov in se otipane vrednosti signala na zaslon izrisujejo med tipanjem.

Proženje osciloskopa

Proženje osciloskopa je neodvisno od načina prikazovanja signala na zaslonu. Ker je signal v krožnem pomnilniku, lahko na zaslonu prikažemo del signala, otipanega pred proženjem. Torej lahko nastavimo predproženje (*pretrigger*) ali zakasnjeno proženje (*posttrigger*).

Slika 5-38 prikazuje različni proženji osciloskopa.



Slika 5-38: Predproženje (a) in zakasnjeno proženje (b).

Način izrisa signala

V pomnilniku osciloskopa so shranjene digitalno zapisane vrednosti odtipanega signala. Na zaslonu pomnilnika lahko izrišemo le te točke, torej signal *v točkovni predstavitvi*. Ta predstavitev ni najboljša, saj se pri gosti porazdelitvi točk na zaslonu izgubi informacija o obliki in zveznosti merjenega signala. Ugodnejšo sliko predstavlja interpoliran signal skozi odtipane točke. Pogosto lahko izbiramo med *linearno interpolacijo* in *sinusno interpolacijo* ($\sin x/x$). Prva je enostavnejša, točke so povezane med seboj s premicami, vendar zahteva za predstavitev signala sinusne oblike najmanj 10 točk na periodo. Pri sinusni interpolaciji je za predstavitev dovolj 2,5 - 2,7 točk na periodo.

5.5.2 Uporaba osciloskopa

Osciloskop je merilnik trenutne napetosti. Uporabljamo ga za merjenje in opazovanje *oblike napetosti* ali drugih električnih in neelektričnih veličin s posrednim merjenjem. Merimo lahko *enosmerne* in *izmenične* veličine. Iz časovnega poteka signala lahko merimo *frekvenco* in *periodo* izmeničnih signalov, kakor tudi druge karakteristične čase, kot so *mrtvi čas*, *čas vzpona* signala in druge.

V *x-y* delovanju uporabljamo osciloskop za opazovanje medsebojnih odvisnosti dveh signalov. Na ta način lahko merimo *karakteristike* elementov, kot so *U-I karakteristika diode*, *karakteristika tranzistorja*, *histerezna zanka feromagnetnega materiala* pri magnetenju z izmeničnim tokom, *izgubni kot kondenzatorja* in podobne meritve. Uporabnost osciloskopa je zelo velika in zato predstavlja enega od osnovnih in nepogrešljivih merilnih instrumentov.

6. MOSTIČNA IN KOMPENZACIJSKA VEZJA

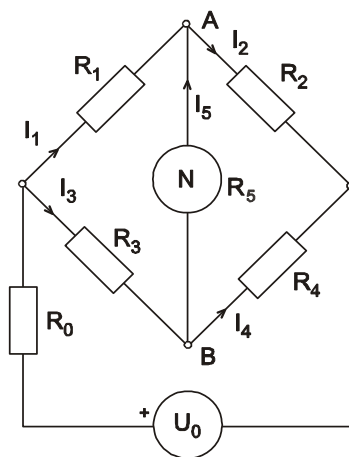
6.1 Merilni mostiči

Merilni mostiči so merilna vezja, sestavljena iz različnih elementov (uporov, kondenzatorjev, tuljav,...), s katerimi posredno merimo celo vrsto električnih in neelektričnih veličin. Princip merjenja je zasnovan na primerjavi neznane veličine z znano. S kakovostnimi elementi in dobro izvedenim merilnim postopkom lahko dosežemo visoke točnosti, tudi višje kot z nekaterimi vrstami merilnih instrumentov. Prav tako lahko s primernimi elementi in sestavljanjem mostičnih vezij merimo v območjih, ki jih z razpoložljivimi merilnimi instrumenti ne dosežemo. Uporaba merilnih mostičev je razširjena, najdemo jih praktično v vseh vejah elektrotehnike in izven nje.

Merilne mostiče delimo glede na napajalno napetost v dve vrsti: enosmerne in izmenične merilne mostiče. Enosmerni se uporabljajo za merjenje ohmske upornosti in veličin, ki se dajo izraziti s pomočjo ohmskih upornosti (temperature, tlaka, premika, upogiba...), izmenični pa za merjenje vrste veličin: induktivnosti, kapacitivnosti, kakovosti kondenzatorjev in tuljav, frekvence, medsebojne induktivnosti itd.

6.1.1 Wheatstonov mostič

Wheatstonov mostič je vezava štirih v zanko povezanih uporov, na katero je v eno diagonalo priključena napajalna (enosmerna) napetost U_0 , v drugo pa ničelni indikator N , slika 6-1.



Slika 6-1: Vezje enosmernega Wheatstonovega mostiča.

V stanju ravnovesja čez ničelni indikator ne teče noben tok, $I_5 = 0$ in velja

$$\begin{aligned} I_1 R_1 &= I_3 R_3 \\ I_2 R_2 &= I_4 R_4 \end{aligned} \quad (6-1)$$

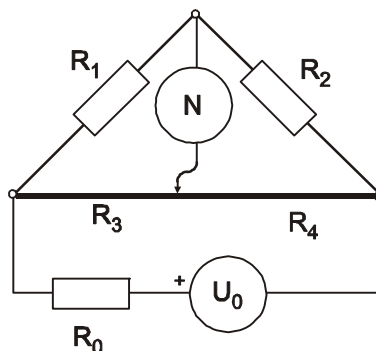
Ker je $I_1 = I_2$ in $I_3 = I_4$, dobimo iz obeh enačb ravnovesno enačbo mostiča

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \text{ ali v drugi obliki } R_1 R_4 = R_2 R_3. \quad (6-2)$$

Iz treh znanih upornosti lahko izračunamo četrto, neznano. Vzemimo, da je to R_1 :

$$R_1 = R_2 \frac{R_3}{R_4}. \quad (6-3)$$

Iz te enačbe sledita dve osnovni izvedbi Wheatstonovih mostičev za merjenje upornosti: točnejša, pri katerih je razmerje R_3/R_4 stalno, ravnovesje pa se doseže s spreminjanjem vrednosti dekadnega upora R_2 in manj točna (pogonska) izvedba, pri kateri je stalna vrednost upora R_2 , ravnovesje pa se doseže s spreminjanjem razmerja R_3/R_4 ; če pa je namesto uporov R_3 in R_4 uporabljena kalibrirana uporovna žica, je razmerje R_3/R_4 odvisno od lege drsnika na njej, glej sliko 6-2.



Slika 6-2: Mostič s kalibrirano žico.

Odklonski Wheatstonov mostič

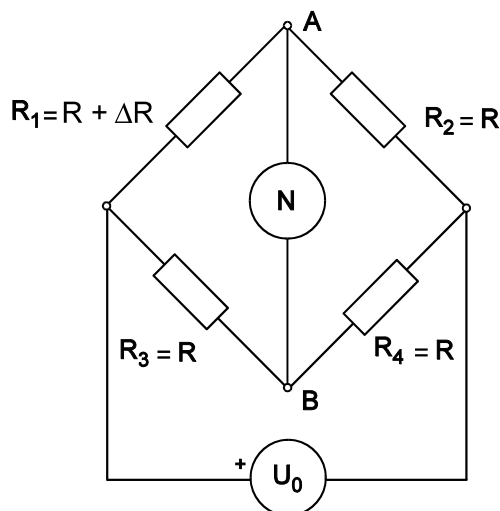
Odklonskih merilnih mostičev ne uravnovešamo, kazanje indikatorja N je sorazmerno merjeni veličini. Te mostiče uporabljamo za zvezno merjenje spremenljivih uporov, na primer uporovnih lističev, uporovnih termometrov itd. Zelo pogosto jih uporabljamo pri merjenju neelektričnih veličin.

Poznamo naslednje izvedbe odklonskih mostičev:

- **četrtnski**, pri katerem se spreminja upornost le ene veje,
- **dvočetrtnski**, pri katerem se spreminjata upornosti dveh nasproti ležečih vej v istem smislu (npr. R_1 in R_4),

- **polovični**, pri katerem se spreminjata upornosti dveh sosednjih vej tako, da je njuna vsota konstantna (npr. R_1 in R_2) in
- **polni**, pri katerem se dve upornosti (npr. R_1 in R_4) povečata natanko za toliko, za kolikor se ostali dve zmanjšata.

Primer četrtninskega mostiča je na sliki 6-3.



Slika 6-3: Četrtninski odklonski Wheatstonov mostič.

Instrument N je v tem primeru voltmeter z veliko upornostjo, zato je napetost med točkama A in B :

$$U_V = U_B - U_A = U_0 \frac{R_4}{R_3 + R_4} - U_0 \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \quad (6-4)$$

Izraz uredimo:

$$U_V = U_0 \cdot \frac{R_1 \cdot R_4 - R_2 \cdot R_3}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)}. \quad (6-5)$$

V začetku so vse štiri upornosti enake R . Po spremembi upornosti $R_1 = R + \Delta R$ je napetost:

$$U_V = U_0 \cdot \frac{(R + \Delta R) \cdot R - R^2}{(2 \cdot R + \Delta R) \cdot 2 \cdot R} \quad (6-6)$$

in

$$U_V = \frac{1}{4} \cdot U_0 \cdot \frac{\frac{\Delta R}{R}}{1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta R}{R}}. \quad (6-7)$$

Če je relativna sprememba upornosti majhna, lahko izraz še poenostavimo:

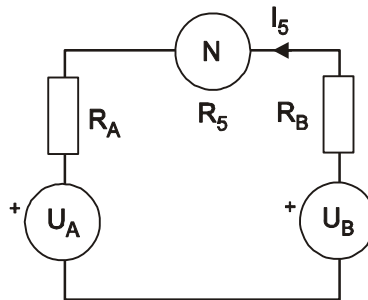
$$U_V \approx \frac{1}{4} \cdot U_0 \cdot \frac{\Delta R}{R} \quad \text{pri} \quad \frac{\Delta R}{R} \ll 1 \quad (6-8)$$

Pomemben vpliv na pogrešek merjenja ima voltmeter, zato ga moramo skrbno izbrati.

Občutljivost in meja pogreška mostiča

Občutljivost mostiča je njegova zelo pomembna lastnost, saj je od nje odvisno, koliko najmanjšo relativno spremembo merjene upornosti še zaznamo. Z njo je določena meja pogreška mostiča.

Za določitev občutljivosti in meja pogreška moramo izračunati najprej tok I_5 ničelnega indikatorja. Poenostavimo podano vezje Wheatstonovega mostiča tako, da upoštevamo idealni napetostni napajalni vir ($R_0 = 0$). Nadomestno vezje je v tem primeru:



Slika 6-4: Nadomestno vezje enosmernega mostiča.

$$U_A = U_0 \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad \text{in} \quad U_B = U_0 \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad (6-9)$$

$$R_A = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad \text{in} \quad R_B = \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}$$

Tok I_5 preko ničelnega indikatorja z upornostjo R_5 je

$$I_5 = \frac{U_B - U_A}{R_A + R_B + R_5}, \quad \text{iz česar sledi}$$

$$I_5 = U_0 \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_1 R_2 (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + R_2) + R_5 (R_1 + R_2) (R_3 + R_4)} \quad (6-10)$$

Praktično vedno opazujemo le razmere okoli ravnovesne lege, kjer

$$\text{je } I_5 = 0 \quad \text{in} \quad R_1 = R_{10} = \frac{R_2 R_3}{R_4}.$$

Občutljivost mostiča je definirana z

$$o = \left(\frac{dI_5}{dR_1} \right)_{R_1=R_{10}} \quad \text{in dobimo}$$

$$0 = \frac{U_0 R_4}{R_{10} R_2 (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_{10} + R_2) + R_5 (R_{10} + R_2) (R_3 + R_4)}. \quad (6-11)$$

Zamenjajmo infinitezimalne spremembe s končnimi in upoštevajmo $R_{10} = \frac{R_2 R_3}{R_4}$. Dobimo obliko:

$$\frac{\Delta I_5}{\Delta R_1} = \frac{U_0}{R_{10} \cdot \left(R_{10} + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 \cdot \left(\frac{R_{10}}{R_2} + 2 + \frac{R_2}{R_{10}} \right) \right)}. \quad (6-12)$$

Iz te enačbe določimo relativno spremembo upornosti $\frac{\Delta R_1}{R_{10}}$, ki spremeni tok ničelnega indikatorja za ΔI_5

$$\frac{\Delta R_1}{R_{10}} = \frac{\Delta I_5}{U_0} \left(R_{10} + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 \left(\frac{R_{10}}{R_2} + 2 + \frac{R_2}{R_{10}} \right) \right). \quad (6-13)$$

Namesto ΔI_5 vzemimo najmanjši tok $\pm I_{5\min}$, ki ga še opazimo na ničelnem indikatorju. Sedaj je (relativna) meja pogreška mostiča

$$\begin{aligned} e_{\min} &= \left(\frac{\Delta R_1}{R_{10}} \right)_{\min} = \\ &= \pm \frac{I_{5\min}}{U_0} \left(R_{10} + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 \left(\frac{R_{10}}{R_2} + 2 + \frac{R_2}{R_{10}} \right) \right). \end{aligned} \quad (6-14)$$

Izrazimo še upornosti v mostiču kot mnogokratnike merjene upornosti:

$$R_2 = m \cdot R_{10}, \quad R_3 = n \cdot R_{10}, \quad R_4 = m \cdot n \cdot R_{10} \quad \text{in} \quad R_5 = q \cdot R_{10}. \quad (6-15)$$

Sedaj je meja pogreška mostiča

$$e_{\min} = \pm \frac{I_{5\min}}{U_0} R_{10} \left(1 + m + n + mn + q \left(\frac{1}{m} + 2 + m \right) \right). \quad (6-16)$$

Meja pogreška mostiča je odvisna tudi od merjene upornosti, zato je potrebno glede na njeno vrednost izbrati ostale elemente mostiča.

Z Wheatstonovim mostičem merimo v območju od 0,1 Ω do 10 M Ω , v praksi pa velikokrat postavimo spodnjo mejo na vrednost 1 Ω . Spodnja meja je omejena z vplivi upornosti povezav med elementi mostiča, zgornja meja pa z občutljivostjo ničelnih indikatorjev.

Dimenzioniranje elementov mostiča

V merilni praksi je običajno tako, da pri reševanju merilnega problema izhajamo iz obstoječega stanja, katero je določeno z opremo, ki je na razpolago. Optimalno izberemo tisto, kar še

lahko. Tudi pri sestavljanju merilnih mostičev je tako. Imamo lahko na primer:

- podano napetost napajalnega vira,
- podan ničelni indikator (R_5)
- omejeno obremenitev napajalnega vira (skupni tok)
- omejeno obremenitev elementov v vejah mostiča in drugo.

Tako pride do različnih kombinacij začetnih pogojev. Za najbolj značilne kombinacije so bile izračunane priporočene vrednosti parametrov mostiča m , n in q , ki zagotavljajo optimalno občutljivost oziroma točnost merilnega vezja v danih razmerah. Z njimi izračunamo vrednosti ostalih elementov, ki jih še lahko izbiramo. Navajamo jih v tabeli 6-1.

Tabela 6-1: Parametri mostiča za različne kombinacije začetnih pogojev.

št.	dano	m	n	q
1	R_1, U_0, q	$\sqrt{\frac{q}{1+n+q}}$	$\approx 0,01$	q
2	R_1, I, q	≈ 100	$\sqrt{1+q\left(1+\frac{1}{m}\right)}$	q
3	R_1, I_1, q	≈ 100	$\approx 0,01$	q
4	R_1, P, q	$\frac{q + \sqrt{9q^2 + 8q(1+n)}}{2(1+n+q)}$	$-\frac{1}{4} + \sqrt{\frac{9}{16} + \frac{1}{2}q\left(1+\frac{1}{m}\right)}$	q
5	R_1, U_0, P_N	0,5	$\approx 0,01$	0,336
6	R_1, I, P_N	≈ 100	2	2,97
7	R_1, I_1, P_N	≈ 100	$\approx 0,01$	1
8	R_1, P, P_N	1	1	1

Pri tem pomenijo:

- R_1 - merjena upornost,
- U_0 - napajalna napetost mostiča,
- I - tok mostiča,
- I_1 - tok skozi R_1 in R_2 ,
- P - porabljena moč na mostiču in
- P_N - potrebna moč za odklon enega delca na ničelnem indikatorju.

Upornost R_5 in R_1 določita faktor q :

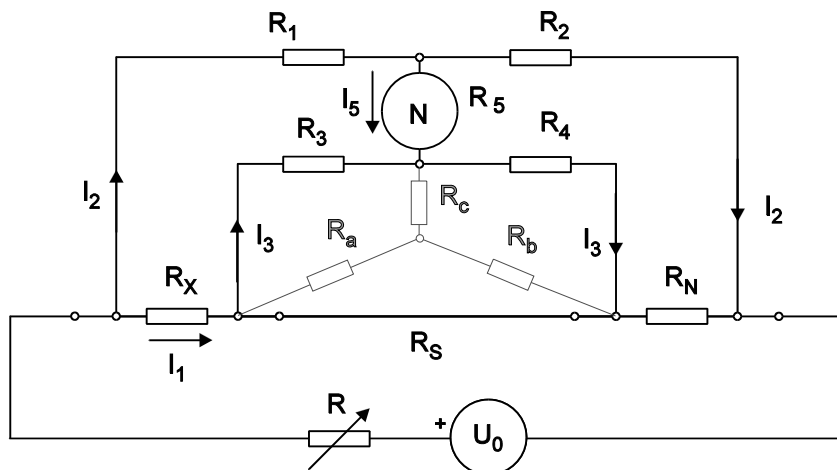
$$q = \frac{R_5}{R_1} \quad (6-17)$$

Preostale upornosti so:

$$\begin{aligned} R_2 &= mR_1 \\ R_3 &= nR_1 \\ R_4 &= mnR_1 \end{aligned} \quad (6-18)$$

6.1.2 Thomsonov mostič

Thomsonov (Kelvinov) mostič uporabljamo za merjenje upornosti od $0,1 \mu\Omega$ do 1Ω . Slika 6-5 prikazuje vezavo Thomsonovega mostiča.



Slika 6-5: Vezje Thomsonovega mostiča.

V ravnovesju $I_5 = 0$ veljajo naslednje enačbe:

$$\begin{aligned} I_2 R_1 &= I_1 R_x + I_3 R_3 \\ I_2 R_2 &= I_1 R_N + I_3 R_4 \\ I_3 &= I_1 \frac{R_s}{R_3 + R_4 + R_s} \end{aligned} \quad (6-19)$$

Iz teh enačb sledi:

$$R_x = R_N \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_4 R_s}{R_3 + R_4 + R_s} \left(\frac{R_1}{R_2} - \frac{R_3}{R_4} \right). \quad (6-20)$$

Če dosežemo enakost razmerij:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad (6-21)$$

iz enačbe za R_x izpade člen, ki predstavlja motečo upornost povezave R_s in je

$$R_x = R_N \frac{R_1}{R_2}. \quad (6-22)$$

Tudi Thomsonov mostič mora biti dovolj občutljiv, s čimer se doseže zadovoljivo nizko mejo pogreška. Za določitev meje pogreška najprej transformiramo trikotnik uporov R_3 , R_4 in R_s v zvezdo in dobimo tako Wheatstonov mostič ter izračunamo mejo pogreška enako, kot je že bilo podano.

Za zvezdo uporov dobimo

$$R_a = \frac{R_3 R_S}{R_3 + R_4 + R_S} \quad R_b = \frac{R_4 R_S}{R_3 + R_4 + R_S} \quad R_c = \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4 + R_S}. \quad (6-23)$$

Meja pogreška je

$$e_m = \pm \frac{I_{5\min}}{U} \left(R_X + R_a + R_b + R_N + R_1 + R_2 + (R_c + R_5) \left(\frac{R_1}{R_2} + 2 + \frac{R_2}{R_1} \right) \right) \quad (6-24)$$

R_X , R_a , R_b in R_N lahko zaradi majhnih vrednosti glede na R_1 in R_2 zanemarimo in dobimo

$$e_m = \pm \frac{I_{5\min}}{U} (R_1 + R_2) \cdot \left(1 + (R_c + R_5) \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \right). \quad (6-25)$$

V praktičnih izvedbah je praviloma $R_1 = R_3$ in $R_2 = R_4$, zato je:

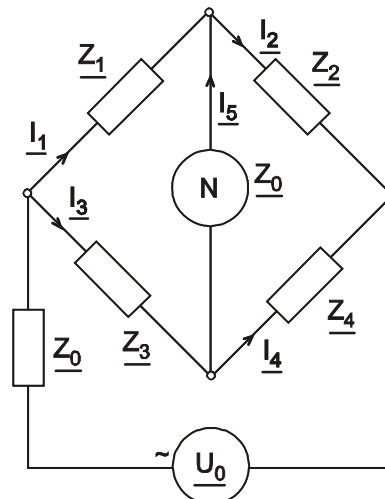
$$e_m = \pm \frac{I_{5\min}}{U} (R_1 + R_2) \cdot \left(2 + R_5 \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \right). \quad (6-26)$$

Vzamemo lahko še, da je $U \approx I(R_X + R_N)$ in dobimo

$$e_m = \pm \frac{I_{5\min}}{I(R_X + R_N)} (R_1 + R_2) \cdot \left(2 + R_5 \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \right). \quad (6-27)$$

6.1.3 Izmenični merilni mostiči

Pri izmeničnih merilnih mostičih največkrat uporabljamo že znano vezje Wheatstonovega mostiča, napajanega iz izmeničnega sinusnega vira, sestavljenega iz štirih impedanc, vezanih v zanko. Ničelni indikator mora biti občutljiv instrument za merjenje izmeničnih veličin. Vezje prikazuje slika 6-6.



Slika 6-6: Vezje izmeničnega mostiča.

V ravnovesju ($\underline{I}_5 = 0$) mostiča velja

$$\begin{aligned}\frac{\underline{I}_1 \underline{Z}_1}{\underline{I}_2 \underline{Z}_2} - \frac{\underline{I}_3 \underline{Z}_3}{\underline{I}_4 \underline{Z}_4} &= 0 & \underline{I}_1 &= \underline{I}_2 \\ \underline{I}_2 \underline{Z}_2 - \underline{I}_4 \underline{Z}_4 &= 0 & \underline{I}_3 &= \underline{I}_4\end{aligned}\quad (6-28)$$

in sledi

$$\frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_2} = \frac{\underline{Z}_3}{\underline{Z}_4} \quad \text{ali} \quad \underline{Z}_1 \underline{Z}_4 = \underline{Z}_2 \underline{Z}_3. \quad (6-29)$$

Če izrazimo impedance z realnimi in imaginarnimi komponentami, dobimo

$$(\underline{R}_1 + j\underline{X}_1) \cdot (\underline{R}_4 + j\underline{X}_4) = (\underline{R}_2 + j\underline{X}_2) \cdot (\underline{R}_3 + j\underline{X}_3), \quad (6-30)$$

iz česar sledita dva pogoja za ravnovesje:

$$\begin{aligned}\underline{R}_1 \underline{R}_4 - \underline{X}_1 \underline{X}_4 &= \underline{R}_2 \underline{R}_3 - \underline{X}_2 \underline{X}_3 \text{ in} \\ \underline{R}_1 \underline{X}_4 + \underline{R}_4 \underline{X}_1 &= \underline{R}_2 \underline{X}_3 + \underline{R}_3 \underline{X}_2.\end{aligned}\quad (6-31)$$

Če pa impedance izrazimo v eksponentni obliki, je ravnovesna enačba:

$$\underline{Z}_1 \cdot e^{j\varphi_1} \cdot \underline{Z}_4 \cdot e^{j\varphi_4} = \underline{Z}_2 \cdot e^{j\varphi_2} \cdot \underline{Z}_3 \cdot e^{j\varphi_3}, \quad (6-32)$$

iz katere prav tako sledita dva pogoja za ravnovesje

$$\begin{aligned}\underline{Z}_1 \underline{Z}_4 &= \underline{Z}_2 \underline{Z}_3 \text{ in} \\ \varphi_1 + \varphi_4 &= \varphi_2 + \varphi_3.\end{aligned}\quad (6-33)$$

V izmeničnih merilnih mostičih je za nastavitev ravnovesja nujno imeti dva spremenljiva elementa. Ravnovesje se mora doseči po vrednostih in po faznih kotih. Oba pogoja morata biti izpolnjena istočasno.

Mejo pogreška izmeničnega mostiča dobimo z izrazom za enosmerni mostič, v katerem ohmske upornosti zamenjamo z impedancami. Dobimo

$$\underline{e}_m = \pm \frac{\underline{I}_{5\min}}{\underline{U}_0} \left(\underline{Z}_{10} + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3 + \underline{Z}_4 + \underline{Z}_5 \left(\frac{\underline{Z}_{10}}{\underline{Z}_2} + 2 + \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_{10}} \right) \right). \quad (6-34)$$

Če je ničelni indikator instrument z zelo visoko impedanco (npr. elektronski instrument, osciloskop), se zgornji izraz poenostavi v obliko:

$$\underline{e}_m = \pm \frac{\underline{U}_{5\min}}{\underline{U}_0} \left(\frac{\underline{Z}_{10}}{\underline{Z}_2} + 2 + \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_{10}} \right). \quad (6-35)$$

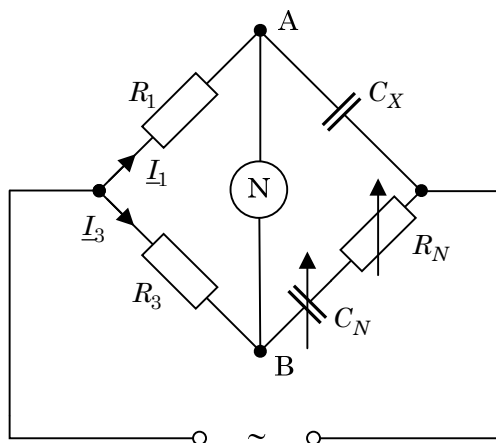
Pri tem velja, da je $\underline{U}_{5_{\min}} = \underline{I}_{5_{\min}} \cdot \underline{Z}_5$.

Pri izmeničnih merilnih mostičih je več vplivov, ki povzročajo dodatne pogreške kot pri enosmernih. Posebej omenimo vpliv medsebojnih induktivnosti in stresanih kapacitivnosti pri višjih frekvencah. Zato pazimo na medsebojno lego elementov mostiča, elemente oklopimo in uporabljamo oklopljene povezave med elementi mostiča. Za izločanje vpliva stresanih kapacitivnosti se uporablja tudi dodatno vezje, pomožni Wagnerjev mostič, s katerim dosežemo odpravo vpliva stresanih kapacitivnosti v ogliščih izmeničnega mostiča.

Izvedb oziroma vrst izmeničnih merilnih mostičev je veliko, imajo zelo različna imena (Maxwellov, Wienov, Ownov, Scheringov, ...). Izvedba je velikokrat taka, da sta v dveh vejah mostiča čisti ohmski upornosti, v ostalih dveh pa impedanci, s čimer se poenostavita ravnovesni enačbi in se veličina, ki jo merimo, da enostavneje izračunati.

Wienov mostič

Wienov mostič omogoča merjenje kapacitivnosti kondenzatorjev in izgubnega faktorja $\tan \delta_X$. V dveh vejah mostiča sta čisti ohmski upornosti R_1 in R_3 , v ostalih dveh vejah pa impedanca kondenzatorja C_X in znana veja s spremenljivim uporom R_N in kakovostnim kondenzatorjem s $\tan \delta_N \approx 0$, s katerima vzpostavimo ravnovesno stanje mostiča.



Slika 6-7: Vezje Wienovega mostiča.

Splošna ravnovesna enačba je $\underline{Z}_1 \underline{Z}_4 = \underline{Z}_2 \underline{Z}_3$, kar v tem primeru ob zaporedni nadomestno vezavi za C_X pomeni:

$$R_1 \left(R_N + \frac{1}{j\omega C_N} \right) = \left(R_X + \frac{1}{j\omega C_X} \right) R_3. \quad (6-36)$$

Iz realnih delov leve in desne strani te enačbe dobimo R_X :

$$R_1 R_N = R_X R_3 \text{ in } R_X = R_N \frac{R_1}{R_3}, \quad (6-37)$$

iz imaginarnih pa:

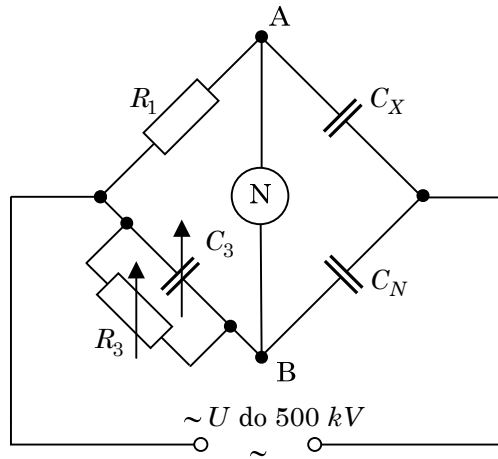
$$\frac{R_1}{j\omega C_N} = \frac{R_3}{j\omega C_X} \text{ in } C_X = C_N \frac{R_3}{R_1}. \quad (6-38)$$

Izgubni faktor $\text{tg}\delta_X$ je sedaj:

$$\text{tg}\delta_X = \omega \cdot R_X \cdot C_X = \omega \cdot R_N \cdot C_N. \quad (6-39)$$

Sheringov mostič

Sheringov mostič se je uveljavil v izvedbi z visokonapetostnim napajanjem ter služi predvsem za merjenje kakovosti merilnih transformatorjev oziroma njihove izolacije.



Slika 6-8: Vezje Sheringovega mostiča.

Iz splošne ravnovesne enačbe (6-29) sledi:

$$R_1 \cdot \frac{1}{j\omega C_N} = \left(R_X + \frac{1}{j\omega C_X} \right) \cdot \left(\frac{R_3 \cdot \frac{1}{j\omega C_3}}{R_3 + \frac{1}{j\omega C_3}} \right). \quad (6-40)$$

Po ureditvi enačbe dobimo obliko:

$$\frac{R_1}{j\omega C_N} + \frac{R_1 R_3 C_3}{C_N} = R_X R_3 + \frac{R_3}{j\omega C_X}. \quad (6-41)$$

$$\text{Iz enakih realnih delov } \frac{R_1 R_3 C_3}{C_N} = R_X R_3 \text{ sledi } R_X = R_1 \frac{C_3}{C_N}, \quad (6-42)$$

iz enakih imaginarnih delov pa:

$$\frac{R_1}{j\omega C_N} = \frac{R_3}{j\omega C_X} \text{ in } C_X = C_N \frac{R_3}{R_1}. \quad (6-43)$$

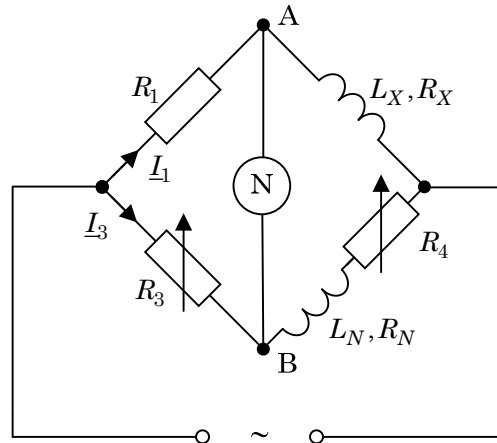
Izgubni faktor za zaporedno nadomestno vezavo C_X je:

$$\operatorname{tg} \delta_X = \omega \cdot R_X \cdot C_X = \omega \cdot R_3 \cdot C_3. \quad (6-44)$$

Vsi elementi morajo biti visoke kakovosti, kondenzatorja C_3 in C_N morata imeti $\operatorname{tg} \delta \approx 0$.

Maxwellov mostič

Z Maxwellovim mostičem lahko izmerimo induktivnost tuljave L_X in izgubni faktor $\operatorname{tg} \delta_X$. V dveh vejah sta čisto ohmski upornosti R_1 in R_2 , v ostalih dveh pa kompleksni upornosti neznane tuljave L_X in znanih elementov L_N in R_4 . Nikakor pa ne smemo zanemariti tudi ohmske upornosti znane tuljave R_N . Ravnovesje mostiča vzpostavimo s spreminjanjem R_3 in R_4 .



Slika 6-9: Vezje Maxwellovega mostiča.

Če izhajamo iz splošne ravnovesne enačbe (6-29), lahko zapišemo:

$$R_1 \left((R_N + R_4) + j\omega L_N \right) = (R_X + j\omega L_X) R_3. \quad (6-45)$$

Iz enakih realnih delov enačbe

$$R_1 (R_N + R_4) = R_X R_3 \text{ dobimo } R_X = (R_N + R_4) \frac{R_1}{R_3}, \quad (6-46)$$

iz enakih imaginarnih delov pa:

$$R_1 \cdot j\omega L_N = R_3 \cdot j\omega L_X \text{ pa } L_X = L_N \frac{R_1}{R_3}. \quad (6-47)$$

Izgubni faktor tuljave $\operatorname{tg} \delta_X$ je

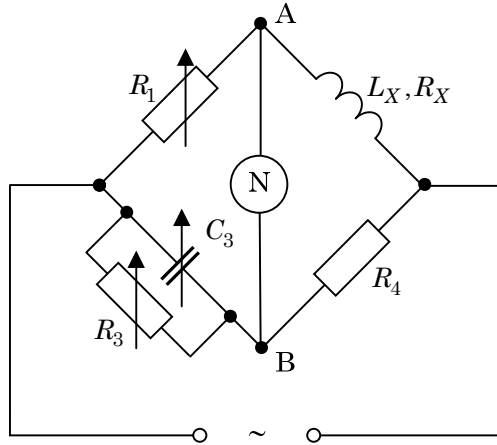
$$\operatorname{tg} \delta_X = \frac{R_X}{\omega L_X} = \frac{R_N + R_4}{\omega L_N}, \quad (6-48)$$

faktor kakovosti tuljave pa:

$$Q_X = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta_X} = \frac{\omega L_N}{R_N + R_4}. \quad (6-49)$$

Maxwell-Wienov mostič

Z Maxwell-Wienovim mostičem lahko merimo karakteristike tuljav ali kondenzatorjev. V danem primeru je prikazan način določanja induktivnosti tuljave L_X in faktorja kakovosti Q_X .



Slika 6-10: Vezje Maxwell-Wienovega mostiča.

Splošna ravnovesna enačba (6-29) preide v obliko:

$$R_1 R_4 = (R_X + j\omega L_X) \left(\frac{R_3}{1 + j\omega R_3 C_3} \right). \quad (6-50)$$

Iz enakih realnih delov enačbe

$$R_1 R_4 = R_X R_3 \text{ dobimo } R_X = R_1 \frac{R_4}{R_3}, \quad (6-51)$$

iz enakih imaginarnih delov pa:

$$j\omega L_X R_1 R_4 R_3 C_3 = j\omega L_X R_3 \text{ pa } L_X = C_3 R_1 R_4. \quad (6-52)$$

Izgubni faktor tuljave $\operatorname{tg} \delta_X$ je

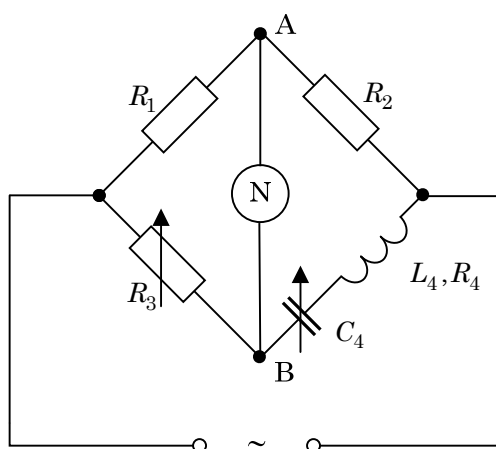
$$\operatorname{tg} \delta_X = \frac{R_X}{\omega L_X} = \frac{1}{\omega R_3 C_3}, \quad (6-53)$$

faktor kakovosti tuljave pa:

$$Q_X = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta_X} = \omega R_3 C_3. \quad (6-54)$$

Resonančni mostič

Z resonančnim mostičem lahko merimo induktivnost, kapacitivnost, pa tudi frekvenco. Mostič ima v treh vejah čiste ohmske upornosti R_1 , R_2 in R_3 , v četrti pa zaporedno vezano tuljavo in kondenzator, ki sestavljata zaporedni nihajni krog. Ravnoesje dosežemo s spreminjanjem upora R_3 in s spreminjanjem kapacitivnosti kondenzatorja C_4 , glej sliko 6-11.



Slika 6-11: Vezje resonančnega mostiča.

Če izhajamo iz ravnovesnega pogoja, ki ga dobimo, če zapišemo impedance elementov v eksponentni obliki, torej $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = 0$, sledi, da mora biti tudi $\varphi_4 = 0$. To pa je mogoče le, če je LC veja mostiča v resonanci, pri kateri je izpolnjen pogoj

$$\omega L_4 = \frac{1}{\omega C_4} \text{ oziroma } \omega^2 L_4 C_4 = 1. \quad (6-55)$$

Iz te enačbe, ki velja za uravnovešen mostič, izračunamo neznano veličino, ostali dve moramo poznati.

6.2 Enosmerni kompenzatorji

6.2.1 Osnovna kompenzacijska vezja

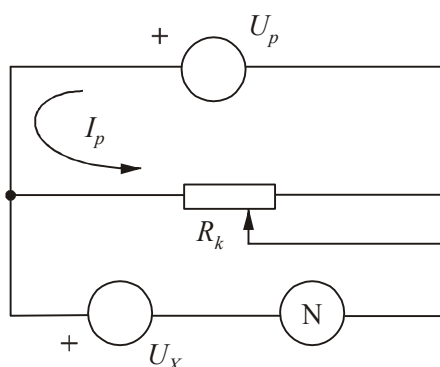
Kompenzator je merilno vezje, v katerem enosmerno (merjeno) napetost primerjamo z znano, ki jo spreminjamo tako, da se napetosti izenačita. Kompenzirano stanje, enakost obeh napetosti, ugotavljamo z ničelnim indikatorjem, čez katerega v tem stanju ne teče noben tok. Torej v času odčitavanja merilnega rezultata merjenec ni obremenjen, kar je pomembna lastnost

kompensacijskega načina merjenja. Merilno vezje je lahko izvedeno na dva načina, po Poggendorffovem ali Lindeck-Rothejevem principu.

Poggendorffovo vezje

Enakost napetosti U_X in $I_p R_k$ dosežemo tako, da spreminjamo upornost R_k z drsnikom potenciometra tako, da je tok čez ničelni indikator N enak nič. Pomožni tok I_p iz vira U_p je konstanten.

$$U_X = I_p R_k \quad (6-56)$$

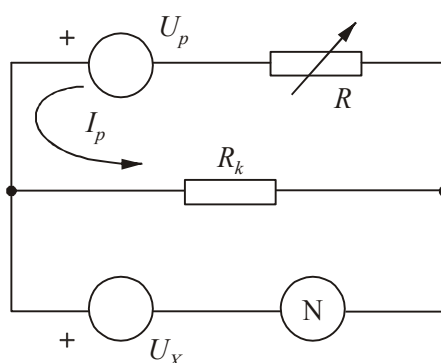


Slika 6-12: Poggendorffov kompenzacijski princip.

Lindeck-Rothejevo vezje

V tem vezju dosežemo enakost napetosti U_X in $I_p R_k$ tako, da z uporom R spreminjamo tok I_p tako, da je tok čez ničelni indikator enak nič. Upor R_k je konstanten.

$$U_X = I_p R_k \quad (6-57)$$



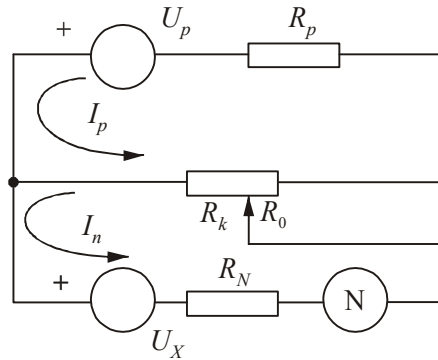
Slika 6-13: Lindeck-Rothejev kompenzacijski princip.

V obeh primerih moramo poznati vrednost toka I_p , ki ga lahko merimo z ampermetrom, kateri na slikah ni vrisan. Vrednost upornosti R_k določimo s posebno meritvijo ali pa z odčitavanjem nastavljene vrednosti upora, če je ta izdelan tako, da je to mogoče. Vsekakor pri taki enostavni izvedbi vezja in merjenju ni mogoče doseči visokih točnosti. To je omogočeno šele s posebnimi

izvedbami preciznih kompenzatorjev. K merilni negotovosti zaradi pogreškov pri določanju I_p in R_k prispeva tudi negotovost določitve vrednosti nič toka čez ničelni indikator. Zato ocenimo občutljivost in merilno negotovost, ki jo zaradi tega vnašamo v meritev.

6.2.2 Občutljivost in merilna negotovost kompenzacijskega vezja

Za to obravnavo izberemo vezje s potenciometriškim uporom.



Slika 6-14: Kompenzacijsko vezje s potenciometrom.

Za obe označeni zanki lahko s Kirchhoffovim zakonom zapišemo

$$\begin{aligned} I_p (R_p + R_0 + R_k) - I_n R_k &= U_p \\ -I_p R_k + I_n (R_k + R_N) &= -U_X \end{aligned} \quad (6-58)$$

Iz teh enačb izračunamo tok I_n čez ničelni indikator

$$I_n = \frac{U_p R_k - U_X (R_p + R_0 + R_k)}{R_k (R_p + R_0) + R_N (R_p + R_0 + R_k)}. \quad (6-59)$$

Tok I_n bo nič, kadar bo veljalo

$$U_p \cdot R_k = U_X (R_p + R_0 + R_k). \quad (6-60)$$

Občutljivost kompenzatorja je definirana z

$$o_k = \frac{dI_n}{dU_X} = - \frac{R_p + R_0 + R_k}{R_k (R_p + R_0) + R_N (R_p + R_0 + R_k)}. \quad (6-61)$$

Če pa opazujemo končno, še opazno spremembo toka I_n , I_{nmin} , za katero lahko trdimo, da jo povzroča razlika napetosti ΔU_X , lahko zapišemo

$$\frac{I_{nmin}}{\Delta U_X} = - \frac{R_p + R_0 + R_k}{R_k (R_p + R_0) + R_N (R_p + R_0 + R_k)}. \quad (6-62)$$

Iz tega izrazimo merilno negotovost kompenzacijskega vezja

$$e_k = \left(\frac{\Delta U_X}{U_X} \right)_{\min} = \pm \frac{I_{n\min}}{U_X (R_p + R_0 + R_k)} \left(R_k (R_p + R_0) + R_N (R_p + R_0 + R_k) \right) \quad (6-63)$$

$$\text{in } e_k = \pm \frac{I_{n\min}}{U_X} \left(R_N + R_k \frac{R_p + R_0}{R_p + R_0 + R_k} \right).$$

$I_{n\min}$ je podatek, ki ga dobimo z ničelnega indikatorja, R_N je skupna upornost merjenca U_X in ničelnega indikatorja, ostalo so znane upornosti v pomožnem tokokrogu.

Merilna negotovost kompenzacijskega vezja mora biti dovolj majhna. Nanjo vplivamo z izbiro ničelnega indikatorja in z ostalimi elementi v vezju.

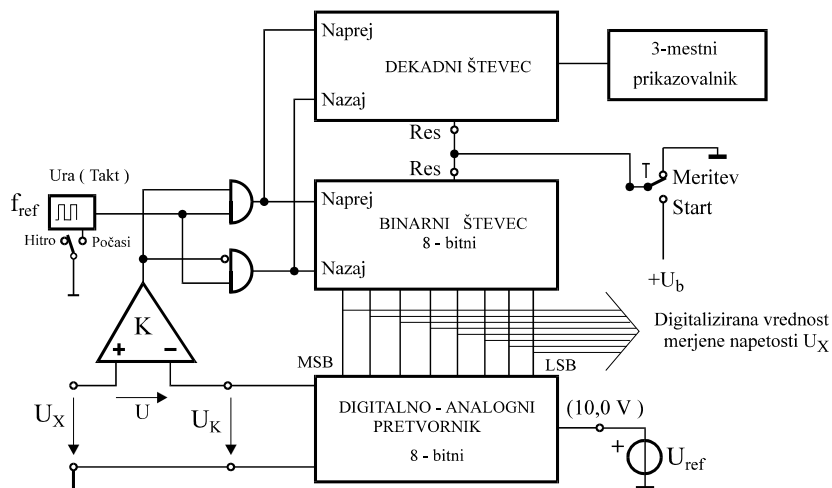
6.2.3 Samodejno digitalno kompenzacijsko vezje

Kompenzacijski princip delovanja je izvedljiv tudi v digitalni tehniki, pri čemer se kompenzirano stanje vzpostavi samodejno. Pomembne komponente pri takem vezju so

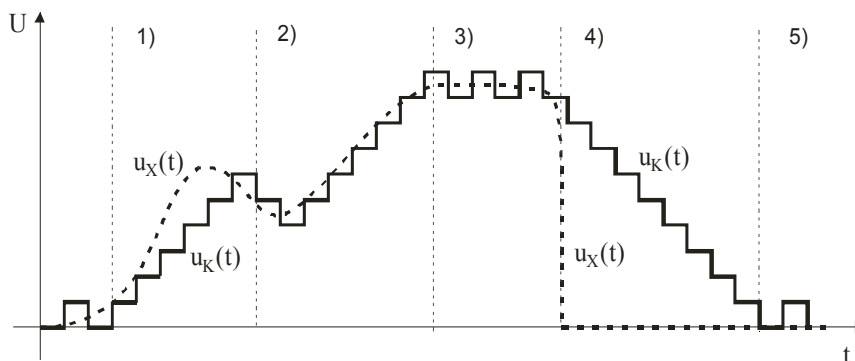
- primerjalnik,
- digitalno analogni pretvornik,
- števec in
- digitalno krmilno vezje.

Princip samodejnega kompenzacijskega vezja je prikazan na sliki 6-15.

Primerjalnik K primerja merjeno napetost U_X in kompenzacijsko napetost U_K . Glede na velikost in predznak njene razlike ΔU se na izhodu primerjalnika vzpostavi logično stanje 0 (0 V) ali 1 (+15 V). Digitalno analogni pretvornik (DA) nastavlja napetost U_K tako, da doseže razlika $\Delta U = U_X - U_K$ manjšo vrednost, kot je napetostna stopnica signala iz DA-pretvornika. DA-pretvornik je krmiljen s števcem, ki šteje naprej ali nazaj, odvisno od izhodnega stanja primerjalnika. Posledica tega je nihanje rezultata za en kvant (napetostna stopnica U_0) oziroma med $U_{\min}$ in $U_{\max}$. Napetost U_X leži znotraj intervala $U_{\max} - U_{\min}$. Vezje deluje zadovoljivo, če spremembe napetosti U_X niso prehitre glede na hitrost delovanja DA-pretvornika. Ta lastnost je prikazana na časovnem poteku signalov na sliki 6-16. V intervalih 1 in 4 se merjena napetost U_X prehitro spreminja in ji U_K ne more slediti. V intervalu 2 je primerno sledenje, v intervalih 3 in 5 pa je napetost U_X konstantna, oziroma 0, kar povzroči preklapljanje števca za eno napetostno stopnico okoli določenega nivoja napetosti U_X .



Slika 6-15: Princip delovanja samodejnega digitalnega kompenzacijskega vezja.



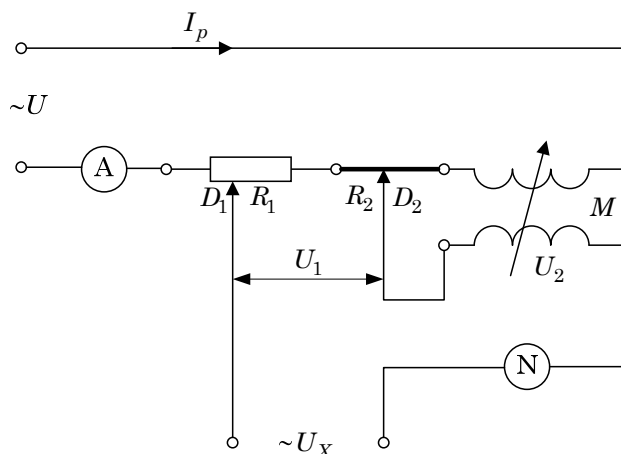
Slika 6-16: Časovni potek signalov pri delovanju samodejnega digitalnega kompenzacijskega vezja.

6.3 Izmenični kompenzatorji

Pri kompenziranju neznane izmenične napetosti moramo kompenzacijo izvesti z znano napetostjo, ki se z neznano ujema po vrednosti, obliki, frekvenci in fazi. Za to vrsto meritev je bilo razvitih več značilnih vezij s specifičnimi poudarjenimi lastnostmi. Ogledali si bomo eno od najenostavnejših.

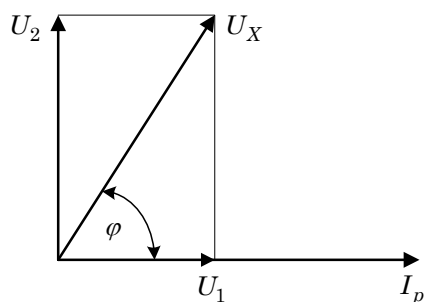
6.3.1 Kompleksni kompenzator

Neznano izmenično napetost kompenziramo z vsoto padca napetosti na ohmski upornosti R in inducirane napetosti U_2 na sekundarni strani navitja zračnega transformatorja s spremenljivo medsebojno induktivnostjo M .



Slika 6-17: Kompleksni kompenzator.

V idealnem primeru sta napetosti U_1 in U_2 med sabo premaknjeni za 90° , kakor kaže kazalčni diagram.



Slika 6-18: Kazalčni diagram kompleksnega kompenzatorja.

Padeč napetosti U_1 je

$$U_1 = I_p (R_1 + R_2), \quad (6-64)$$

inducirana napetost U_2 pa:

$$U_2 = \omega \cdot M \cdot I_p. \quad (6-65)$$

Napetost U_X dobimo z izrazom

$$U_X = \sqrt{U_1^2 + U_2^2} = I_p \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + \omega^2 M^2}. \quad (6-66)$$

Določimo lahko tudi kot φ iz $\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_2}{U_1}$.

Kompenzirano stanje dosežemo tako, da ob konstantnem pomožnem toku I_p spreminjamo upornosti dveh drsnih uporov s premikanjem drsnikov D_1 in D_2 . Tako spreminjamo U_1 in s

spremembo medsebojne induktivnosti M zračnega transformatorja spreminjamo U_2 .

7. MERJENJE ELEKTRIČNIH VELIČIN

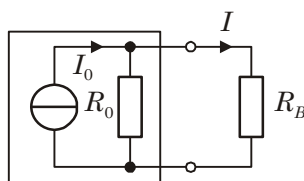
Električne veličine kot so tok, napetost, upornost, kapacitivnost, induktivnost, frekvenco, moč je mogoče meriti na različne načine. Velikokrat uporabimo merilne instrumente in naprave za neposredno merjenje, pogosto pa uporabimo primerne merilne metode in iskano veličino določimo posredno iz drugih izmerjenih veličin. V tem poglavju bomo obravnavali osnovne pristope k merjenju posameznih veličin.

7.1 Merjenje toka in napetosti

Obravnavali bomo neposredno merjenje z ustreznimi merilnimi instrumenti, ampermetri in voltmetri. Ker merilni instrumenti nimajo idealnih lastnosti, povzroči njihova vključitev v vezje spremembo tokov in napetosti. Torej bodo merilni rezultati odvisni tudi od vpliva merilnih instrumentov. Ta vpliv moramo ovrednotiti, da se prepričamo, če so merilni rezultati v sprejemljivih mejah ali pa je potrebno za točnejše merjenje iskati drugačno rešitev.

7.1.1 Merjenje toka

Izhajamo iz stanja, ko merilnega instrumenta ni v vezju, in ko tokovni vir napaja neko ohmsko breme R_B , preko katerega teče tok I . Tokovni vir je podan s standardno nadomestno vezavo, virom I_0 in notranjo upornostjo R_0 .



Slika 7-1: Vezje brez ampermetra.

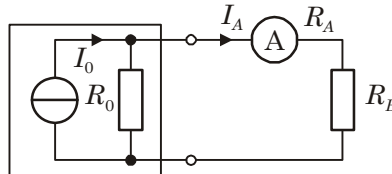
Tok I skozi breme R_B je v tem primeru:

$$I = I_0 \frac{R_0}{R_0 + R_B}. \quad (7-1)$$

Po vključitvi ampermetra z upornostjo R_A je tok I_A čez breme R_B :

$$I_A = I_0 \frac{R_0}{R_0 + R_B + R_A}. \quad (7-2)$$

Tok I_A je manjši kot tok I .



Slika 7-2: Vezje z ampermetrom.

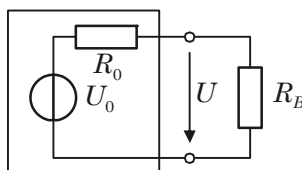
Če vzamemo, da je tok I_A enak toku I , ki teče v vezju brez ampermetra, napravimo relativni sistematični pogrešek e_I , ki mu pravimo tudi pogrešek merilne metode:

$$e_I = \frac{I_A - I}{I} = \frac{I_0 \frac{R_0}{R_0 + R_B + R_A} - I_0 \frac{R_0}{R_0 + R_B}}{I_0 \frac{R_0}{R_0 + R_B}} = -\frac{R_A}{R_0 + R_B + R_A}. \quad (7-3)$$

Ta pogrešek je negativen in bo tem manjši, čim manjša bo upornost ampermetra R_A v primerjavi z upornostma R_0 in R_B .

7.1.2 Merjenje napetosti

Tudi v tem primeru izhajamo iz stanja, ko voltmetra ni v vezju. Napetostni vir, podan s standardno nadomestno vezavo, virom U_0 in notranjo upornostjo R_0 , napaja ohmsko breme R_B .



Slika 7-3: Vezje brez voltmetra.

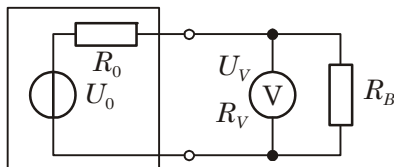
Napetost na bremenu R_B je v tem primeru:

$$U = U_0 \frac{R_B}{R_0 + R_B}. \quad (7-4)$$

Z vključenim voltmetrom z upornostjo R_V bo izmerjena napetost U_V :

$$U_V = \frac{U_0}{R_0 + \frac{R_V \cdot R_B}{R_V + R_B}} \cdot \frac{R_V \cdot R_B}{R_V + R_B} = U_0 \frac{R_V \cdot R_B}{R_0 R_V + R_0 R_B + R_V R_B}. \quad (7-5)$$

Napetost U_V je manjša kot napetost U .



Slika 7-4: Vezje z voltmetrom.

Če vzamemo, da je napetost U_V enaka napetosti U , ko voltmetra ni v vezju, napravimo relativni sistematični pogrešek e_U , imenovan tudi pogrešek merilne metode:

$$\begin{aligned} e_U = \frac{U_V - U}{U} &= \frac{U_0 \frac{R_V R_B}{R_0 R_V + R_0 R_B + R_V R_B} - U_0 \frac{R_B}{R_0 + R_B}}{U_0 \frac{R_B}{R_0 + R_B}} = \\ &= -\frac{R_0 R_B}{R_0 R_V + R_0 R_B + R_V R_B}. \end{aligned} \quad (7-6)$$

Pogrešek je negativen in bo tem manjši, čim večja bo upornost voltmetra R_V v primerjavi z upornostma R_0 in R_B .

7.1.3 Merjenje izmeničnih tokov in napetosti

Pri merjenju izmeničnih tokov in napetosti moramo izbrati primerne merilne instrumente in metode glede na obliko (sinus, nesinus) merjene veličine in glede na to, katero vrednost želimo določiti (temensko, efektivno, enosmerni del). Pri vseh obravnavah moramo upoštevati, da imamo opraviti s kompleksnimi upornostmi in pri nesinusnih oblikah z višjimi harmoniki. V praksi pa je pogosto mogoče dovolj točno meriti tudi, če upoštevamo le ohmske upornosti merilnih instrumentov in naprav.

Merjenje temenske vrednosti izmenične napetosti

Merilni instrumenti za merjenje izmenične napetosti so običajno narejeni tako, da pokažejo efektivno vrednost napetosti, če jih neposredno vključimo v vezje. Če pa želimo izmeriti temensko vrednost, sestavimo dodatno vezje z diodo in kondenzatorjem, kar je vidno na sliki 5-8. Kondenzator C mora imeti visoko kakovost, torej čim manjši izgubni faktor $\tan \delta$, uporabljeni voltmeter pa naj ima veliko upornost. Če sta izpolnjena ta pogoja, se bo kondenzator napolnil praktično na temensko vrednost napetosti, ki jo bo voltmeter izmeril.

7.2 Merjenje upornosti

7.2.1 Splošno o merjenju upornosti

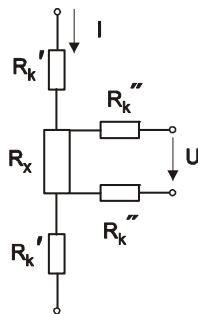
Ohmska upornost R je definirana kot recipročna vrednost ohmske prevodnosti G , ki je snovno geometrijska lastnost vodnika po katerem teče tok. Enota ohmske upornosti $1\ \Omega$ ($\text{ohm} = \text{V/A}$) je upornost, ki jo ima ohmski upor, skozi katerega napetost $1\ \text{V}$ požene tok $1\ \text{A}$. Upornost idealnega upora je razmerje trenutne vrednosti napetosti in toka. Realni upori vsebujejo še kapacitivno in induktivno upornost, ki sta odvisni od frekvence toka in napetosti. Na upornost vplivajo tudi ostali pojavi, kot so odvisnost upornosti od:

- specifične upornosti materiala,
- geometrijskih lastnosti,
- temperature (termistor),
- napetosti (varistor),
- osvetljenosti (fotoupor),
- frekvence (kožni pojav) in
- polarizacije elektrod (elektroliti).

Na te pojave moramo biti pozorni pri izbiri metode in izvedbe meritve upornosti. Meritve upornosti izvajamo z enosmernim ali izmeničnim virom praviloma sinusne oblike. Realne upore nadomestimo z nadomestnimi vezji, z vzporedno vezavo ali zaporedno vezavo idealnih elementov, kar je vidno v tabeli 7-1. Ohmsko upornost pri izmeničnem viru merimo z meritvijo delovne komponente napetosti in toka oziroma s pomočjo merjenja delovne moči.

7.2.2 Upornost priključnih vodnikov in stične upornosti

Pri merjenju malih upornosti moramo upoštevati upornost priključnih vodnikov in stične upornosti. Ločimo tokovne in napetostne priključne sponke. Slika 7-5 prikazuje nadomestne upornosti vodnikov in stičnih mest.



Slika 7-5: Upoštevanje upornosti vodnikov in stičnih mest.

Voltmeter je vezan na stične površine neznanega upora in ne meri padca napetosti zaradi upornosti priključnih vodov tokovne zanke R'_k . Stične upornosti napetostnih sponk R''_k so zanemarljive proti notranji upornosti voltmetra.

Tabela 7-1: Nadomestna vezja realnega upora. Zaporedna vezava idealnih elementov (a in b) in vzporedna vezava idealnih elementov (c in d).

	Nadomestno vezje	Kazalčni diagram	Ohmska upornost, izgubni faktor $\tan \delta$ in faktor kvalitete Q
(a)			$R_s = \frac{U \cdot \cos \varphi}{I} = \frac{P}{I^2}$ $L_s = \frac{U \cdot \sin \varphi}{\omega \cdot I} = \frac{\sqrt{(U \cdot I)^2 - P^2}}{\omega \cdot I^2}$ $Q = \frac{\omega \cdot L_s}{R_s} = \frac{1}{\tan \delta}$
(b)			$R_s = \frac{U \cdot \cos \varphi}{I} = \frac{P}{I^2}$ $C_s = \frac{I}{\omega \cdot U \cdot \sin \varphi} = \frac{I^2}{\omega \cdot \sqrt{(U \cdot I)^2 - P^2}}$ $\tan \delta = \omega \cdot R_s \cdot C_s$
(c)			$R_p = \frac{U}{I \cdot \cos \varphi} = \frac{U^2}{P}$ $L_p = \frac{U}{\omega \cdot I \cdot \sin \varphi} = \frac{U^2}{\omega \cdot \sqrt{(U \cdot I)^2 - P^2}}$ $Q = \frac{R_p}{\omega \cdot L_p} = \frac{1}{\tan \delta}$
(d)			$R_p = \frac{U}{I \cdot \cos \varphi} = \frac{U^2}{P}$ $C_p = \frac{I \cdot \sin \varphi}{\omega \cdot U} = \frac{\sqrt{(U \cdot I)^2 - P^2}}{\omega \cdot U^2}$ $\tan \delta = \frac{1}{\omega \cdot R_p \cdot C_p}$

7.2.3 Merjenje notranje upornosti aktivnih dvopolov

Pri aktivnih dvopolih (primer: baterija) definiramo (diferencialno) notranjo upornost kot razmerje med spremembo napetosti na sponkah in ustrezno spremembo toka.

$$R_n = \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (7-7)$$

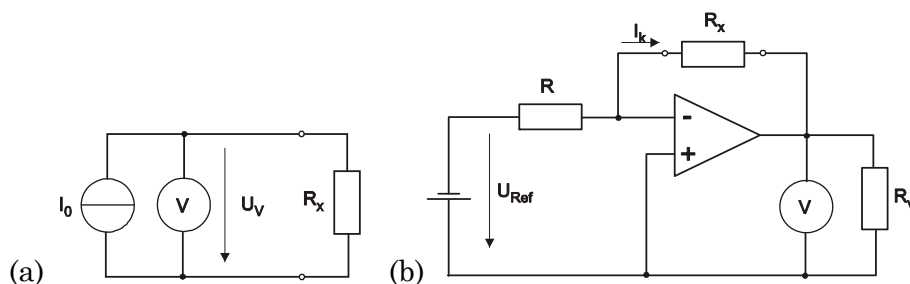
Notranja upornost je lahko konstantna ali pa se spreminja z obremenitvijo aktivnega dvopola. V drugem primeru moramo izmeriti odvisnost napetosti od toka in narisati njeno karakteristiko.

7.2.4 Merilne metode za merjenje upornosti

Obstaja veliko metod merjenja upornosti. Izbira metode je odvisna od dosegljive instrumentacije, velikosti upornosti in merilnega pogreška posameznih metod.

Merjenje upornosti z voltmetrom in tokovnim virom

Slika 7-6 prikazuje princip in izvedbo ohmmetra s tokovnim virom, ki se uporablja v digitalnih merilnih instrumentih.



Slika 7-6: Merjenje upornosti s tokovnim virom (a) in izvedba z operacijskim ojačevalnikom (b).

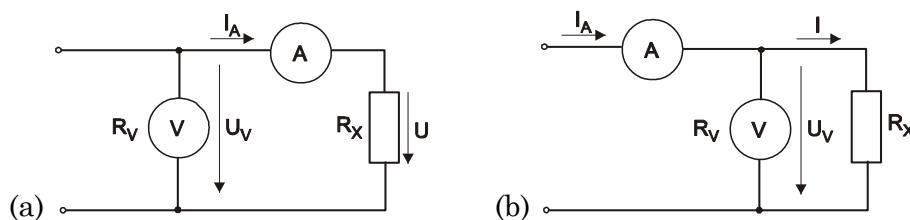
Ob upoštevanju $R_v \gg R_x$ in konstantnem toku I_0 , je U_V sorazmerna R_x .

$$U_V = I_0 \cdot \frac{R_x \cdot R_v}{R_x + R_v} = I_0 \cdot R_x \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_x}{R_v}} \approx I_0 \cdot R_x \quad (7-8)$$

Merilna območja takšnega ohmmetra izbiramo z izbiro velikosti konstantnega toka, saj je merilno območje V-metra običajno konstantno.

U - I metoda merjenja upornosti

Upornost merimo s posredno meritvijo toka in napetosti. Položaj instrumentov v vezju je odvisen od velikosti merjene upornosti, kar vidimo na sliki 7-7.



Slika 7-7: U - I metoda merjenja upornosti.

Slika 7-7a predstavlja vezavo za merjenje velikih upornosti, iz katere dobimo:

$$R = \frac{U_V}{I_A} = \frac{I_A (R_A + R_x)}{I_A} = R_A + R_x \quad (7-9)$$

in je sistematski pogrešek:

$$e = \frac{R - R_x}{R_x} = \frac{R_A + R_x - R_x}{R_x} = \frac{R_A}{R_x} \quad (7-10)$$

Pri merjenju večjih upornosti je sistematski pogrešek manjši. Točnost metode je odvisna od točnosti ampermetra in voltmetra. Pri velikih upornostih je problematično merjenje malih tokov. Slika 7-7b predstavlja vezavo, ki je primerna za merjenje malih upornosti, kar je razvidno iz enačb:

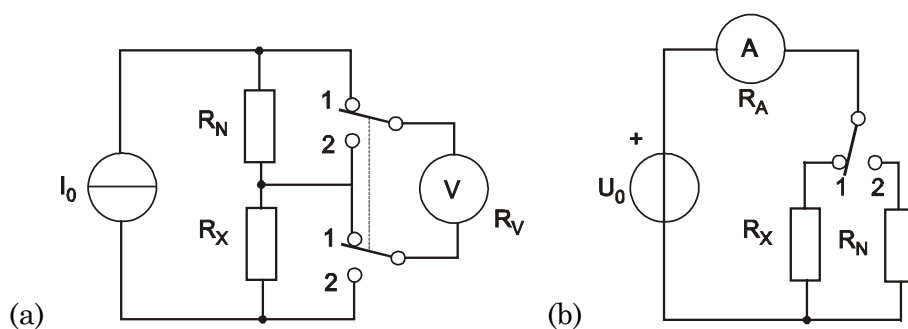
$$R = \frac{U_V}{I_A} = \frac{U_V}{U_V} \cdot \frac{R_x \cdot R_V}{R_x + R_V} = \frac{R_x \cdot R_V}{R_x + R_V} \text{ in}$$

$$e = \frac{R - R_x}{R_x} = \frac{\frac{U_V}{I_A} - R_x}{R_x} = -\frac{R_x}{R_x + R_V} \quad (7-11)$$

Padec napetosti sicer lahko povečamo z večanjem toka, vendar ne smemo prekoračiti dovoljene obremenitve upora.

$$P = I^2 \cdot R_x = \frac{U^2}{R_x} \quad (7-12)$$

Primerjalni metodi merjenja upornosti



Slika 7-8: Napetostna (a) in tokovna (b) primerjalna metoda.

Ko je pri napetostni primerjalni metodi prikazani na sliki 7-8a stikalo v položaju 1, merimo z voltmetrom napetost na vzporedni vezavi R_N in notranje upornosti voltmetra R_V :

$$U_N = I_0 \cdot \frac{R_N \cdot R_V}{R_N + R_V}, \quad (7-13)$$

in ko je stikalo v položaju 2, merimo padec napetosti na vzporedni vezavi upornosti R_x in upornosti voltmetra R_V :

$$U_x = I_0 \cdot \frac{R_x \cdot R_V}{R_x + R_V}. \quad (7-14)$$

Iz enačb izračunamo neznano upornost R_x :

$$R_x = \frac{R_V}{R_N \cdot \left(1 - \frac{U_x}{U_N}\right) + R_V} \cdot R_N \cdot \frac{U_x}{U_N} \cong R_N \cdot \frac{U_x}{U_N} \quad (7-15)$$

Enačba se poenostavi, če predvidimo zelo veliko notranjo upornost voltmetra. Pri tej poenostavitvi smo napravili sistematski pogrešek velikosti

$$e = \frac{R_N - R_x}{R_x + R_V}, \quad (7-16)$$

ki ga lahko zmanjšamo z večanjem notranje upornosti voltmetra R_V ali pa z izbiro znanega upora R_N , ki naj bo približno enak neznani upornosti R_x .

Podobna izvajanja veljajo za tokovno primerjalno metodo na sliki 7-8b, kjer dobimo:

$$R_x = (R_N + R_A) \cdot \frac{I_N}{I_x} - R_A \cong R_N \cdot \frac{I_N}{I_x}. \quad (7-17)$$

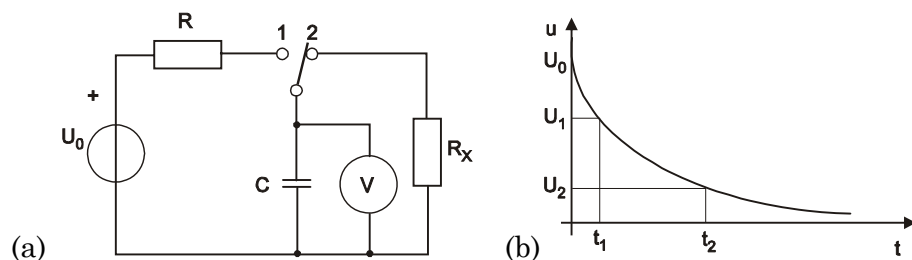
Pri računanju s poenostavljeno enačbo, kjer zanemarimo notranjo upornost ampermetra, smo napravili sistematski pogrešek:

$$e = \frac{R_A}{R_x} \cdot \frac{R_N - R_x}{R_N - R_A}. \quad (7-18)$$

Iz enačbe se vidi, da lahko tudi v tem primeru sistematski pogrešek zmanjšamo z izbiro vrednosti upornosti R_N , ki naj bo približno enaka upornosti R_x .

Merjenje velikih upornosti

Zelo velike upornosti merimo po metodi praznjenja kondenzatorja. Slika 7-9 prikazuje vezavo (a) in časovni potek praznjenja (b).



Slika 7-9: Metoda praznjenja kondenzatorja.

V položaju 1 se kondenzator nabije na napetost U_0 in se po preklopu stikala v položaj 2 prazni preko neznanega upora. V času t_1 je na njem napetost:

$$U_1 = U_0 \cdot e^{-\frac{t_1}{R_x C}} \text{ v času } t_2 \text{ pa napetost: } U_2 = U_0 \cdot e^{-\frac{t_2}{R_x C}}. \quad (7-19)$$

Iz enačb (7-19) izračunamo neznano upornost:

$$R_x = \frac{t_2 - t_1}{C \cdot \ln \frac{U_1}{U_2}} \quad (7-20)$$

Pri tem nismo upoštevali izolacijske upornosti kondenzatorja in upornosti voltmetra. Ta problem rešimo z izvedbo dveh meritev. V prvi praznimo kondenzator samo čez vzporedno vezavo notranje upornosti voltmetra in izolacijske upornosti kondenzatorja $R_1 = R_i || R_V$, v drugi pa čez vzporedno vezavo voltmetra, izolacijske upornosti kondenzatorja in neznanega upora $R_2 = R_1 || R_x$. Neznano upornost dobimo po enačbi:

$$R_x = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 - R_2} \quad (7-21)$$

Mostične metode, predvsem Wheatstonov in Thomsonov merilni mostič ter izmenični merilni mostiči, so opisani v poglavju 6.1 Merilni mostiči.

7.3 Merjenje induktivnosti in kapacitivnosti

7.3.1 Merjenje induktivnosti

Induktivnost je snovno-geometrijska lastnost prostora, v katerem se sklepa magnetno polje. Za nemagnetne snovi je induktivnost konstantna veličina, za magnetne snovi pa je zaradi spremenljive permeabilnosti $\mu = \mu(I)$ induktivnost funkcija toka magnetenja $L = L(I)$. V tokovni zanki ali tuljavi ima vsaka sprememba električnega toka za posledico spremembo pripadajočega magnetnega pretoka ϕ oziroma magnetnega sklepa ψ . Medsebojno razmerje obeh veličin določa snov v prostoru in oblikovanost prostora, ki ga magnetimo z električnim tokom. Lastna induktivnost tuljave je definirana kot razmerje med magnetnim sklepom ψ in tokom i tuljave. Enota induktivnosti je 1 H (henry) = 1 Vs/A.

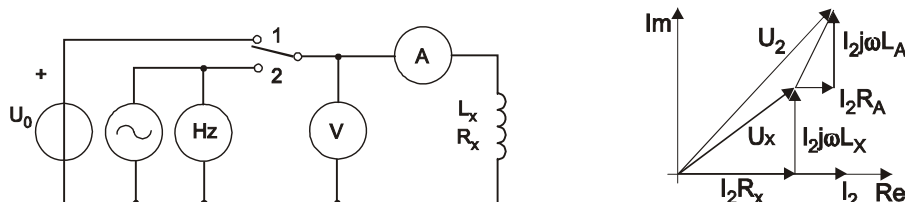
Induktivnost idealne tuljave je razmerje med napetostjo na tuljavi in odvodom toka po času. Realna tuljava ima poleg induktivnosti še določeno ohmsko upornost (kapacitivnost zanemarimo) in jo predstavljamo z vzporednim ali zaporednim nadomestnim vezjem idealnih elementov, podobno kot velja za realni upor, kar je prikazano v tabeli 7-1a. Iz kazalčnega diagrama je razvidno, da lahko v primeru zaporedne nadomestne vezave določimo induktivnost tako, da izmerimo jalovo komponento napetosti, tok

in frekvenco. V primeru vzporedne nadomestne vezave pa izmerimo napetost, jalovo komponento toka in frekvenco. V praksi pogosto določamo induktivnost z meritvijo delovne moči, napetosti, toka ter frekvence.

Enačbo za izračun induktivnosti v zaporedni nadomestni vezavi prikazani v tabeli 7-1a pa lahko preoblikujemo v obliko

$$L_s = \frac{1}{\omega} \cdot \sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - R_s^2}, \quad (7-22)$$

torej lahko induktivnost določimo z meritvijo napetosti, toka, frekvence in predhodnim določanjem nadomestne upornosti R_s . Metoda je uporabna v primeru zračnih tuljav brez feromagnetnih jeder, saj je v tem primeru R_s kar enaka ohmski upornosti navitja, ki jo lahko izmerimo z enosmernim tokom, na primer z U - I metodo. Ta metoda pa ni primerna za določitev L_p , saj R_p ne moremo določiti z enosmernim tokom. V literaturi so ta princip poimenovali *U-I metoda merjenja induktivnosti*. Slika 7-10 prikazuje princip in kazalčni diagram.



Slika 7-10: *U-I metoda merjenja induktivnosti in kazalčni diagram.*

Ko je stikalo v položaju 1, je na tuljavo priključen enosmerni vir in z ampermetrom ter voltmetrom merimo ohmsko upornost navitja tuljave. Z instrumenti izmerjene vrednosti označimo kot U_1 in I_1 . Upornost izračunamo po enačbi

$$R_x + R_A = \frac{U_1}{I_1}. \quad (7-23)$$

V položaju 2 je na tuljavo priključen izmenični vir napetosti sinusne oblike in voltmeter kaže vrednost U_2 , ampermetar pa vrednost I_2 , ki sta narisani v kazalčnem diagramu na sliki 7-10. Impedanco izračunamo po enačbi:

$$Z = \frac{U_2}{I_2} = \sqrt{(R_x + R_A)^2 + \omega^2 \cdot (L_x + L_A)^2} \quad (7-24)$$

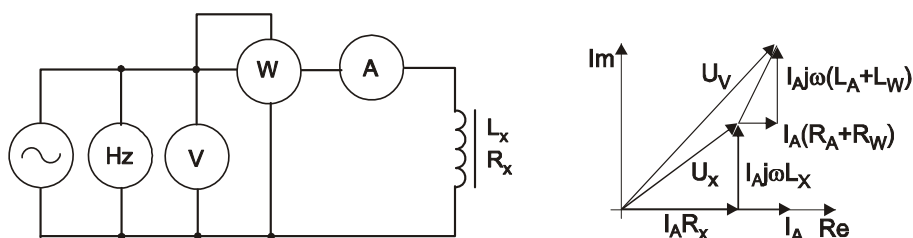
in po kratki izpeljavi induktivnost po enačbi

$$L_x = \frac{1}{\omega} \cdot \sqrt{\left(\frac{U_2}{I_2}\right)^2 - \left(\frac{U_1}{I_1}\right)^2} - L_A. \quad (7-25)$$

Pri uporabi U - I metode moramo upoštevati:

- da merimo induktivnost tuljave brez feromagnetnega jedra,
- da instrumenti pravilno merijo enosmerne in izmenične veličine,
- če je induktivnost ampermetra A mnogo manjša od induktivnosti tuljave, lahko zanemarimo induktivnost ampermetra.

Pri merjenju induktivnosti tuljav z železnim jedrom moramo biti pozorni na dodatne ohmske izgube, ki nastanejo pri magnetenju materiala z izmeničnim tokom. Induktivnost izračunamo iz jalove moči, ki jo merimo posredno, z meritvijo navidezne in delovne moči na tuljavi, kar je razvidno na sliki 7-11.



Slika 7-11: P - U - I metoda merjenja induktivnosti tuljave z železnim jedrom in kazalčni diagram.

Ob upoštevanju vpliva induktivnosti tokovne veje vatmetra L_W in induktivnosti ampermetra L_A je

$$L_x = \frac{\sqrt{(U_V \cdot I_A)^2 - P_W^2}}{\omega \cdot I_A^2} - (L_A + L_W). \quad (7-26)$$

Pri P - U - I metodi moramo upoštevati:

- nelinearnost zaradi histerezne zanke pri magnetenju materiala; magnetna gostota B je nelinearno odvisna od jakosti magnetnega polja H in se zato spreminja permeabilnost, kar pomeni, da bo induktivnost tuljave z železnim jedrom odvisna od velikosti toka, pri katerem jo merimo;
- permeabilnost pa se spreminja tudi z obliko toka magnetenja, zato moramo meriti z obliko in velikostjo toka, ki bo enaka toku obratovanja tuljave;
- v primeru male induktivnosti tokovne veje vatmetra in male induktivnosti ampermetra ju lahko zanemarimo.

Pri merjenju induktivnosti tuljav običajno določimo tudi faktor kakovosti tuljave Q . To je obratna vrednost $\tan \delta_x$ ($\delta_x = 90^\circ - \varphi_x$), ki je podan z razmerjem ohmske in induktivne upornosti tuljave

$$\operatorname{tg} \delta_x = \frac{R_x}{\omega L_x}. \quad (7-27)$$

Torej je:

$$Q = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta_x} = \frac{\omega L_x}{R_x}. \quad (7-28)$$

Induktivnost merimo tudi z različnimi izmeničnimi mostičnimi vezji, kot so Maxwellov mostič, Maxwell-Wienov mostič, Owenov mostič, Hayov mostič in drugimi.

Merjenje medsebojne induktivnosti

Medsebojna induktivnost je v idealnem primeru razmerje med inducirano napetostjo v enem krogu in časovnim odvodom toka v drugem krogu. Vpliv medsebojne induktivnosti M_X na skupno induktivnost L' oziroma L'' je odvisen od vezave tuljav in je lahko pozitiven ali pa negativen. Na osnovi tega lahko določimo medsebojno induktivnost tako, da dvakrat izmerimo skupno induktivnost, vendar drugič obrnemo sponke druge tuljave. Princip je na naslednji sliki.



Slika 7-12: Princip določanja medsebojne induktivnosti M_X z merjenjem skupne induktivnosti.

V prvem primeru dobimo induktivnost:

$$L' = L_1 + L_2 + 2 \cdot M_X \quad (7-29)$$

v drugem pa:

$$L'' = L_1 + L_2 - 2 \cdot M_X \quad (7-30)$$

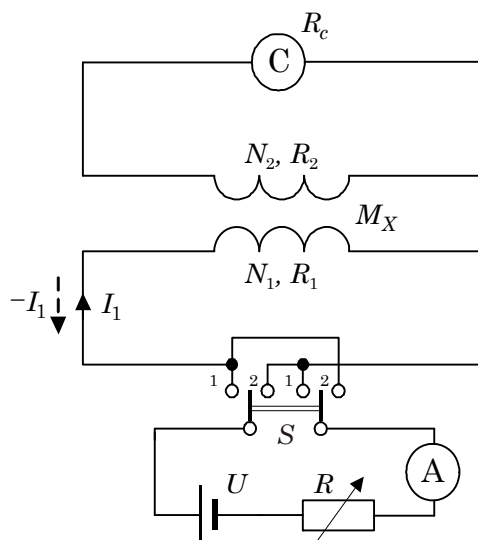
in medsebojno induktivnost:

$$M_X = \frac{L' - L''}{4}. \quad (7-31)$$

V primeru, da ne moremo obrniti sponk druge tuljave, uporabimo postopke s fluksmetrom, coulombmetrom, primerjalno metodo in druge, ki jih najdemo v literaturi.

Merjenje medsebojne induktivnosti s coulombmetrom

Za določanje medsebojne induktivnosti M_X sestavimo vezje na sliki 7-13.



Slika 7-13: Vezje s coulombmetrom za določanje M_X .

Merilno vezje napajamo iz vira U z enosmernim tokom I_1 , ki ga v položaju 1 stikala S nastavimo z uporabo R in izmerimo z ampermetrom. Nato stikalo S preklapimo v položaj 2. Smer toka I_1 skozi tuljavo z N_1 ovoji se spremeni, zato se zaradi spremembe magnetnega pretoka s ϕ na $-\phi$ v tuljavi z N_2 ovoji inducira napetost

$$u_i = -M_X \frac{di_1}{dt}. \quad (7-32)$$

Ta napetost požene tok skozi coulombmeter:

$$i = \frac{u_i}{R_2 + R_C} = -\frac{M_X}{R_2 + R_C} \frac{di_1}{dt}. \quad (7-33)$$

Elektrina, ki jo zmeri coulombmeter pa je:

$$Q = \int i dt = -\int \frac{M_X}{R_2 + R_C} \frac{di_1}{dt} dt = -\frac{M_X}{R_2 + R_C} \int_{I_1}^{-I_1} di_1 = \frac{M_X}{R_2 + R_C} \cdot 2I_1. \quad (7-34)$$

Iz tega izračunamo medsebojno induktivnost:

$$M_X = \frac{Q}{2I_1} (R_2 + R_C). \quad (7-35)$$

Če merimo elektrino na primer z balističnim galvanometrom, jo izračunamo iz znane balistične konstante galvanometra C_b in njegovega odklona α :

$$Q = C_b \cdot \alpha. \quad (7-36)$$

7.3.2 Merjenje kapacitivnosti

Kapacitivnost je snovno-geometrijska lastnost prostora v električnem polju in je neodvisna od električnih veličin. Kapacitivnost se spremeni, če spremenimo geometrijo prostora ali dielektrik med elektrodama. Enota kapacitivnosti je 1 F (farad) = 1 As/V in predstavlja kapacitivnost, ki bi jo imel kondenzator z elektrino 1 As in potencialom 1 V med elektrodami. Kapacitivnost idealnega kondenzatorja je razmerje med tokom in odvodom napetosti na kondenzatorju po času. Realni kondenzator ima zaradi izgub v dielektriku poleg kapacitivnosti še določeno izolacijsko upornost. Zaporedno in vzporedno nadomestno vezje realnega kondenzatorja sta predstavljeni v tabeli 7-1. Pri kondenzatorju določamo tudi *faktor izgub* (tudi *faktor disipacije* d_X) in ga računamo kot tangens izgubnega kota δ_X . Za zaporedno nadomestno vezje je:

$$\operatorname{tg} \delta_X = d_X = \omega \cdot R_s C_s, \quad (7-37)$$

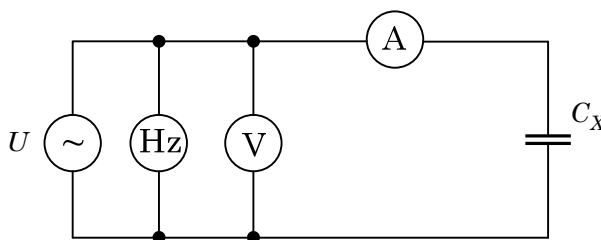
in za vzporedno:

$$\operatorname{tg} \delta_X = d_X = \frac{1}{\omega \cdot R_p C_p}. \quad (7-38)$$

Zaradi odvoda (spremembe) napetosti po času lahko kapacitivnost merimo z izmeničnim signalom ali pa ob prehodnem pojavu, ko se kondenzator polni ali prazni.

U-I metoda merjenja kapacitivnosti

Slika 7-14 predstavlja princip *U-I* metode.



Slika 7-14: *U-I metoda merjenja kapacitivnosti.*

$$Z_X = \frac{U}{I} = \sqrt{R_X^2 + \frac{1}{(\omega \cdot C_X)^2}} = \frac{1}{\omega \cdot C_X} \cdot \sqrt{1 + d_X^2}. \quad (7-39)$$

Pri kakovostnih kondenzatorjih ($\operatorname{tg} \delta < 0,01$) so izgube zanemarljive in enačba se poenostavi

$$Z = \frac{1}{\omega \cdot C_X}. \quad (7-40)$$

Kapacitivnost izračunamo kot:

$$C_X = \frac{I}{\omega \cdot U}. \quad (7-41)$$

Padec napetosti na ampermetru ni v fazi s padcem napetosti na kondenzatorju in zato prinaša manjši pogrešek kot pri U - I metodi merjenja ohmskih upornosti. Metoda ne omogoča visoke točnosti in je primerna za merjenje kapacitivnosti kakovostnih kondenzatorjev. Pri večjih zahtevah po točnosti merjenja kapacitivnosti moramo uporabiti mostična vezja.

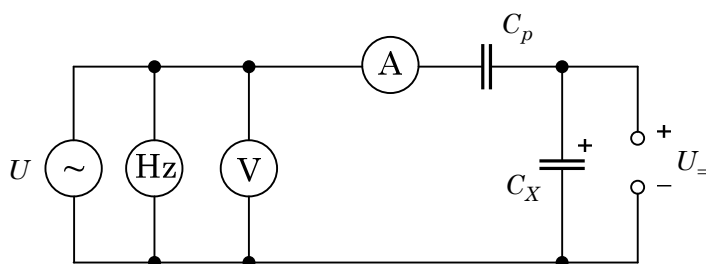
Merjenje kapacitivnosti elektrolitskih kondenzatorjev

Tudi kapacitivnost elektrolitskih kondenzatorjev merimo z U - I metodo. Pozorni moramo biti le na pravilno napetostno polarizacijo. Ko merimo kapacitivnost z izmeničnim tokom in napetostjo, moramo kondenzator priključiti na enosmerno prednapetost, ki bo večja od amplitude izmeničnega signala. Vsota obeh napetosti ne sme biti večja od nazivne napetosti kondenzatorja. Nadomestna kapacitivnost C zaporedno vezanih kondenzatorjev C_p in C_X , ki jo izmerimo s tokom, napetostjo in frekvenco, je:

$$C = \frac{C_p \cdot C_X}{C_p + C_X} = \frac{I}{\omega \cdot U}. \quad (7-42)$$

Iz tega izračunamo neznano kapacitivnost C_X :

$$C_X = \frac{C \cdot C_p}{C_p - C} = \frac{I \cdot C_p}{\omega \cdot U \cdot C_p - I}. \quad (7-43)$$



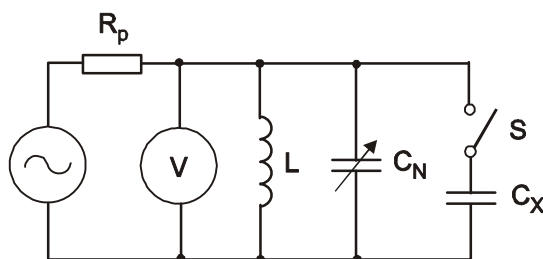
Slika 7-15: Merjenje kapacitivnosti elektrolitskih kondenzatorjev.

Resonančna metoda

Za merjenje kapacitivnosti v visokofrekvenčnem področju je zaradi možnega vpliva parazitnih kapacitivnosti najbolj primerna resonančna metoda, kar je vidno na sliki 7-16.

Pri odprtem stikalu S poiščemo resonanco nihajnega kroga L - C_N . Takrat bo odklon na voltmetru maksimalen. Odčitamo kapacitivnost C_{N1} . Preklopimo stikalo S in s spreminjanjem kapacitivnosti dekade C_N poiščemo resonanco nihajnega kroga L - $C_N \parallel C_X$ ter odčitamo kapacitivnost C_{N2} . Neznano kapacitivnost izračunamo po enačbi

$$C_x = C_{N1} - C_{N2}. \quad (7-44)$$



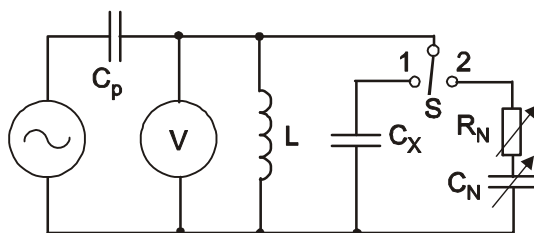
Slika 7-16: Resonančna metoda merjenja kapacitivnosti.

Merjenje izgubnega faktorja kondenzatorja

Izgubni faktor kondenzatorja imenujemo tudi faktor disipacije in ga v primeru zaporednega nadomestnega vezja (tabela 7-1) definiramo kot razmerje padca napetosti na ohmski upornosti kondenzatorja ter padca napetosti na kapacitivni upornosti kondenzatorja. V primeru vzporednega nadomestnega vezja pa definiramo izgubni faktor kot razmerje toka skozi ohmsko upornost kondenzatorja in toka skozi njegovo kapacitivno upornost.

Resonančna metoda merjenja izgubnega faktorja kondenzatorja

Metoda izhaja iz resonančne metode merjenja kapacitivnosti. Predpostavimo, da imamo realni kondenzator z relativno velikimi izgubami. Vezava je podobna kot na sliki 7-16, le da kapacitivni dekadi, za katero predpostavimo zanemarljive izgube, zaporedno dodamo uporovno dekada.



Slika 7-17: Resonančna metoda merjenja izgub kondenzatorja.

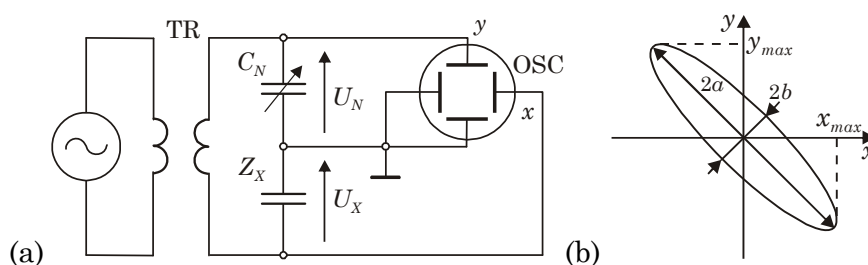
Najprej v položaju 1 spreminjamo frekvenco, dokler ne dobimo največjega odklona na voltmetru, kar pomeni, da smo poiskali resonančno frekvenco nihajnega kroga L - C_x . Nato v položaju 2, pri nespremenjeni frekvenci, ponovno poiščemo resonanco s spreminjanjem kapacitivne in uporovne dekade. Pri tem mora voltmeter pokazati maksimalen in enak odklon kot v položaju ena. Takrat zaporedna vezava R_N in C_N ustreza zaporedni nadomestni vezavi C_x in R_x s pomočjo katerih lahko izračunamo izgubni faktor:

$$\operatorname{tg} \delta_x = \omega_0 \cdot R_x \cdot C_x = \omega_0 \cdot R_N \cdot C_N. \quad (7-45)$$

Merjenje izgubnega faktorja kapacitivnega bremena z osciloskopom

Pri merjenju izgubnega faktorja kapacitivnega bremena Z_X vežemo zaporedno k merjencu kapacitivno normalo z zanemarljivim izgubnim kotom. Na y -odklonske plošče osciloskopa priključimo napetost na kapacitivni normalni na x -odklonske plošče pa negativno napetost na merjencu. Frekvenca obeh padcev napetosti je enaka, le med seboj sta fazno premaknjena. Na zaslonu se pojavi elipsa. Čim večji je fazni kot, tem večja je ploščina elipse. V primeru fazne premaknitve 90° (in enakih napetosti ter ojačenj na osciloskopu) bi dobili na zaslonu krog. Izgubni faktor izračunamo po enačbi:

$$\operatorname{tg} \delta_X = \frac{a \cdot b}{x_{\max} \cdot y_{\max}}. \quad (7-46)$$



Slika 7-18: Merjenje izgubnega faktorja kapacitivnega bremena Z_X z osciloskopom. Vezje (a) in izris elipse (b).

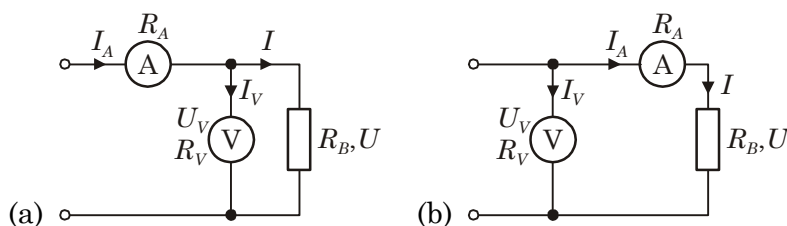
7.4 Merjenje moči

7.4.1 Merjenje moči v enosmernih sistemih

Moč bremena priključenega na enosmerno napetost U in enosmerni tok I lahko posredno določimo z merjenjem teh dveh veličin. Moč bremena izračunamo s produktom

$$P = U \cdot I \quad (7-47)$$

Ker lahko merilna instrumenta, voltmeter in ampermeter, vključimo v vezje na dva različna načina, podrobneje pogledjmo, kaj je treba storiti, da bo merjenje čim kakovostnejše.



Slika 7-19: Merjenje moči enosmernega bremena.

Moč bremena R_B je v obeh primerih

$$P_B = U \cdot I. \quad (7-48)$$

V primeru po sliki 7-19a je iz izmerjenih vrednosti napetosti in toka dobljena moč

$$P_i = U_V \cdot I_A. \quad (7-49)$$

Ker pa je $U_V = U$ in $I_A = I + I_V = I + \frac{U_V}{R_V} = I + \frac{U}{R_V}$ dobi izraz za P_i obliko

$$P_i = U \left(I + \frac{U}{R_V} \right) = U \cdot I + \frac{U^2}{R_V} = P_B + \frac{U^2}{R_V}. \quad (7-50)$$

Torej je izmerjena moč P_i nekoliko večja, kot je iskana moč bremena P_B .

Če vzamemo, da je izmerjena moč P_i , moč bremena pa P_B , napravimo sistematski relativni pogrešek e , ki je imenovan tudi pogrešek merilne metode:

$$e = \frac{P_i - P_B}{P_B} = \frac{U \cdot I + \frac{U^2}{R_V} - U \cdot I}{U \cdot I} = \frac{U}{R_V \cdot I} = \frac{R_B}{R_V}. \quad (7-51)$$

Pogrešek merilne metode je pozitiven in tem manjši, čim večji je tok bremena in čim nižja je napajalna napetost, oziroma čim manjša je upornost bremena R_B glede na upornost voltmetra R_V .

V primeru po sliki 7-19b je izmerjena moč:

$$P_i = U_V \cdot I_A. \quad (7-52)$$

Ker je $I_A = I$ in $U_V = U + I_A \cdot R_A$, dobi izraz za P_i obliko:

$$P_i = (U + I \cdot R_A) \cdot I = U \cdot I + I^2 \cdot R_A = P_B + I^2 \cdot R_A. \quad (7-53)$$

Tudi tokrat je izmerjena moč P_i nekoliko večja, kot je moč bremena P_B .

Določimo še pogrešek merilne metode e , če vzamemo, da je izmerjena moč P_i , moč bremena pa P_B :

$$e = \frac{P_i - P_B}{P_B} = \frac{U \cdot I + I^2 \cdot R_A - U \cdot I}{U \cdot I} = \frac{I^2 \cdot R_A}{U \cdot I} = \frac{I \cdot R_A}{U} = \frac{R_A}{R_B}. \quad (7-54)$$

Pogrešek merilne metode je pozitiven in je tem manjši, čim manjši je tok bremena in čim višja je napetost na bremenu, oziroma čim večja je upornost R_B glede na upornost ampermetra R_A .

S podobno analizo lahko pojasnimo tudi merjenje moči v enosmernih sistemih z vatmetrom. Več o tem je podano v poglavju o merjenju delovne moči v enofaznih sistemih.

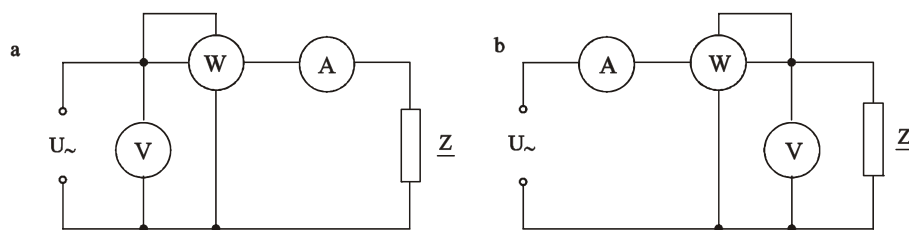
7.4.2 Merjenje delovne moči v enofaznih sistemih

V enofaznih izmeničnih sistemih najpogosteje merimo delovno moč P . Za področje nižjih frekvenc je praviloma uporabljen instrument vatmeter, ki je lahko elektrodinamični, elektronski odklonski ali digitalni. Razen moči ob teh merjenjih merimo tudi tok in napetost, predvsem zaradi kontrole obremenitve tokovne in napetostne veje vatmetra, saj velja:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi, \quad (7-55)$$

kar pomeni, da lahko vatmeter kaže malo vrednost moči, kljub temu pa je mogoče, da je ena ali druga veja (tuljava) že močno preobremenjena. Posledica je lahko poškodba te veje in potem instrument ni več uporaben.

Pri merjenju majhnih moči je potrebna korekcija zaradi porabe merilnih instrumentov. Zato je važno, katero vrsto merilnega vezja izberemo. Nekoliko ugodneje je, če opravimo korekcijo s podatki napetostnih vej, ki so pogostejše na razpolago, kot podatki tokovnih vej. Za primer si oglejmo dve različni vezji.



Slika 7-20: Primera priključitve instrumentov pri merjenju moči.

Delovno moč P porabnika $\underline{Z}$ v primeru a določimo z izrazom:

$$P = P_W - I^2 (R_{tW} + R_A). \quad (7-56)$$

Torej smo od moči, ki jo izmeri vatmeter, odšteli porabo tokovne veje vatmetra in ampermetra. Če pa predpostavimo, da je

$$P_W \approx P, \quad (7-57)$$

napravimo sistematski pogrešek:

$$e = \frac{P_W - P}{P}, \quad (7-58)$$

katerega vrednost se da izračunati in na osnovi tega odločiti, če je taka poenostavitev sprejemljiva.

V primeru b pa izračunamo delovno moč P porabnika $\underline{Z}$ z izrazom

$$P = P_W - U^2 \left(\frac{1}{R_{nW}} + \frac{1}{R_V} \right). \quad (7-59)$$

Od moči, ki jo izmeri vatmeter, smo odšteli porabo napetostne veje vatmetra in voltmetra, sistematski pogrešek pa izračunamo kot v primeru a.

Mogoče pa je ugotoviti, da je ob $P_W \approx P$ sistematski pogrešek dovolj majhen z vezavo a, kadar so manjši tokovi in višje napetosti, z vezavo b pa, kadar so večji tokovi in nižje napetosti. Seveda pa ostaja v veljavi tudi osnovna zahteva o čim večji notranji upornosti napetostnih vej in nizki upornosti tokovnih vej. Zaradi lažje ocenitve upornosti napetostnih vej v praksi pogostejše srečamo vezje b.

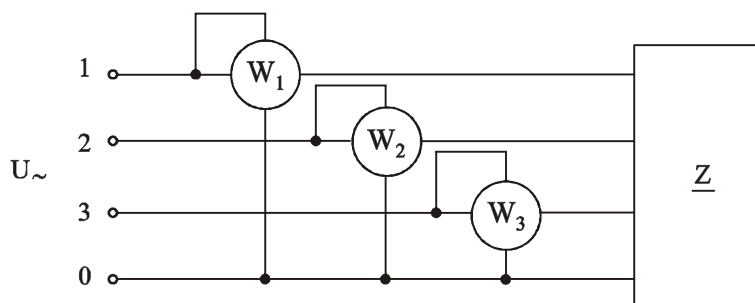
Posebno pazljivi moramo biti tudi pri merjenju delovne moči bremen z nizkim $\cos \varphi$. Če uporabljamo vatmeter s podatkom $\cos \varphi_W = 1$, kar pomeni, da instrument pokaže polno (končno) vrednost pri nazivni napetosti in toku ter $\cos \varphi = 1$, je pri nizkem $\cos \varphi$ porabnika kazanje vatmetra zelo malo, kar pa povzroča veliko merilno negotovost ne glede na vrsto instrumenta. V takem primeru je potrebno uporabiti vatmetre, ki pokažejo polno vrednost pri nižjih $\cos \varphi$, npr. $\cos \varphi_W = 0,1$ ali $0,2$, pa celo pri $\cos \varphi_W = 0,05$.

7.4.3 Merjenje delovne moči v trifaznih sistemih

V trifaznih sistemih s štirimi vodniki s tremi faznimi in nevtralnimi je obremenitev v posameznih fazah najpogostejše različna. Zato se sme uporabiti le metoda s tremi vatmetri, pri čemer so tokovne veje instrumentov vključene v fazne vodnike, napetostne pa na ustrezne fazne napetosti. Tako meri vsak vatmeter delovno moč svoje faze, vsota njihovih moči pa je delovna moč v sistemu:

$$P = P_{W1} + P_{W2} + P_{W3}. \quad (7-60)$$

Slika 7-21 prikazuje vezalno shemo za ta primer.



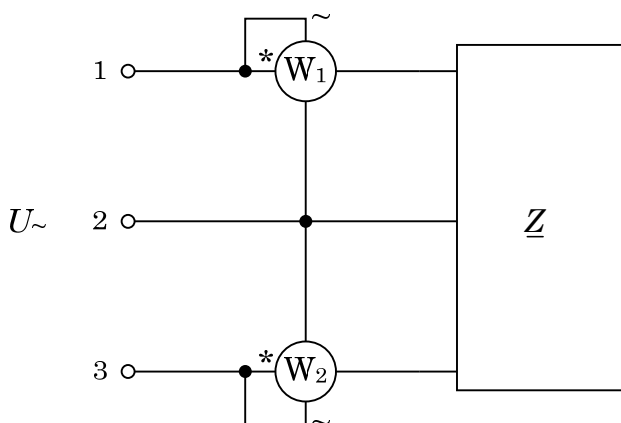
Slika 7-21: Vezje za merjenje moči s tremi W-metri.

Le v primeru simetrične obremenitve je mogoče meriti z enim vatmetrom v eni fazi in je $P = 3P_W$.

Možno je tudi preklapljanje enega vatmetra iz ene v drugo in tretjo fazo in nato seštevanje vseh treh moči, vendar pa v takem primeru ni več zagotovljena istočasnost meritve v vseh fazah. Vse spremembe moči med preklapljanjem se odrazijo na končnem merilnem rezultatu, ki ga ni mogoče vezati na določen trenutek opazovanja sistema.

Vezavo s tremi vatmetri lahko uporabimo tudi v sistemih brez nevtralnega vodnika, vendar je treba v tem primeru z dodatno vezavo ustvariti umetno ničlišče.

V sistemih s tremi faznimi vodniki, kjer ni nevtralnega vodnika, pa lahko uporabimo tudi vezavo z dvema vatmetroma oziroma Aronovo vezavo. Porabnik je lahko simetričen ali pa ne. Način priključitve je naslednji: tokovni veji vatmetrov, upoštevati moramo njun začetek in konec, vežemo v dve fazi, napetostni veji pa z začetkom (npr. oznaka $\sim$) priključimo na fazni vodnik, v katerem je tokovna veja, konca napetostnih vej pa na fazni vodnik, kjer ni vatmetra. Slika 7-22 prikazuje primer vezave.



Slika 7-22: Aronova vezava.

Ni pomembno, v kateri fazi vežemo vatmetra, le priključitev mora biti skladna z navedenim načinom.

Pojasnimo merjenje z Aronovo vezavo. Vsota trenutnih moči v posameznih fazah je skupna moč trifaznega sistema:

$$p = u_1 \cdot i_1 + u_2 \cdot i_2 + u_3 \cdot i_3. \quad (7-61)$$

Ker ni nevtralnega vodnika, velja v vsakem trenutku:

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0 \text{ in zato } i_2 = -(i_1 + i_3). \quad (7-62)$$

Zato je trenutna moč:

$$\begin{aligned} p &= u_1 \cdot i_1 + u_2 \cdot (-(i_1 + i_3)) + u_3 \cdot i_3 = \\ &= u_1 \cdot i_1 - u_2 \cdot i_1 - u_2 \cdot i_3 + u_3 \cdot i_3 = \\ &= i_1 \cdot (u_1 - u_2) + i_3 \cdot (u_3 - u_2) = i_1 \cdot u_{12} + i_3 \cdot u_{32}. \end{aligned} \quad (7-63)$$

Vatmetra sta priključena ustrezno temu izrazu, kažeta pa srednjo vrednost obeh sumandov. Zato lahko zapišemo:

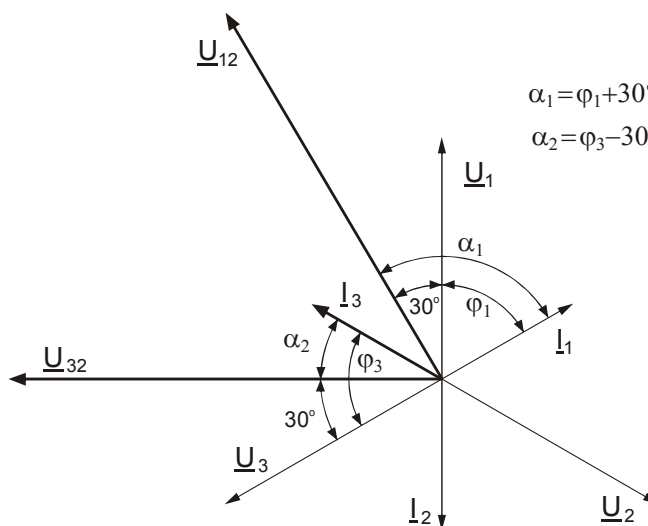
$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^T i_1 \cdot u_{12} \cdot dt + \frac{1}{T} \int_0^T i_3 \cdot u_{32} \cdot dt. \quad (7-64)$$

Pri sinusnih veličinah dobimo:

$$P = I_1 \cdot U_{12} \cdot \cos \alpha_1 + I_3 \cdot U_{32} \cdot \cos \alpha_2 \text{ oziroma} \quad (7-65)$$

$$P = P_{W1} + P_{W2}. \quad (7-66)$$

Kazalčni diagram za neko poljubno ohmsko induktivno breme je prikazan na sliki 7-23.



Slika 7-23: Kazalčni diagram pri R-L bremenu.

Glede na to lahko opazujemo izraz za delovno moč P trifaznega sistema tudi v obliki:

$$P = I_1 \cdot U_{12} \cos(\varphi_1 + 30^\circ) + I_3 \cdot U_{32} \cos(\varphi_3 - 30^\circ). \quad (7-67)$$

Nekoliko enostavneje je opazovanje dogajanj za simetrične porabnike, torej pri vrednostih:

$$I_1 = I_2 = I_3 = I \quad U_{12} = U_{23} = U_{32} = U \quad \varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \varphi \quad \text{in}$$

$$P = U \cdot I \cdot \cos(\varphi + 30^\circ) + U \cdot I \cdot \cos(\varphi - 30^\circ). \quad (7-68)$$

Vatmetra bosta pokazala enako moč pri $\varphi = 0^\circ$:

$$P_1 = P_2 = U \cdot I \cdot \cos 30^\circ$$

$$\cos 30^\circ = \cos(-30^\circ), \quad (7-69)$$

v vseh drugih primerih pa različno. Pri $\varphi = 60^\circ$ bo prvi vatmeter kazal nič, ker je

$$\cos(\varphi + 30^\circ) = \cos 90^\circ = 0 \text{ in je } P = P_2, \quad (7-70)$$

pri kotih $\varphi > 60^\circ$ pa je kazanje prvega vatmetra negativno in je treba skupno moč določiti z izrazom:

$$P = P_2 - P_1. \quad (7-71)$$

Praktično pa v teh primerih postopamo tako: vežemo po osnovni vezalni shemi, če sta po priključitvi kazanji obeh vatmetrov pozitivni, rezultata seštejemo. Če eden od obeh vatmetrov pokaže negativno, pomeni, da je $\varphi > 60^\circ$ (prvi vatmeter pri ohmsko induktivnem porabniku, drugi pri ohmsko kapacitivnem porabniku). Pri kazalčnih instrumentih zamenjamo napetostne sponke tega vatmetra (v breznapetostnem stanju!!) in njegovo kazanje (zaradi zamenjave sedaj pozitivno) odštejemo od kazanja drugega vatmetra. Pri digitalnih vatmetrih je predznak izpisan na številčnici.

Velja torej naslednji način izračuna celotne delovne moči P :

	$R - L$ porabnik	$R - C$ porabnik	
$\varphi < 60^\circ$	$P = P_1 + P_2$	$P = P_1 + P_2$	· (7-72)
$\varphi = 60^\circ$	$P = P_2 (P_1 = 0)$	$P = P_1 (P_2 = 0)$	
$\varphi > 60^\circ$	$P = P_2 - P_1$	$P = P_1 - P_2$	

Iz navedenih izrazov lahko takoj ugotovimo, da merilna negotovost moči P narašča pri porabnikih, ki so pretežno jalovi, torej pri nizkem $\cos \varphi$; posebej tudi zato, ker za določitev končnega rezultata uporabimo odštevanje.

7.4.4 Merjenje jalove moči s tremi vatmetri

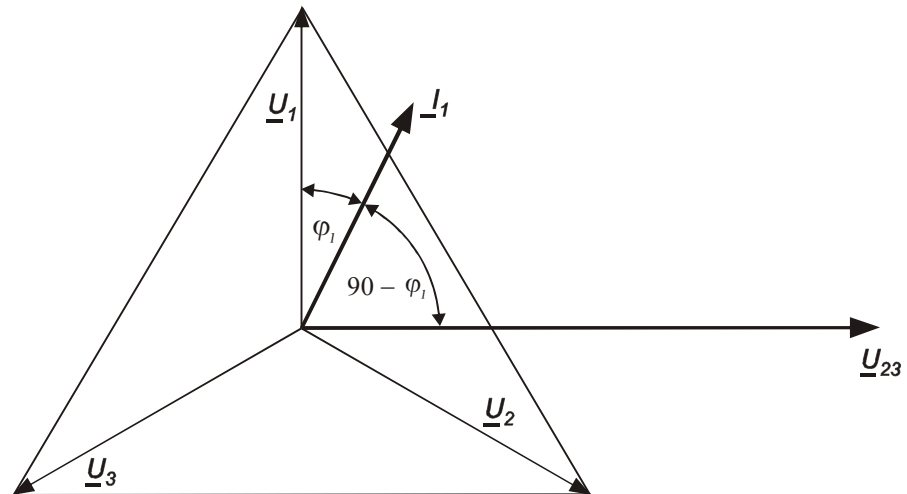
Jalovo moč lahko v trifaznem sistemu merimo s tremi vatmetri vendar tako, da njihove napetostne veje priključimo na ustrezne medfazne napetosti.

Izhajamo iz tega, da je delovna moč v eni fazi $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$, kar nam pokaže tudi vatmeter, če je U fazna napetost, I linijski tok te faze in φ kot med njima.

Za jalovo moč pa velja izraz

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi = U \cdot I \cdot \cos(90^\circ - \varphi). \quad (7-73)$$

Če na primer napetostno vejo vatmetra priključimo na napetost, ki je za 90° premaknjena proti fazni napetosti, bo rezultat njegovega kazanja jalova moč. V trifaznem sistemu s simetričnim trikotnikom napetosti pa že imamo take napetosti. Za fazno napetost U_1 je to medfazna napetost U_{23} .



Slika 7-24: Kazalčni diagram za prvo fazo.

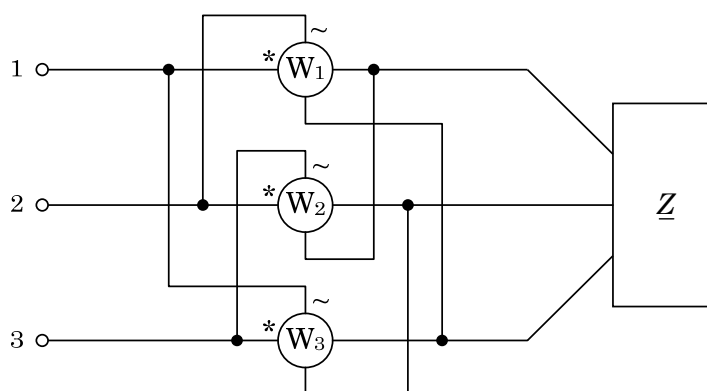
Ker pa je medfazna napetost za $\sqrt{3}$ večja od fazne, kazanje vatmetrov delimo s tem faktorjem. Jalova moč prve faze je torej

$$Q_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} P_{W_1}, \quad (7-74)$$

jalova moč trifaznega bremena pa

$$Q = \frac{1}{\sqrt{3}} (P_{W_1} + P_{W_2} + P_{W_3}). \quad (7-75)$$

Metoda je uporabna tako v sistemih s tremi kot tudi v sistemih s štirimi vodniki.



Slika 7-25: Merjenje jalove moči s tremi vatmetri.

7.4.5 Merjenje jalove moči z Aronovo vezavo

Z enakim vezjem in instrumenti lahko v trifaznem sistemu izmerimo tudi jalovo moč Q porabnika Z . Vzemimo primer simetričnega sistema z ohmsko induktivnim porabnikom in tvorimo razliko izmerjenih moči obeh vatmetrov:

$$\begin{aligned}
 \Delta P &= P_2 - P_1 = U \cdot I \cdot \cos(\varphi - 30^\circ) - U \cdot I \cdot \cos(\varphi + 30^\circ) = \\
 &= UI(\cos \varphi \cos 30^\circ + \sin \varphi \sin 30^\circ) - UI(\cos \varphi \cos 30^\circ - \sin \varphi \sin 30^\circ) = \\
 &= UI(\cos \varphi \cos 30^\circ + \sin \varphi \sin 30^\circ - \cos \varphi \cos 30^\circ + \sin \varphi \sin 30^\circ) = \\
 &= 2 \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi \sin 30^\circ = U \cdot I \cdot \sin \varphi.
 \end{aligned}$$

(7-76)

Jalova moč simetričnega porabnika je

$$\begin{aligned}
 Q &= \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi, \text{ oziroma} \\
 Q &= \sqrt{3} \cdot \Delta P \text{ in} \\
 Q &= \sqrt{3} \cdot (P_2 - P_1).
 \end{aligned}$$

(7-77)

Tudi v tem primeru pride pri $\varphi > 60^\circ$ do sprememb smeri (predznaka) kazanja enega vatmetra, kar je odvisno od vrste porabnika in velja naslednja tabela za izračun jalove moči:

	$R-L$ porabnik	$R-C$ porabnik
$\varphi < 60^\circ$	$Q = \sqrt{3} \cdot (P_2 - P_1)$	$Q = \sqrt{3} \cdot (P_1 - P_2)$
$\varphi = 60^\circ$	$Q = \sqrt{3} \cdot P_2$	$Q = \sqrt{3} \cdot P_1$
$\varphi > 60^\circ$	$Q = \sqrt{3} \cdot (P_2 + P_1)$	$Q = \sqrt{3} \cdot (P_1 + P_2)$

(7-78)

7.4.6 Merjenje delovne moči z osciloskopom

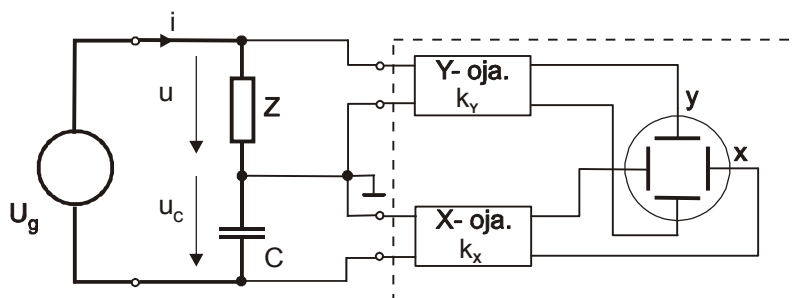
Tak način merjenja je uporabljan za merjenje malih delovnih moči samo pri izmeničnem napajanju. Tok in napetost ne smeta imeti enosmerne komponente, ni pa nujno, da sta sinusna. Merilno vezje je na sliki 7-26.

Tok čez kondenzator je enak toku bremena in je:

$$i(t) = C \frac{du_c(t)}{dt}, \quad (7-79)$$

hkrati pa je delovna moč:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot C \frac{du_c(t)}{dt} \cdot dt = f \cdot C \cdot \oint u \cdot du_c. \quad (7-80)$$



Slika 7-26: Vezje za merjenje delovne moči z osciloskopom.

Pojav se periodično ponavlja, zadnji izraz vsebuje integral po sklenjeni poti l . Obe napetosti izmerimo z osciloskopom:

$$u = u_y = k_y \cdot y \quad (7-81)$$

$$u_c = -u_x = -k_x \cdot x \Rightarrow du_c = -k_x \cdot dx. \quad (7-82)$$

Z upoštevanjem enačb (7-81) in (7-82) izraz za moč (7-80) preoblikujemo v obliko

$$P = -f \cdot C \cdot k_x \cdot k_y \cdot \oint_l y \cdot dx. \quad (7-83)$$

Ker pa velja

$$\oint_l y \cdot dx = -\oint_l x \cdot dy, \quad (7-84)$$

izračunamo delovno moč z enačbo

$$P = f \cdot C \cdot k_x \cdot k_y \cdot A, \quad (7-85)$$

kjer je A je ploščina lika, ki jo omejuje sklenjena krivulja l . Če sta tok in napetost sinusne oblike, dobimo na zaslonu elipso, sicer pa ne.

7.5 Magnetna merjenja

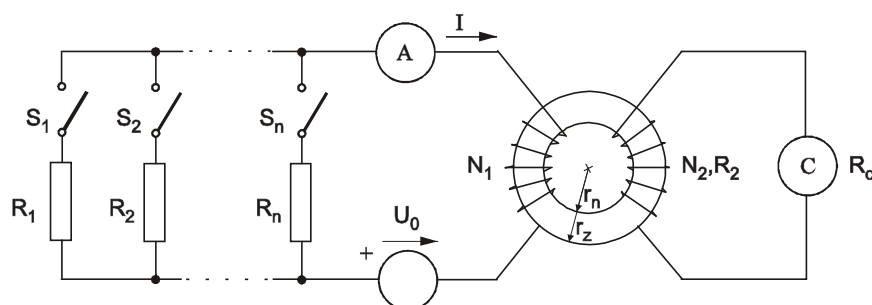
Merilne metode, s katerimi določamo lastnosti feromagnetnih snovi, so zelo pomembne, saj dobimo z njimi osnovne podatke, ki služijo za izračun in konstrukcijo predvsem električnih strojev in drugih naprav. Največkrat se pri teh merjenjih določajo poteki deviških in komutacijskih magnetilnic, statičnih in dinamičnih histereznih zank in izgube v feromagnetnih snoveh pri izmeničnem magnetiziranju. Dosegljive točnosti pri teh merjenjih so bistveno slabše kot pri merjenju električnih veličin. Zato je več vzrokov, posebno pa izstopata dva:

- tehnološke težave pri izdelavi merilnih naprav in pripomočkov, kjer je nemogoče popolnoma odpraviti vse tehnične pomanjkljivosti in
- lastnosti merjenja oziroma preizkušane materiala, ki so zelo odvisne od načina obdelave materiala (smer valjanja, rezanje, zvijanje), vplivnih veličin (temperatura, mehanske napetosti) ter malih sprememb v istem proizvodnem postopku.

Zato je težko podati zanesljive merilne rezultate za večjo količino feromagnetnega materiala z meritvijo na omejenem vzorcu. Meja pogreška je pri teh merjenjih v splošnem v območju nekaj odstotkov.

7.5.1 Snemanje statične magnetilnice

Kadar želimo ugotoviti potek deviške magnetilnice, moramo preizkušeni material predhodno razmagnetiti (doseči $B = 0$ in $H = 0$), nato pa sestavimo vezje z enosmernim napajalnim virom in v opisanem primeru balističnim galvanometrom (coulombmetrom oziroma merilnikom količine elektrine Q) ter nekaj ostalimi elementi (upori, navitji, ampermetrom, stikali) in seveda merjencem. Ta je v tem primeru oblikovan v obroč (toroid), kar je ugodno za potek silnic (mala stresanja), neugodno pa za namestitev navitij.



Slika 7-27: Vezje za snemanje statične magnetilnice s coulombmetrom.

Z zaporednim vklopjanjem stikal S_1 do S_n povečujemo tok I z I_1 do I_n in magnetno poljsko jakost H od H_1 do H_n . V k -ti točki je ta:

$$H_k = \frac{I_k N_1}{l_{sr}}. \quad (7-86)$$

Srednjo dolžino silnic l_{sr} izračunamo z enačbo:

$$l_{sr} = 2\pi \frac{r_z + r_n}{2}. \quad (7-87)$$

Če pa je razlika polmerov toroida $(r_z - r_n) \gg \frac{1}{5} r_z$ pa z enačbo:

$$l_{sr} = 2\pi \frac{r_z - r_n}{\ln \left(\frac{r_z}{r_n} \right)}. \quad (7-88)$$

Pri vsakokratni spremembi toka se spremeni tudi magnetni pretok skozi presek A merjenca, ki v navitju N_2 inducira napetostni impulz $u_i = -N_2 A \frac{dB}{dt}$, katerega posledica je tokovni impulz:

$$i = \frac{u_i}{R_2 + R_c} = -\frac{N_2 A}{R_2 + R_c} \frac{dB}{dt}. \quad (7-89)$$

Ploščina tokovnega impulza je količina elektrine Q ,

$$Q = \int i dt \text{ oziroma}$$

$$Q = \int_{B_{k-1}}^{B_k} -\frac{N_2 A}{R_2 + R_c} dB = \frac{N_2 A}{R_2 + R_c} \Delta B_k. \quad (7-90)$$

Ker pa z balističnim galvanometrom to količino elektrine izmerimo, $Q = c_b \alpha$, je

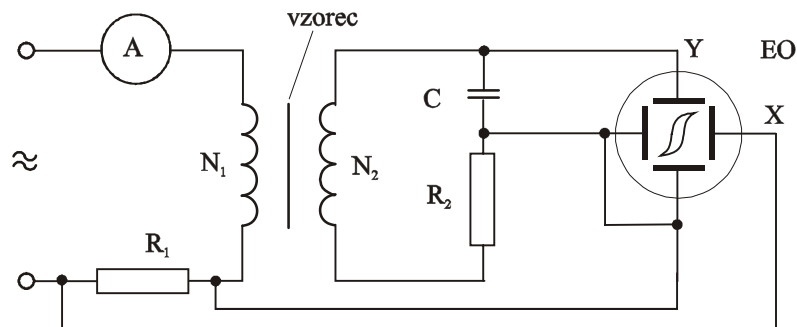
$$c_b \alpha = \frac{N_2 A}{R_2 + R_c} \Delta B_k \text{ in} \quad (7-91)$$

$$\Delta B_k = \frac{c_b \alpha}{N_2 A} (R_2 + R_c). \quad (7-92)$$

Točke za krivuljo dobimo postopoma od prve do n -te točke, vklopljenih uporov ne izklapljam oziroma meritve ne smemo prekiniti. Če meritev prekinemo, moramo feromagnetni material ponovno razmagnetiti in začeti s prvo merilno točko.

7.5.2 Snemanje dinamične histerezne zanke z osciloskopom

Ta metoda, ki sicer ne zagotavlja visoke točnosti, je zaradi svoje enostavnosti uporabljana predvsem za hitra kontrolna merjenja in za pogonska merjenja. Merilno vezje je prikazano na sliki 7-28.



Slika 7-28: Vezje za snemanje dinamične histerezne zanke z osciloskopom.

Zaporedno s primarnim (magnetilnim) navitjem z N_1 ovoji je vezan upor R_1 . Na njem nastaja pri izmeničnem napajanju padec napetosti u_{R1} , ki je proporcionalen magnetilnemu toku i_1 , saj je

$$u_{R1} = i_1 R_1. \quad (7-93)$$

V vzorcu je tedaj magnetna poljska jakost $H = \frac{i_1 N_1}{l}$, pri čemer je l dolžina vzorca. Horizontalni odklon na osciloskopu je sorazmeren magnetni poljski jakosti in velja:

$$u_{R1} = \frac{R_1 l}{N_1} H = k_H H. \quad (7-94)$$

Sekundarno navitje (indukcijsko) z N_2 ovoji je zaključeno z zaporedno vezavo kondenzatorja C in ohmskega upora R_2 $\gg \frac{1}{\omega C}$.

Zato čez njiju teče tok $i_2 \approx \frac{U_{i2}}{R_2}$. Inducirana napetost u_{i2} pa je

$$u_{i2} = -N_2 A \frac{dB}{dt}, \text{ tok } i_2 \text{ pa} \quad (7-95)$$

$$i_2 = -\frac{N_2 A}{R_2} \frac{dB}{dt}. \quad (7-96)$$

Na kondenzatorju C je napetost, ki jo lahko izrazimo z

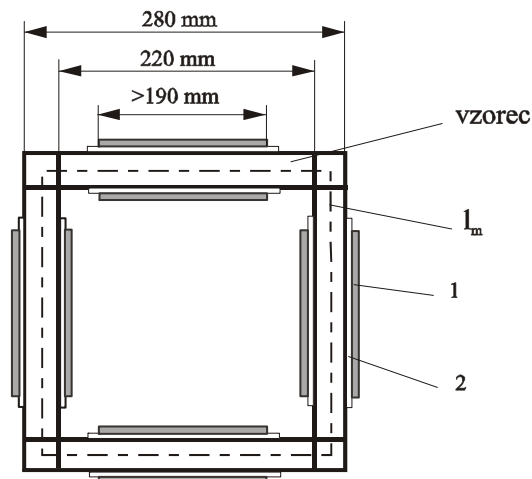
$$u_C = -\frac{N_2 A}{R_2 C} B = k_H B. \quad (7-97)$$

Torej je potek te napetosti proporcionalen magnetni gostoti B in jo vodimo na sistem osciloskopa za vertikalno odklanjanje elektronskega snopa.

Napajalno napetost običajno nastavljamo z regulacijskim transformatorjem. Če jo ustrezno spreminjamo, dobimo večje število histereznih zank. S povezovanjem njihovih vrhov dobimo dinamično (komutacijsko) magnetilnico.

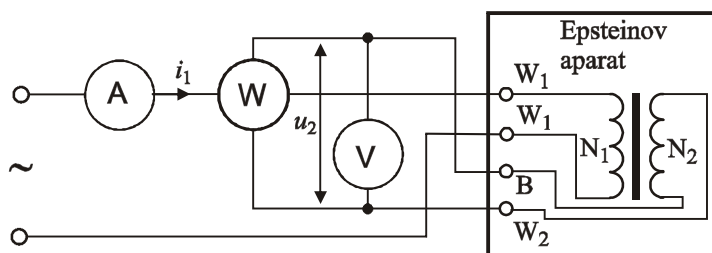
7.5.3 Merjenje izgub v feromagnetikih z Epsteinovim aparatom

Epsteinov aparat in merjenje izgub z njim je mednarodno standardizirano, posamezne države so to metodo prevzele v svoje nacionalne standarde. Metoda se imenuje tudi vatmetrična, ker je uporabljen za merjenje izgub vatmeter. Mali Epsteinov aparat je prikazan na naslednji sliki.



Slika 7-29: Konstrukcija malega Epsteinovega aparata.

Sestavljen je iz štirih dvojno navitih tuljav, nameščenih v obliki kvadrata. Tuljave 1 so magnetilne, tuljave 2 pa indukcijske, njihova dolžina ne pokriva celotnega vzorca. Vse štiri magnetilne tuljave so vezane zaporedno, prav tako vse štiri indukcijske. Število ovojev je enako in sicer $4 \times 175 = 700$ ovojev. V tuljave vlagamo feromagnetno pločevino v trakovih dolžine 280 mm in širine 30 mm, tako da se v vogalih prekrivajo. Zato pride do dvojnega preseka vzorca v vogalih glede na presek v ostalem delu vzorca. To neenakost korigiramo pri izračunu specifičnih izgub z upoštevanjem tako imenovane reducirane mase. Shema je na sliki 7-30.



Slika 7-30: Vezje za merjenje izgub z Epsteinovim aparatom.

Skozi ampermeter in tokovno vejo vatmetra teče tok i_1 , na voltmetru in napetostni veji vatmetra je napetost u_2 . Zato bo vatmeter pokazal

$$P_w = \frac{1}{T} \int_0^T u_2 i_1 dt. \quad (7-98)$$

Napetost u_2 pa je

$$u_2 = u_{i2} - i_2 R_2, \quad (7-99)$$

pri čemer je R_2 upornost sekundarnega (indukcijskega) navitja. Iz tega sledi:

$$u_2 = u_{i2} - \frac{u_{i2}}{R_p + R_2} R_2 = u_{i2} \frac{R_p}{R_2 + R_p} \quad (7-100)$$

$$R_p = \frac{R_{nw} R_v}{R_{nw} + R_v}.$$

Ker sta števili ovojev N_1 in N_2 enaki, velja tudi $u_{i2} = u_{i1}$ in lahko zapišemo

$$P_w = \frac{R_p}{R_2 + R_p} \frac{1}{T} \int_0^T u_{i1} i_1 dt. \quad (7-101)$$

Izraz $\frac{1}{T} \int_0^T u_{i1} i_1 dt$ predstavlja celotno moč v vezju, to so izgube v

železu P_{Fe} in moč P_2 na sekundarni strani. Ta je $P_2 = \frac{U_2^2}{R_p} (R_p + R_2)$

in sledi:

$$P_w = \frac{R_p}{R_2 + R_p} (P_{Fe} + P_2) = \frac{R_p}{R_2 + R_p} (P_{Fe} + \frac{U_2^2}{R_p} (R_p + R_2)) \quad \text{in} \quad (7-102)$$

$$P_{Fe} = \frac{R_2 + R_p}{R_p} (P_w - \frac{U_2^2}{R_p}). \quad (7-103)$$

Ker je praviloma $R_2 \ll R_p$, se ta izraz lahko poenostavi v obliko

$$P_{Fe} = P_w - \frac{U_2^2}{R_p}. \quad (7-104)$$

Meritve izgub opravimo pri določenih vrednostih magnetnih gostot v vzorcu, običajno pri 1 T in 1,5 T. Magnetno gostoto določamo tako da izhajamo iz inducirane napetosti $u_{i2} = 4k_0 N_2 f A B$ v sekundarnem navitju; izmerjena napetost pa mora biti:

$$U_2 = \frac{4k_0 N_2 f A B_m}{1 + \frac{R_2}{R_p}}. \quad (7-105)$$

V enačbi za U_2 mora biti upoštevan čisti presek A feromagnetnega vzorca, ki ga določimo iz specifične mase ρ ter mase m , ki jo dobimo s tehtanjem:

$$A = \frac{m}{4l\rho}. \quad (7-106)$$

Končni merilni rezultat so specifične izgube p_{Fe} . Te dobimo z izrazom

$$p_{Fe} = \frac{P_{Fe}}{m^*}; \quad (7-107)$$

m^* je reducirana masa, ki jo dobimo iz dejanske mase vzorca m , pomnožene z izkustvenim korekcijskim faktorjem $k = 0,94$, torej

$$m^* = km. \quad (7-108)$$

Pri merjenju z Epsteinovim aparatom prihaja do nekaterih vplivov, ki znižajo točnost merjenja. Pri točnejših merjenjih zato nekatere teh vplivov korigiramo. Naštejmo jih nekaj:

1. sekundarna (indukcijska) navitja zajemajo razen magnetnega pretoka skozi vzorec tudi pretok v zračni reži med vzorcem in navitjem, kar je posebej moteče pri nizkih magnetnih gostotah nasičenja; potrebna je korekcija izračunane magnetne gostote;
2. vpliv popačenja inducirane napetosti: če ni sinusnega magnetnega pretoka, je treba izgube preračunati za sinusno obliko;
3. vpliv neenakomernega magnetiziranja: ker so navitja tuljav krajša od vzorca, so vogali slabše magnetizirani;
4. vpliv temperature, ki vpliva na velikost izgub zaradi vrtničnih tokov;
5. vpliv mehanskih napetosti v vzorcu, ki lahko povečajo izgube tudi do 10 %; zato je treba vzorec ustrezno pripraviti za merjenje.

7.5.4 Ločevanje izgub v feromagnetikih

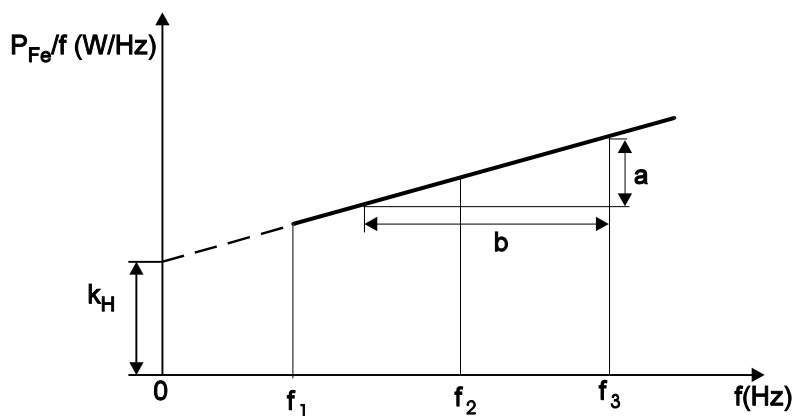
Včasih se srečamo z zahtevo o ločenih podatkih za histerezne izgube in izgube zaradi vrtničnih tokov. V ta namen lahko izkoristimo odvisnost obojih izgub od frekvence. Merjenje izgub izvedemo pri različnih frekvencah, vendar pri isti magnetni gostoti in faktorju oblike. Upoštevamo enačbo

$$P_{Fe} = P_H + P_V = k_H f + k_V f^2. \quad (7-109)$$

Vrednost koeficientov k_H in k_V ugotovimo tako, da zgornjo enačbo izrazimo v obliki

$$\frac{P_{Fe}}{f} = k_H + k_V f. \quad (7-110)$$

Razmerje $\frac{P_{Fe}}{f}$ vnesemo v diagram v odvisnosti od frekvence, kar prikazuje slika 7-31.



Slika 7-31: Grafično ločevanje izgub na P_H in P_V .

Z ekstrapoliranjem na $f = 0$ Hz ugotovimo vrednost koeficienta k_H , koeficient k_V pa dobimo iz naklona premice

$$k_V = \frac{a}{b}. \quad (7-111)$$

Pri merjenju z Epsteinovim aparatom izračunamo obojne specifične izgube z izrazoma

$$p_H = \frac{P_H}{m^*} \text{ in } p_V = \frac{P_V}{m^*} \quad (7-112)$$

za neko iskano frekvenco in določeno magnetno gostoto.

Priloga A: Seznam najpogostejše uporabljenih oznak in kratic

E	absolutni pogrešek
e	relativni pogrešek
$e\%$	relativni pogrešek v %
E_m	meja absolutnega pogreška
e_m	meja relativnega pogreška
r	razred merilne naprave
d	standardna deviacija
s	eksperimentalni standardni odmik
u	merilna negotovost, trenutna napetost
u'	relativna merilna negotovost
m, max	maksimalno
i	trenutni tok
eff	efektivno
min	minimalno
ref	referenčno
r, rel	relativno
$\approx$	približno
U_1, U_2, U_3	fazne napetosti
I_1, I_2, I_3	linijski tokovi
$U_{12}, U_{13}, \dots$	medfazne napetosti
L_1, L_2, L_3, L_0	linije (faze, nevtralni vodnik)
$\underline{Z}$	kompleksna impedanca
Z	modul impedance
$\underline{S}$	kompleksna moč
λ	faktor moči ($\lambda = \frac{P}{S}$) pri sinusnem toku in napetosti $\lambda = \cos \varphi$
ξ	kotni pogrešek merilnega transformatorja
p	prestavno razmerje merilnega transformatorja
OIML	Organisation Internationale de Métrologie Légale, (International Organization of Legal Metrology, Mednarodna organizacija za zakonsko meroslovje)
BIPM	Bureau International des Poids et Mesures (International Bureau of Weights and Measures, Mednarodni urad za uteži in mere)
SI	Système International d'Unités (International System of Units, Mednarodni sistem enot)
MIRS	Urad RS za meroslovje (Metrology Institute of the Republic of Slovenia)
ISO	International Organization for Standardization (Mednarodna organizacija za standardizacijo)
IEC	International Electrotechnical Commission (Mednarodna elektrotehniška komisija)
SIST	Slovenski inštitut za standardizacijo (Slovenian Institute for Standardization)

Priloga B: Oznake in enote nekaterih veličin

<i>Velčina</i>	<i>Oznaka</i>	<i>Enota</i>
dolžina	l, L	m
masa	m	kg
čas	t	s
električni tok	I	A
termodin. temp.	T	K
svetilnost	I	cd
množina snovi	n	mol
Celzijeve temp.	t	°C (1 °C = 1 K)
napetost	U	V (1 V = 1 W/1 A)
količina elektrine	Q	C (1 C = 1 As)
kapacitivnost	C	F (1 F = 1 C/1 V)
induktivnost	L	H (1 H = 1 Vs/1 A)
medsebojna indukt.	M	H
impedanca	Z	Ω
upornost	R	Ω (1 Ω = 1 V/1 A)
reaktanca	X	Ω
frekvenca	f	Hz (1 Hz = 1 s ⁻¹)
trajanje periode	T	s
kotna hitrost	ω	rad/s
delovna moč	P	W (1 W = 1 VA)
jalova moč	Q	VAr (1 VAr = 1 W)
navidezna moč	S	VA (1 VA = 1 W)
fazni kot	φ	rad (1 rad = 180°/π)
magnetna gostota	B	T (1 T = 1 Vs/m ²)
magnetna poljska jakost	H	A/m
magnetni pretok	ϕ	Wb

Priloga C: Slovar nekaterih osnovnih izrazov

analogni merilni instrument

Merilni instrument, pri katerem je izhodni signal ali zvezna funkcija merjene veličine ali vhodnega signala.

detektor

Naprava ali snov, ki kaže prisotnost nekega pojava, ne da bi nujno dajala tudi vrednost pripadajoče veličine.

digitalni merilni instrument

Merilni instrument, ki daje digitaliziran izhodni signal ali prikaz.

dogovorna prava vrednost (veličine)

Vrednost, pripisana določeni veličini, ki je včasih z dogovorom sprejeta kot tista vrednost, ki ima za dani namen primerno negotovost.

eksperimentalni standardni odmik

Za niz N meritev iste merjene veličine veličina s , ki označuje raztros rezultatov in je podana z obrazcem

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}}$$

kjer je x_i rezultat i -te meritve in $\bar{x}$ aritmetična srednja vrednost N upoštevanih rezultatov.

(merska) enota

Dogovorno določena in sprejeta veličina, s katero se primerjajo druge istovrstne veličine, da bi izrazili njihovo velikost glede na to veličino.

etalon

Opredmetena mera, merilni instrument, referenčni material ali merilni sistem, katerega namen je, da definira, realizira, ohranja ali reproducira neko enoto ali eno ali več vrednosti veličine, tako da služi kot referenca.

umerjanje, kalibracija

Niz operacij za ugotavljanje povezave med vrednostmi, ki jih kaže merilni instrument ali merilni sistem, oziroma vrednostmi, ki jih predstavlja opredmetena mera ali referenčni material, in pripadajočimi vrednostmi, realiziranimi z etaloni, pod določenimi pogoji.

prikazovalni (merilni) instrument

kazalni (merilni) instrument

Merilni instrument, ki kaže vrednost.

korekcija, popravek

Vrednost, ki algebrsko prišteta k nekorigiranemu merilnemu rezultatu kompenzira sistematični pogrešek.

lezenje

Počasna sprememba meroslovnih značilnosti merilnega instrumenta.

ločljivost (prikazovalne naprave)

Najmanjša razlika med kazanji prikazovalne naprave, ki jo je še mogoče razločiti.

mednarodni sistem enot, SI

Koherentni sistem enot, ki ga je sprejela in priporočila Generalna konferenca za uteži in mere (CGPM).

merilna metoda

Logično zaporedje generično opisanih operacij, ki se uporabljajo pri merjenju.

merilna natančnost

Ujemanje kazanj ali vrednosti merjene veličine dobljenih s ponovljenimi meritvami na istem ali podobnem objektu pod določenimi pogoji [8].

merilna negotovost

Parameter, ki je povezan z merilnim rezultatom in označuje raztros vrednosti, ki jih je mogoče upravičeno pripisati merjeni veličini.

merilna točnost, točnost merjenja

Ujemanje merilnega rezultata s pravo vrednostjo merjene veličine.

(merilni) pogrešek

Merilni rezultat minus prava vrednost merjene veličine.

merilni postopek

Niz posebej opisanih operacij, ki se uporabljajo pri izvajanju določenih merjenj v skladu z dano metodo.

merjeni signal

Veličina, ki predstavlja merjeno veličino in je z njo funkcijsko povezana.

merilni sistem

Komplet merilnih instrumentov in druge opreme, zbranih za določene meritve.

merilno načelo

Znanstvena podlaga merjenja.

merjenje, meritev

Niz operacij, da se ugotovi vrednost veličine.

merjena veličina

Določena veličina, ki se jo meri.

meroslovje

Veda o merjenju.

naključni pogrešek

Komponenta merilnega pogreška, ki se pri več merjenjih iste merjene veličine spreminja na nepredvidljiv način.

naravnavanje, justiranje (merilnega instrumenta)

Postopek s katerim se merilni instrument pripravi za delovanje, ki ustreza njegovi uporabi.

občutljivost

Razmerje med spremembo odziva merilnega instrumenta in pripadajočo spremembo vhodnega signala.

odzivni čas

Časovni presledek med trenutkom, ko se pojavi določena nenadna sprememba vhodnega signala, in trenutkom, ko odziv doseže določene meje okrog končne ustaljene vrednosti in ostane v njih.

pogrešek v kontrolni točki (merilnega instrumenta)

Pogrešek merilnega instrumenta pri določenem kazanju ali določeni vrednosti merjene veličine, izbrani za preverjanje merilnega instrumenta.

prava vrednost (veličine)

Vrednost, ki ustreza definiciji določene veličine.

razred točnosti

Razred merilnih instrumentov, ki izpolnjujejo določene meroslovne zahteve, katerih namen je, da ostanejo pogreški v določenih mejah.

referenčni pogoji

Pogoji uporabe, ki so predpisani za preskušanje merilnega instrumenta ali za medsebojno primerjavo merilnih rezultatov.

relativni pogrešek

Merilni pogrešek, deljen s pravo vrednostjo merjene veličine.

senzor

Element merilnega instrumenta ali merilne verige, ki je neposredno pod vplivom merjene veličine.

sistematični pogrešek

Srednja vrednost, ki bi jo dobili iz neskončnega števila meritev iste merjene veličine, pod pogoji ponovljivosti, minus prava vrednost merjene veličine.

sledljivost

Lastnost meritvenega rezultata ali vrednosti etalona, ki omogoča navezavo na navedene reference, ponavadi nacionalne ali mednarodne etalone, skozi neprekinjeno verigo primerjav, ki imajo opredeljeno negotovost.

točnost merilnega instrumenta

Sposobnost merilnega instrumenta, da so njegovi odzivi blizu prave vrednosti.

(merljiva) veličina

Lastnost pojava, telesa ali snovi, ki se lahko razlikuje kakovostno in ugotavlja količinsko.

vplivna veličina

Veličina, ki ni merjena veličina, vendar vpliva na rezultat merjenja.

Literatura

- [1] Mikola L., Golob M., *Meritve: merilne metode in laboratorijske vaje*, 3. dopolnjena izdaja, UM FERI Maribor, 2004.
- [2] Bergelj F., *Osnove meritev*, 5. dopolnjena izdaja, FE Ljubljana, 2000.
- [3] Bego V., *Mjerenja u elektrotehnici*, TK Zagreb 1990.
- [4] Schrüfer E., *Elektrische Meßtechnik*, Hanser Verlag, München, 1988.
- [5] Becker W.-J., Bonfig K. W., Höing K., *Handbuch Elektrische Meßtechnik*, 2. überarbeitete Auflage, Heidelberg, 2000.
- [6] Patzelt R., Schweinzer H., *Elektrische Meßtechnik*, Springer Verlag Wien, New York 1996.
- [7] *Mednarodni slovar osnovnih in splošnih izrazov s področja meroslovja*, Urad za standardizacijo in meroslovje, Ljubljana, 1999.
- [8] *International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM)*, 3rd edition, JCGM 200:2008
- [9] SIST ISO 31-5, *Quantities and units – Part 5: Electricity and magnetism*, Second edition 1992-11-01.
- [10] *Merilna negotovost*, A13, Urad za standardizacijo in meroslovje RS, Ljubljana, 1996.
- [11] *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, ISO, First edition, 1995.

ISBN 978-961-248-182-7



9 789612 481827