

UNIVERZA V MARIBORU

---

FAKULTETA ZA ELEKTROTEHNIKO,  
RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

LADISLAV MIKOLA  
BOJAN GERGIČ

**MERITVE**  
**ZAPISKI PREDAVANJ**  
(nerecenzirano delovno gradivo s popravki)



MARIBOR, 2008

CIP – katalogni zapis o publikaciji  
Univerzitetna knjižnica Maribor

[CIP številka]

[Avtor]  
[Naslov publikacije/avtor, kraj, založnik]

[ISBN]  
[Naslov knjižne zbirke in ISSN številka]

[COBISS-ID]

Naslov:	Meritve: zapiski predavanj
Avtor:	Ladislav Mikola, Bojan Gergič
Strokovni recenzenti:	
Jezikovni recenzenti:	
Tehnični recenzenti:	
Oblikovanje slik:	Miloš Vute
Tipologija publikacije:	2.05 Drugo učno gradivo
Založnik:	UM FERI
Kraj založbe:	Maribor
Datum izida:	1.10.2008
Različica:	R 1.0 beta
URL:	
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 in le tako bo izpolnjen namen najinega dela.

Zahvaljujemo 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 2008



## Vsebina

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

4.1.1	<i>Izhodna stopnja ojačevalnika</i>	32
4.2	Operacijski ojačevalniki	33
4.2.1	<i>Povratna zveza pri operacijskih ojačevalnikih</i>	34
4.2.2	Operacijski tokovno napetostni ojačevalnik (i/u)	36
	<i>Izvedbe i/u ojačevalnikov</i>	37
	<i>Inverter</i>	37
	<i>Seštevalnik</i>	37
	<i>Odštevalnik</i>	37
	<i>Korenjenje</i>	38
	<i>Integrator</i>	38
	<i>Diferenciator</i>	38
4.2.3	<i>Primeri vezij z operacijskimi ojačevalniki</i>	38
	<i>Analogni množilnik</i>	38
	<i>Impulzni množilnik</i>	39
	<i>Tvorba efektivne vrednosti izmenične napetosti</i>	40
4.3	Merilni pretvorniki	41
4.3.1	<i>Analogno digitalna pretvorba merilnega signala</i>	41
	<i>Merjenje časa</i>	41
	<i>Merjenje frekvence</i>	42
	<i>AD pretvorba u/t z enojno žagasto napetostjo</i>	43
	<i>AD pretvorba u/t z dvojn timerom</i>	44
	<i>AD pretvorba u/f</i>	47
4.3.2	<i>Digitalno analogna pretvorba merilnega signala</i>	48
	<i>DA pretvornik z R-2R uporovno lestvico</i>	49
4.4	Merilni transformatorji	50
4.5	Pretvorba neelektričnih v električne veličine	54
4.5.1	<i>Uporovni termometri</i>	54
4.5.2	<i>Raztezni merilni lističi</i>	55
4.5.3	<i>Induktivni merilni pretvorniki</i>	56
4.5.4	<i>Kapacitivni merilni pretvorniki</i>	56
4.5.5	<i>Termoelektrični merilni pretvorniki (termopretvorniki, termoelementi)</i>	57
4.5.6	<i>Piezoelektrični pretvorniki</i>	58
4.5.7	<i>Indukcijski merilni pretvorniki</i>	58
<b>5.</b>	<b>MERILNI INSTRUMENTI IN NAPRAVE</b>	<b>59</b>
5.1	Analogni (odklonski) merilni instrumenti	59
5.1.1	<i>Statične razmere v merilnem sistemu</i>	59
5.1.2	<i>Dinamične razmere v merilnem sistemu</i>	61
5.1.3	<i>Instrument z vrtljivo tuljavico</i>	63
	<i>Razširitev merilnega območja IVT</i>	64
	<i>Instrument z vrtljivo tuljavico za merjenje izmeničnih veličin</i>	66
	<i>IVT s polprevodniškim usmernikom</i>	66
	<i>Instrument z vrtljivo tuljavico s termopretvornikom</i>	68
5.1.4	<i>Instrument z vrtljivim železom</i>	68
5.1.5	<i>Elektrodinamični instrument</i>	71
5.1.6	<i>Indukcijski instrument</i>	74
5.2	Analogni elektronski voltmetri	76
5.2.1	<i>Enosmerni elektronski voltmeter</i>	76
	<i>Enosmerni elektronski voltmeter z enosmernim ojačevalnikom</i>	76
	<i>Enosmerni elektronski voltmeter z izmeničnim ojačevalnikom</i>	77
5.2.2	<i>Izmenični elektronski voltmeter</i>	79
5.3	Problematika ozemljenega vhoda elektronskih merilnih instrumentov	81
5.4	Digitalni merilni instrumenti	82
5.4.1	<i>Digitalni voltmeter</i>	83
5.4.2	<i>Digitalni števec električne energije</i>	83

5.5	Osciloskop .....	84
5.5.1	Posebne izvedbe osciloskopov .....	88
	Vzorčevalni osciloskop .....	88
	Digitalni osciloskop .....	89
5.5.2	Uporaba elektronskega osciloscopa .....	91
<b>6.</b>	<b>MOSTIČNA IN KOMPENZACIJSKA VEZJA .....</b>	<b>93</b>
6.1	Merilni mostiči .....	93
6.1.1	Wheatstonov mostič .....	93
	Odklonski Wheatstonov mostič .....	94
	Občutljivost in meja pogreška mostiča .....	96
	Dimenzioniranje elementov mostiča .....	97
6.1.2	Thomsonov mostič .....	99
6.1.3	Izmenični merilni mostiči .....	100
	Wienov mostič .....	102
	Sheringov mostič .....	103
	Maxwellov mostič .....	104
	Maxwell-Wienov mostič .....	105
	Resonančni mostič .....	106
6.2	Enosmerni kompenzatorji .....	106
6.2.1	Osnovna kompenzacijska vezja .....	106
	Poggendorffovo vezje .....	107
	Lindeck-Rothejevo vezje .....	107
6.2.2	Občutljivost in merilna negotovost kompenzacijskega vezja .....	108
6.2.3	Samodejno digitalno kompenzacijsko vezje .....	109
6.3	Izmenični kompenzatorji .....	110
6.3.1	Kompleksni kompenzator .....	110
<b>7.</b>	<b>MERJENJE ELEKTRIČNIH VELIČIN .....</b>	<b>113</b>
7.1	Merjenje toka in napetosti .....	113
7.1.1	Merjenje toka .....	113
7.1.2	Merjenje napetosti .....	114
7.1.3	Merjenje izmeničnih tokov in napetosti .....	115
	Merjenje temenske vrednosti izmenične napetosti .....	115
7.2	Merjenje upornosti .....	116
7.2.1	Splošno o merjenju upornosti .....	116
7.2.2	Upornost priključnih vodnikov in stične upornosti .....	116
7.2.3	Merjenje notranje upornosti aktivnih dvopolov .....	117
7.2.4	Merilne metode za merjenje upornosti .....	118
	Merjenje upornosti z voltmetrom in tokovnim virom .....	118
	U-I metoda merjenja upornosti .....	118
	Primerjalni metodi merjenja upornosti .....	119
	Merjenje velikih upornosti .....	120
7.3	Merjenje induktivnosti in kapacitivnosti .....	121
7.3.1	Merjenje induktivnosti .....	121
	Merjenje medsebojne induktivnosti .....	124
7.3.2	Merjenje kapacitivnosti .....	126
	U-I metoda merjenja kapacitivnosti .....	126
	Merjenje kapacitivnosti elektrolitskih kondenzatorjev .....	127
	Resonančna metoda .....	127
	Merjenje izgubnega faktorja kondenzatorja .....	128
	Resonančna metoda merjenja izgubnega faktorja kondenzatorja .....	128
	Merjenje izgubnega faktorja kapacitivnega bremena z osciloskopom .....	129
7.4	Merjenje moči .....	129
7.4.1	Merjenje moči v enosmernih sistemih .....	129
7.4.2	Merjenje delovne moči v enofaznih sistemih .....	131
7.4.3	Merjenje delovne moči v trifaznih sistemih .....	132

7.4.4 Merjenje jalove moči s tremi vatmetri.....	136
7.4.5 Merjenje jalove moči z Aronovo vezavo.....	137
7.4.6 Merjenje delovne moči z osciloskopom.....	137
7.5 Magnetna merjenja.....	139
7.5.1 Snemanje statične magnetilnice.....	139
7.5.2 Snemanje dinamične histerezne zanke z osciloskopom	140
7.5.3 Merjenje izgub v feromagnetikih z Epsteinovim aparatom.....	142
7.5.4 Ločevanje izgub v feromagnetikih.....	144
<b>PRILOGA A: SEZNAM NAJPOGOSTEJE UPORABLJANIH OZNAK .....</b>	<b>147</b>
<b>PRILOGA B: OZNAKE IN ENOTE NEKATERIH VELIČIN.....</b>	<b>149</b>
<b>PRILOGA C: SLOVAR NEKATERIH OSNOVNIH IZRAZOV .....</b>	<b>151</b>
<b>LITERATURA.....</b>	<b>155</b>



## 1. UVOD

---

Merjenje je dejavnost, ki človeka spremlja praktično neprestano, skoraj dobesedno 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. In 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.

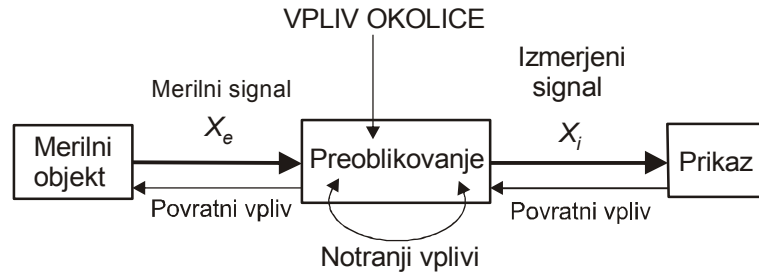
Merjenje je osnovna dejavnost v vseh področjih naravoslovja, torej tudi v tehniki. Meritev je osnova napredka teorije in potrditev tehnične realizacije tega napredka. Kakor vse ostale znanosti, je tudi merjenje v neprestanem razvoju. Pojavljajo se nove naprave, nove metode, nova računalniška orodja. 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 naslednji sliki.



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

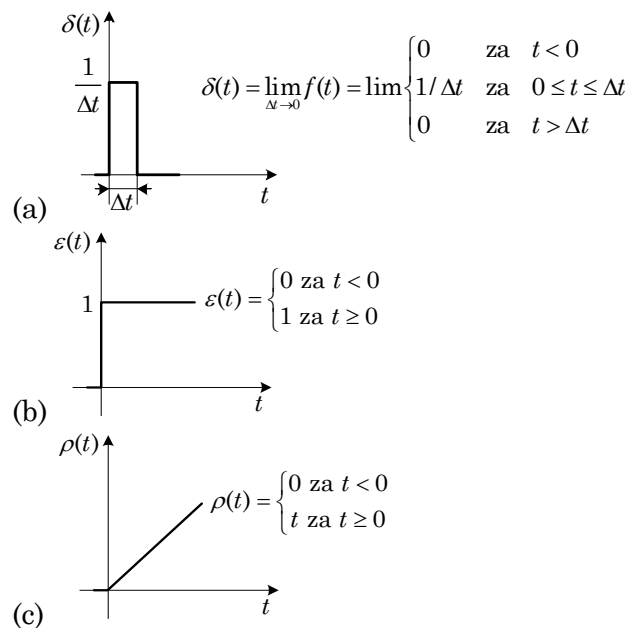
## 1.2 Merilni signali

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.

Osnovna delitev signalov je naslednja:

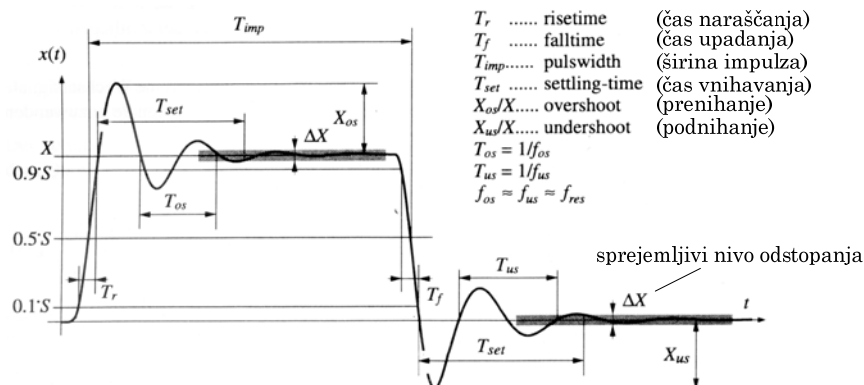
- DETERMINISTIČNI - enolično določeni za vsak  $t$
- STOHAŠTIČNI - naključni
- PERIODIČNI -  $x(t - T) = x(t)$
- APERIODIČNI - neperiodični, včasih ni nihajočega dela
- STACIONARNI - s časom ne spreminjajo statističnih lastnosti
- STANOVITNI - časovno konstantni

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 naslednji sliki predstavljamo nekatere karakteristične parametre signala. Tak je lahko potek električnega toka ob vklopu električne naprave in njenem izklopu.



**Slika 1-3:** Nekateri karakteristični parametri signala.

### 1.3 Merjenje neelektričnih veličin

Električna merjenja imajo poseben pomen tudi zato, ker se različni efekti fizikalnih neelektričnih veličin lahko preoblikujejo v električne veličine. Taka pretvorba se izvede z detektorji in senzorji za različne neelektrične merjene veličine, na primer s termoelementi, z uporavnimi 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.

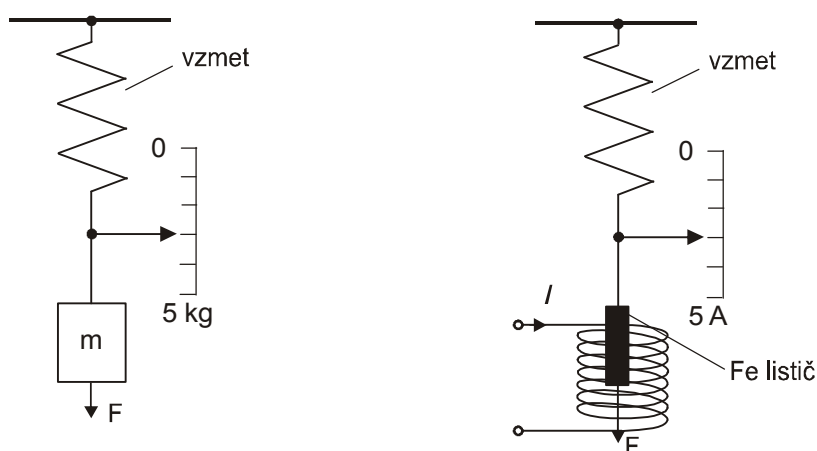
### 1.4 Osnovni postopki merjenj električnih veličin

Za določanje vrednosti merjene električne veličine poznamo dva osnovna postopka:

- kazalni postopek in
- izravnalni postopek.

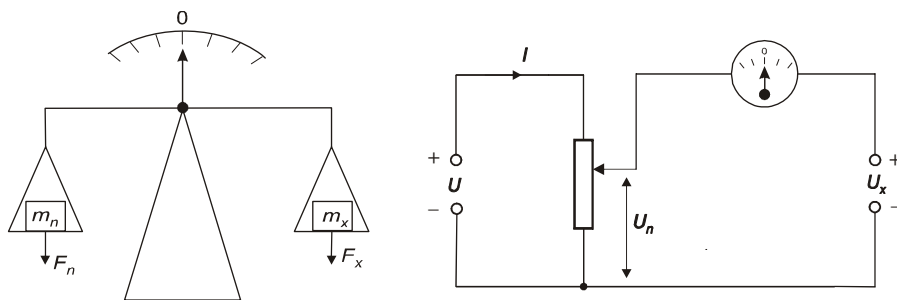
Pri kazalnem postopku uporabljamo za merjenje merilne instrumente, prirejene za merjenje posameznih električnih veličin, na primer voltmetre, ampermetre, vatmetre. Pri elektromehanskih (analognih) instrumentih najprej merjeno veličino pretvorimo v mehansko veličino in to primerjamo z merilom, skalo, ki je prej umerjena z merjenjem znane veličine in na kateri odčitamo merilni rezultat. Tako merjenje je manj točno. Delovanje teh instrumentov lahko primerjamo 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 števec pretvorimo v numerični (številčni) podatek, ki ga

odčitamo na prikazovalniku. Ti instrumenti 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 popolnoma izenačimo z neznano, kar ugotovimo z ničelnim indikatorjem. Ta vrsta merjenja se imenuje kompenzacijsko merjenje in omogoča visoko točnost, je manj občutljiva za 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 jasno, za kaj gre. V našem primeru bi se lahko postavilo vprašanje, ali je to srednja, efektivna ali temenska 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 A in 25,2 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 seveda upoštevati.

Mednarodno urejanje meroslovja se dogaja 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), katerega sedež je 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 elektrotehniko (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 inštitucija 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. Seveda pa ne v standardizacijskih, kjer deluje Slovenski inštitut za standardizacijo (SIST), ki sicer z delom svoje dejavnosti tudi posega 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 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, vendar 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 samo 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 <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>
prostornina	kubični meter	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
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 <sup>2</sup> )
energija, delo, toplota	joule	J	kg·m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
električna upornost	ohm	Ω	kg·m <sup>2</sup> /(s <sup>3</sup> ·A <sup>2</sup> )
kapacitivnost	farad	F	A <sup>2</sup> ·s <sup>4</sup> /(kg·m <sup>2</sup> )
induktivnost	henry	H	kg·m <sup>2</sup> /(A <sup>2</sup> ·s <sup>2</sup> )
magnetni pretok	weber	Wb	kg·m <sup>2</sup> /(A <sup>2</sup> ·s <sup>2</sup> )
moment sile	newtonmeter	N·m	kg·m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
kotna hitrost	radian na sekundo	rad/s	m/(m·s) = 1/s
permeabilnost	henry na meter	H/m	kg·m/(A <sup>2</sup> ·s <sup>2</sup> )

**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		Faktor	Predpona	
	Ime	Simbol		Ime	Simbol
10 <sup>24</sup>	jota	Y	10 <sup>-1</sup>	deci	d
10 <sup>21</sup>	zeta	Z	10 <sup>-2</sup>	centi	c
10 <sup>18</sup>	eksa	E	10 <sup>-3</sup>	mili	m
10 <sup>15</sup>	peta	P	10 <sup>-6</sup>	mikro	μ
10 <sup>12</sup>	tera	T	10 <sup>-9</sup>	nano	n
10 <sup>9</sup>	giga	G	10 <sup>-12</sup>	piko	p
10 <sup>6</sup>	mega	M	10 <sup>-15</sup>	femto	f
10 <sup>3</sup>	kilo	k	10 <sup>-18</sup>	ato	a
10 <sup>2</sup>	hekto	h	10 <sup>-21</sup>	zepto	z
10 <sup>1</sup>	deka	da	10 <sup>-24</sup>	jokto	y

Nekaj primerov:

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

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

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

### 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 <sup>3</sup> = 10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> = 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> ,
			1 l = 1 dm <sup>3</sup> = 10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> = 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
ravninski kot	stopinja	°	1° = ( $\pi / 180$ ) rad
masa	tona	t	1 t = 10 <sup>3</sup> kg
tlak	bar	bar	1 bar = 10 <sup>5</sup> 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 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 delitev je delitev v mednarodne etalone in nacionalne etalone. Mednarodni etalon je z mednarodnim dogovorom priznana podlaga za ugotavljanje

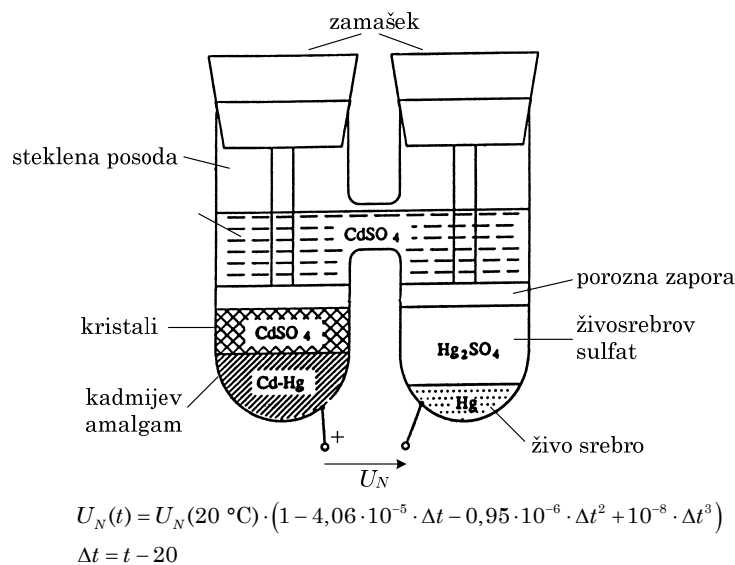
vrednosti drugih etalonov določene veličine. Nacionalni etalon pa je z državnim odlokom priznana podlaga za ugotavljanje vrednosti drugih etalonov te veličine v državi. Druga delitev je še izraziteje povezana s kakovostjo etalonov. Največjo meroslovno kakovost ima primarni etalon, katerega vrednost je 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, na primer, se 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 težka 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 trajno 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  $10^{-6}$ .



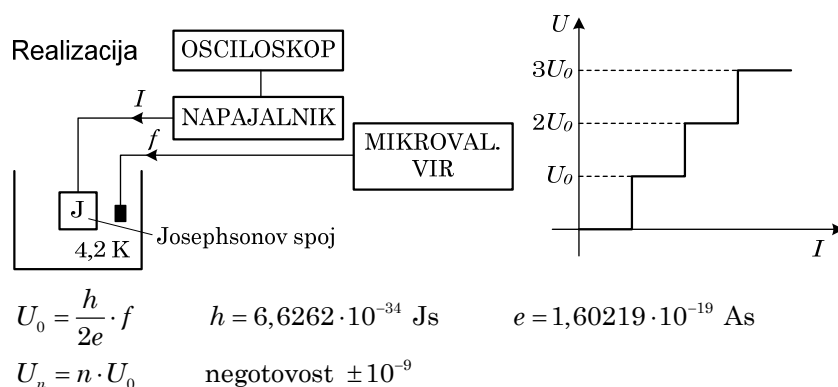
**Slika 2-1:** Westonov etalon napetosti.

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 GHz. Če ta spoj napajamo z večanjem enosmernega toka, nastaja na njem stopničasto naraščajoči padeč napetosti.



**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  $K_{J-90} = 483.597,9 \text{ GHz/V}$ .

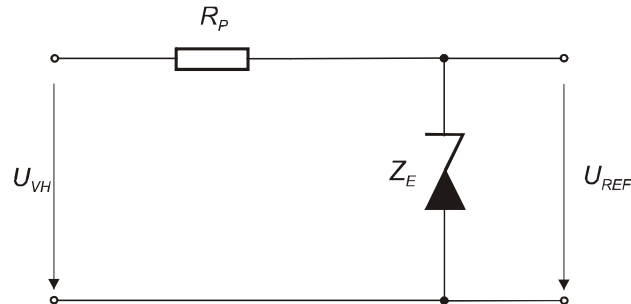
Ker je napetost enega spoja nizka, na primer pri 100 GHz okoli 200  $\mu\text{V}$ , je potrebno veliko število zaporedno vezanih spojev za etalon 1 V in 10 V.

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.

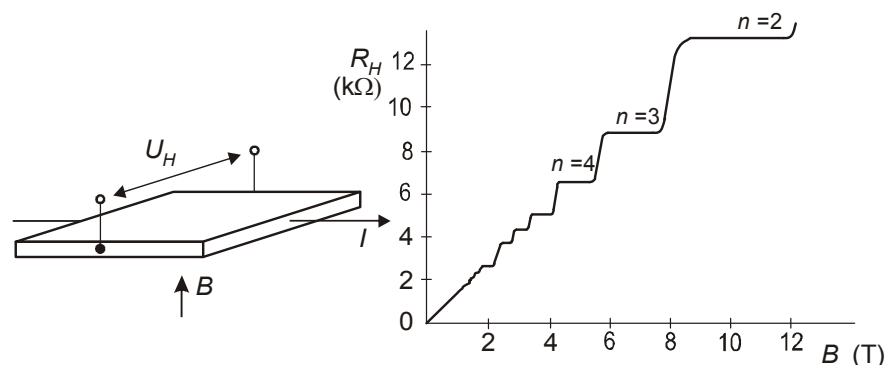
### Kvantni Hallov etalon upornosti

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

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

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,  $K_K = 25.812,807 \Omega$



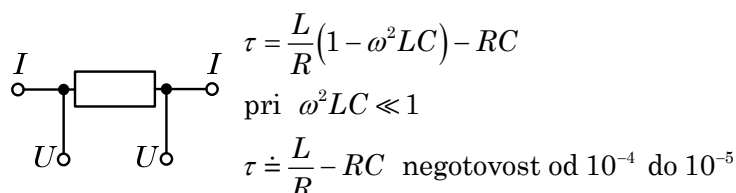
**Slika 2-4:** Karakteristika kvantiziranega Hallovega upora.

Upornost zavzame v takih razmerah določen diskretni nivo, določljiv z visoko točnostjo, negotovost 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  $1 M\Omega$ . Negotovost je okoli  $10^{-4}$  do  $10^{-5}$ . Spadajo v razred sekundarnih etalonov.



*Slika 2-5: Materialni etalon upornosti.*

### 2.2.2 Promet z merili

Promet z merili je izraz v zakonu o meroslovju in pomeni, da morajo vsa merila, ki gredo v promet, ustrezati meroslovnim predpisom, kar se potrди 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

---

Cilj 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 merenj merjene veličine.

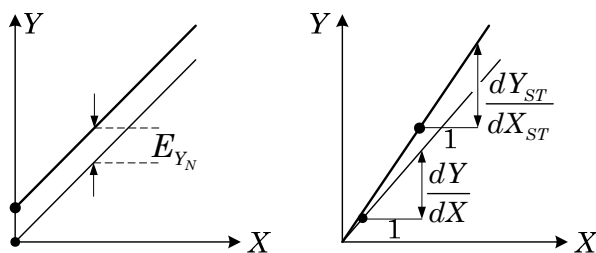
#### 3.1 Vrste pogreškov

##### 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.

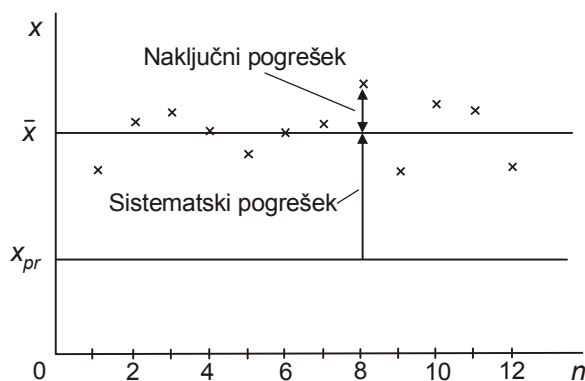
Če sistematski pogrešek odkrijemo, ga skušamo izločiti že pred meritvijo. Če ga pa ugotovimo po meritvi, lahko merilne rezultate popravimo za vrednost sistematskega pogreška, ne da bi ponovno merili. Če za prisotnost sistematskega pogreška ne vemo, je naš merilni rezultat kljub najbolj skrbnemu delu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



**Slika 3-1:** Grafični prikaz ničelnega 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 večih 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. 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, naključni pogrešek.

Pri tem pomenijo:

- $x_{pr}$  - prava vrednost merjene veličine
- $\bar{x}$  - aritmetična srednja vrednost
- $n$  - število ponovljenih meritev

### 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 se prej prepričamo, da ni sistematskih pogreškov, ali pa jih odpravimo. Tako bodo na merilne rezultate vplivali le 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. Seveda brez vpliva sistematskih pogreškov. Sklepamo tudi, da bi se aritmetična srednja vrednost izenačila s pravo vrednostjo, če bi opravili neskončno število meritev. Pojavi se pa vprašanje, koliko meritev zadošča za zadovoljivo točen merilni rezultat. Samo nekaj meritev ne zadošča, močno povečanje pa tudi ne doprinese bistvenega povečanja točnosti. Praktično se priporoča okoli 20-30 meritev.

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 pogreškov posameznih meritev. Eksperimentalni standardni odmik neskončnega števila merilnih rezultatov je standardna deviacija. Če eksperimentalni standardni odmik kvadriramo, dobimo naslednji statistični parameter, varianco.

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

eksperimentalni standardni odkim aritmetičnih srednjih vrednosti z izrazom:

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

torej 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.

### 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 opazi 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 ( $N = 20$ ), rezultate podajamo v tabeli in v grafu.

**Tabela 3-1:** Tabela izmerjenih vrednosti.

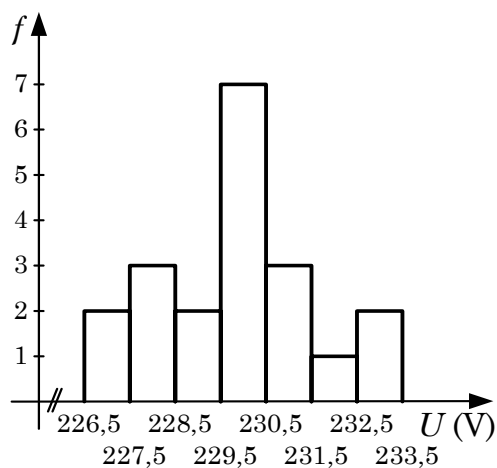
$n$	$U_i$ (V)	$n$	$U_i$ (V)
1	230,4	11	228,7
2	226,7	12	227,5
3	230,9	13	232,1
4	232,8	14	229,9
5	230,2	15	233,1
6	227,9	16	228,4
7	229,3	17	230,6
8	230,3	18	230,3
9	229,5	19	231,4
10	227,3	20	229,7

Če preverimo merilne rezultate, lahko ugotovimo najnižjo vrednost napetosti  $U = 226,7$  V in najvišjo vrednost  $U = 233,1$  V. Območje med tema vrednostima 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 frekvenca  $f$ . Izračunamo pa lahko tudi relativno frekvenco  $f/N$ . Te rezultate podajamo v tabeli.

**Tabela 3-2:** Tabela frekvenc.

$k$	$U_{k,sp}$ (V)	$U_{k,zg}$ (V)	$f$	$f/n$
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. V tem primeru ga podajamo s frekvenco, lahko bi ga pa tudi z relativno frekvenco.

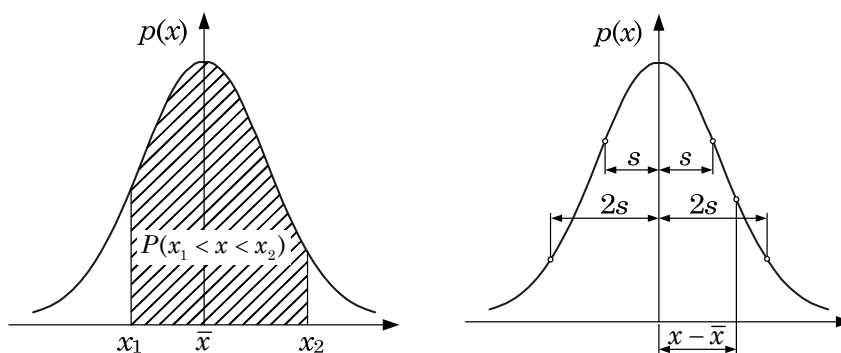


**Slika 3-3:** Histogram izmerjenih vrednosti.

Če bi število meritev večali preko vseh meja, razrede pa ožili proti 0, bi histogram prešel v zvezni potek krivulje. 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  $p(x)$ .

$$p(x) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\bar{x}}{s}\right)^2}. \quad (3-7)$$

Grafični potek Gaussove porazdelitve podajamo zaradi boljšega razumevanja nekoliko poenostavljen. Izhajati bi morali namreč iz neskončnega niza meritev in ustreznih parametrov. Mi pojasnjujemo z aritmetično srednjo vrednostjo in eksperimentalnim standardnim odklikom.



**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.

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

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 odklom, 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
$\bar{x} - 0,674s$	$\bar{x} + 0,674s$	0,5	0,5
$\bar{x} - s$	$\bar{x} + s$	0,6826	0,3174
$\bar{x} - 2s$	$\bar{x} + 2s$	0,9545	0,0455
$\bar{x} - 3s$	$\bar{x} + 3s$	0,9973	0,0027

### 3.3 Meja in območje zaupanja

Ker, kot smo že ugotovili, aritmetična srednja vrednost ni enaka pravi vrednosti merjene veličine, 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 odklop dovolj blizu standardni deviaciji. V takem primeru določimo meje in območje zaupanja na osnovi eksperimentalnega standardnega odklopa aritmetičnih srednjih vrednosti  $s_{\bar{x}}$  po naslednji tabeli:

**Tabela 3-4:** Območje zaupanja pri Gaussovi porazdelitvi.

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

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, 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 najpogosteje 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  $(r)$ . 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 ves čas enaka relativna meja pogreška, z manjšanjem izmerjene vrednosti pa se manjša absolutna meja.

### 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, oz. njegovi ločljivosti. Relativno mejo pogreška  $e_m$  izrazimo enako kot v prejšnjem primeru.

### Meja pogreška pri posredno merjenih veličinah

Posredno merjena veličina je funkcija ene ali več spremenljivk, na primer:

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

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 sistematičnega pogreška funkcije  $y$ :

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

Določitev meje naključnega pogreška funkcije  $y$ :

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

meja relativnega pogreška pa je:

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

Splošni primeri:

• vsota  $y = x_1 + x_2$   $e_{n_y} = \pm \frac{|e_{x_1} \cdot x_1| + |e_{x_2} \cdot x_2|}{x_1 + x_2}, \quad (3-23)$

• razlika  $y = x_1 - x_2$   $e_{n_y} = \pm \frac{|e_{x_1} \cdot x_1| + |e_{x_2} \cdot x_2|}{x_1 - x_2}, \quad (3-24)$

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

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

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

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

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 podanih 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

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

**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 ponavljanimi meritvami 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

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

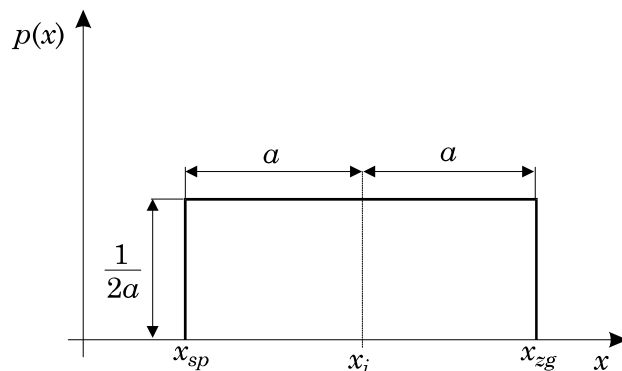
Kadar je število meritev  $N \geq 10$ , ocenimo negotovost tipa A:

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

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 pogoška instrumenta, se najpogosteje predpostavi enakomerna porazdelitev, kar pomeni, da so vse vrednosti merjene veličine med zgornjo in spodnjo mejo enako verjetne.



**Slika 3-5:** Enakomerna porazdelitev.

Ocenjena pričakovana vrednost je  $x_i$ :

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

ocenjena varianca pa:

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

oziroma ob razliki mejnih vrednosti  $2a$

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

standardni odmik pa

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

Negotovost tipa B je

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

#### 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 varianca funkcije  $y$

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

Za določitev variance funkcije  $y$  je potrebno poznati standardne odmike  $s_x$  posameznih veličin  $x$ . Način določanja standardnega odmika lahko izhaja iz priporočila za določanje standardnih negotovosti tipa A in tipa B. Iz variance  $s_y^2$  izračunamo standardni odmik funkcije  $y$

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

Skupna standardna merilna negotovost pa je  $u_c(y) = s_y$ .

### 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 % interval zaupanja. 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	$U_i/\text{mV}$	$10^{-5} \cdot (U_i - \bar{U})/\text{V}$	$10^{-10} \cdot (U_i - \bar{U})^2/\text{V}^2$	
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	
<b>TIP A</b>	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	
$\Sigma$	1200,36	0	1068	

$$\bar{U} = \frac{\sum U_i}{12} = 100,03 \text{ mV} = 0,10003 \text{ V}$$

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

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

**b) V-meter:**

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

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

$$\text{TIP B} \quad s_U^2 = \frac{|E_U|^2}{3} = 6,75 \cdot 10^{-10} \text{ V}^2$$

**c) R-kalibracija:**

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

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

**Kombinirana standardna negotovost**

$$s_I^2 = \left( \frac{\partial \frac{U}{R}}{\partial U} \right)^2 (s_U^2 + s_U^2) + \left( \frac{\partial \frac{U}{R}}{\partial R} \right)^2 s_R^2 = 23,83 \cdot 10^{-6} \text{ A}^2$$

$$s_I = 5 \cdot 10^{-3} \text{ A}$$

$$u_c(I) = s_I = 5 \cdot 10^{-3} \text{ A}$$

**Razširjena merilna negotovost**

$$k = 2 \quad u = k \cdot u_c(I) = 2 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 10 \cdot 10^{-3} = 0,01 \text{ A}$$

**Zapis rezultata**

$$I = \frac{U}{R} \pm u = (9,985 \pm 0,010) \text{ A} \quad \text{ali} \quad I = 9,985(1 \pm 1 \cdot 10^{-3}) \text{ A}$$

## 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:

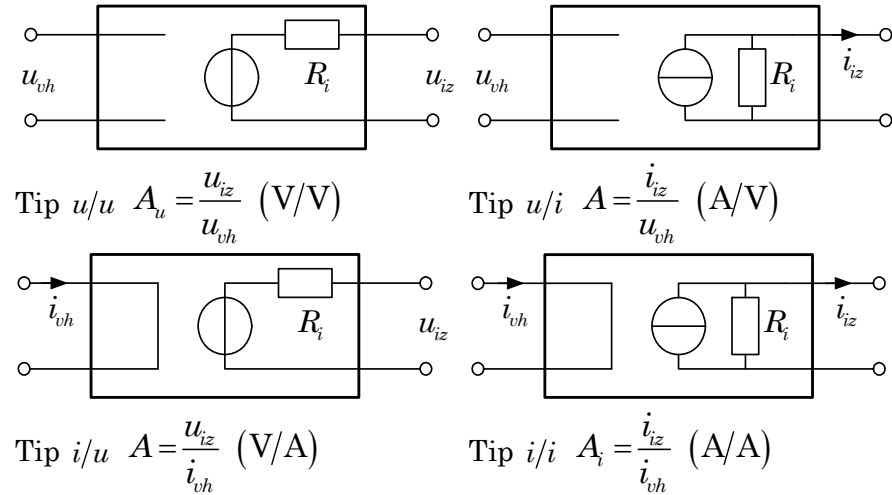
- Njihov povratni vpliv na merjeno veličino mora biti minimalen, čim manj smejo obremeniti merilni objekt. Zato mora biti njihova vhodna upornost pri merjenju napetosti zelo visoka, pri merjenju toka pa zelo nizka.
- Imeti morajo visoko občutljivost, tudi pri zelo majhnih tokovnih in napetostnih signalih 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 pogoške pri meritvah. To 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 napajen 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

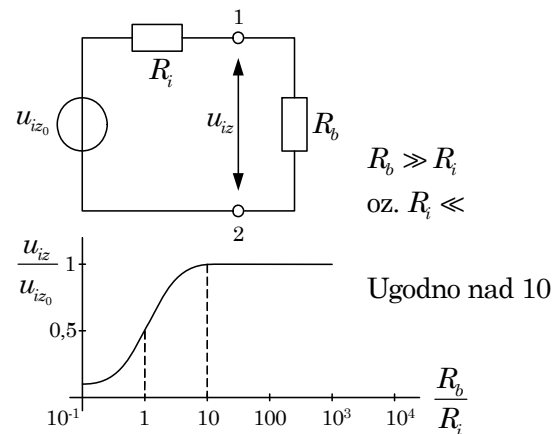
izhodno napetost ali izhodni tok. Zato ločimo štiri osnovne tipe ojačevalnikov:  $u/u$ ,  $u/i$ ,  $i/u$  in  $i/i$  z glede na izhodno in vhodno veličino definiranimi faktorji ojačenja.



**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.



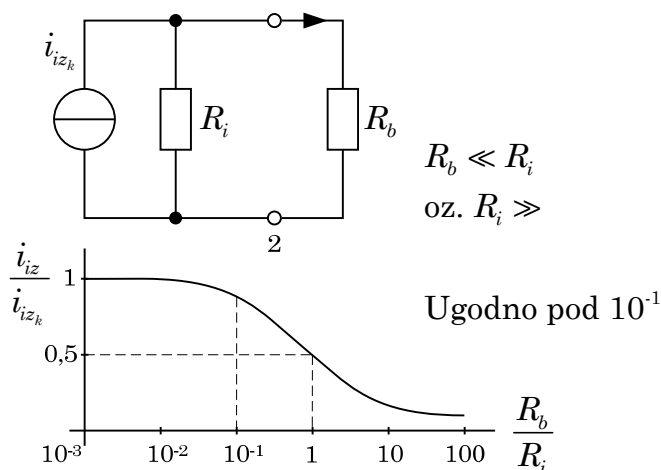
**Slika 4-2:** Merilni ojačevalnik kot napetostni generator.

Napetostni generator ima napetost praznega teka (ko je neobremenjen)  $u_{iz_0}$  in notranjo upornost  $R_i$ . Med sponkama 1 in 2 pa dobimo napetost  $u_{iz}$ :

$$u_{iz} = \frac{R_b}{R_i + R_b} u_{iz_0}. \quad (4-1)$$



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 (ko je neobremenjen)  $i_{iz_k}$  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:

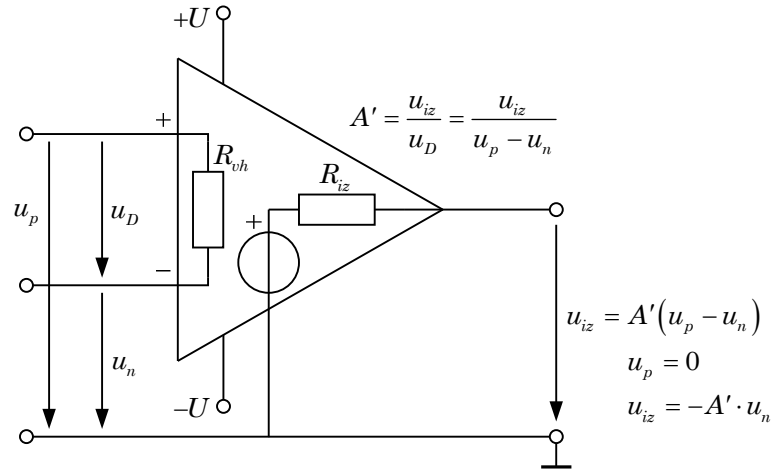
$$i_{iz} R_b = R_i (i_{iz_k} - i_{iz}). \quad (4-2)$$

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. Razen 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 ter nizka izhodna upornost.

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  $u_{iz}$  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  $\pm U$ .

Praktično 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 zveza pri operacijskih ojačevalnikih

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

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

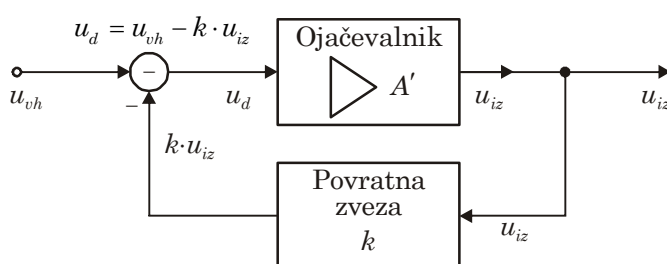
Iz tega dobimo ojačenje celotne vezave

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

Če je  $k \cdot A' \gg 1$ , 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.

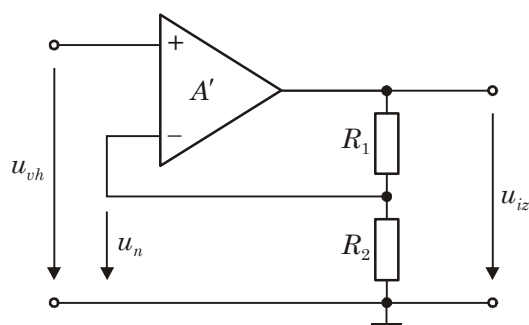


**Slika 4-5:** Operacijski ojačevalnik z negativno povratno zvezo.

Povratna zveza 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 zveze 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 zveze 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

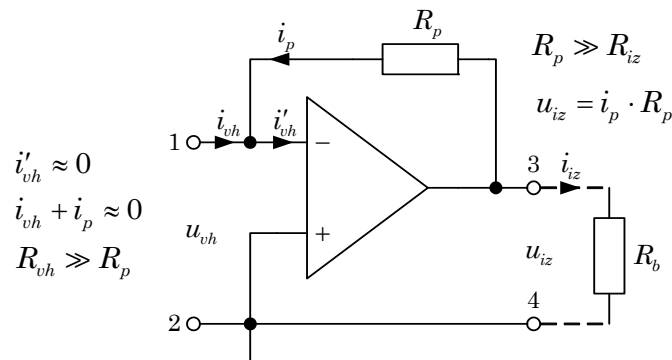
$$k = \frac{1}{1 + R_1/R_2} \quad (4-9)$$

in ojačenje vezja

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

#### 4.2.2 Operacijski tokovno napetostni ojačevalnik (i/u)

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

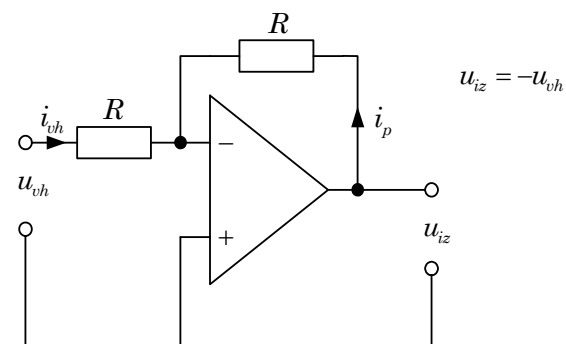


**Slika 4-7:** Tripolna slika operacijskega ojačevalnika s povratno vezavo.

Upoštevali bomo idealni ojačevalnik, pri katerem je vhodni tok po velikosti enak, po predznaku pa nasproten toku v povratni zvezi. Tok v ojačevalnik je zato praktično enak nič.

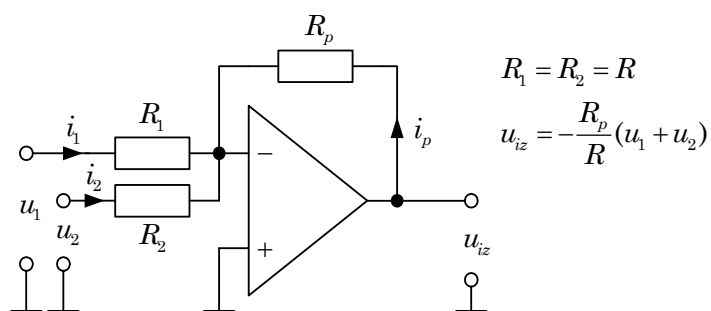
## Izvedbe i/u ojačevalnikov

## Inverter



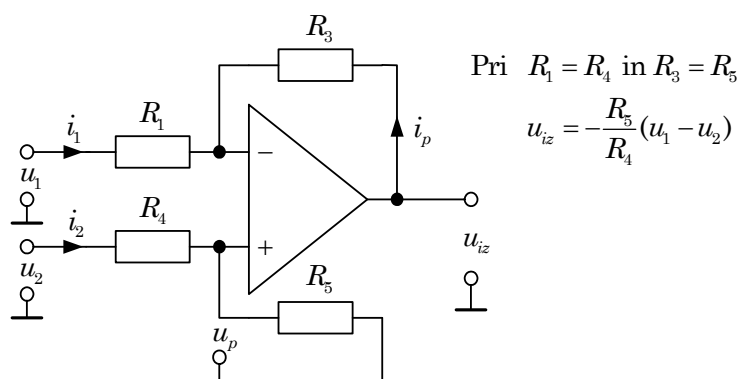
Slika 4-8: Vezje inverterja.

## Seštevalnik



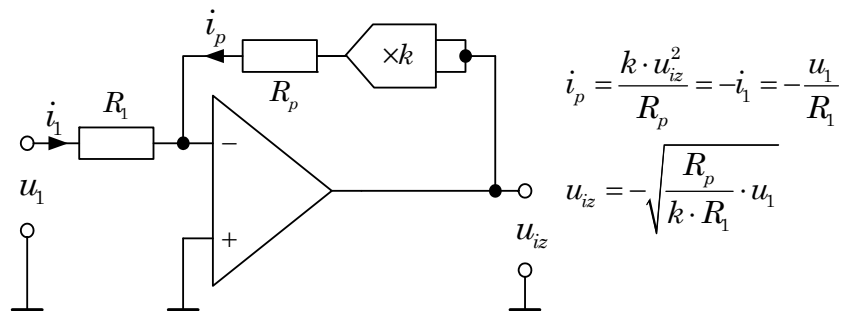
Slika 4-9: Vezje seštevalnika.

## Odštevalnik



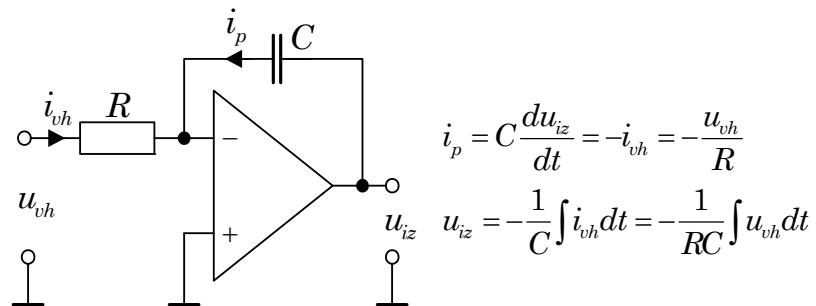
Slika 4-10: Vezje odštevalnika.

### Korenjenje



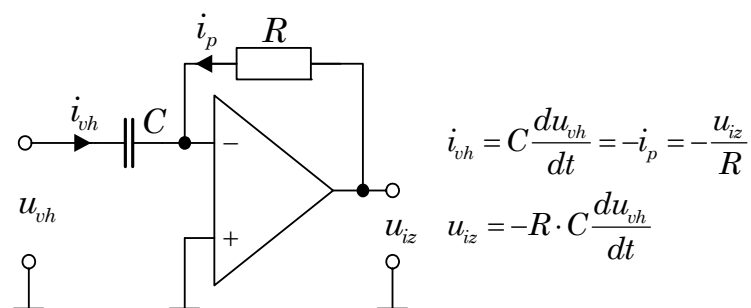
Slika 4-11: Vezje za korenjenje.

### Integrator



Slika 4-12: Vezje integratorja.

### Diferenciator



Slika 4-13: Vezje diferenciatorja.

## 4.2.3 Primeri vezij z operacijskimi ojačevalniki

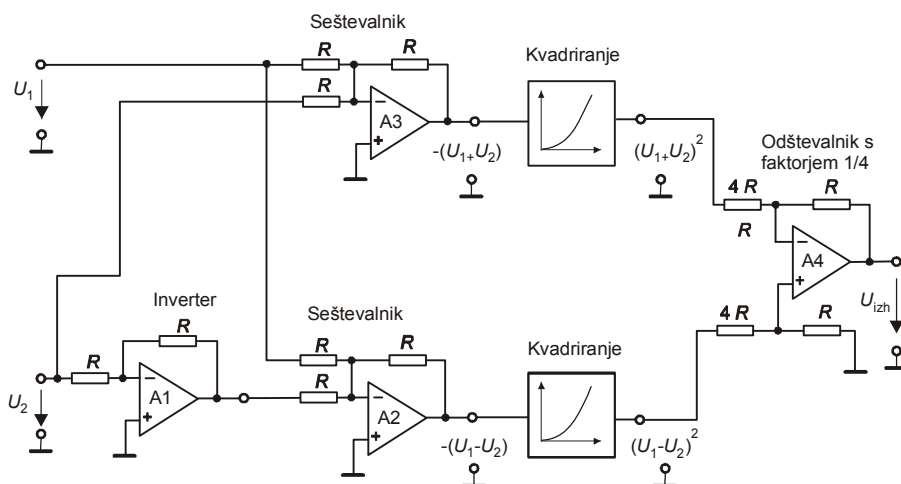
### Analogni množilnik

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, katere vrednost je odvisna od produkta dveh napetosti na vohu. 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.

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



**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 enoti, ki zanjo velja.

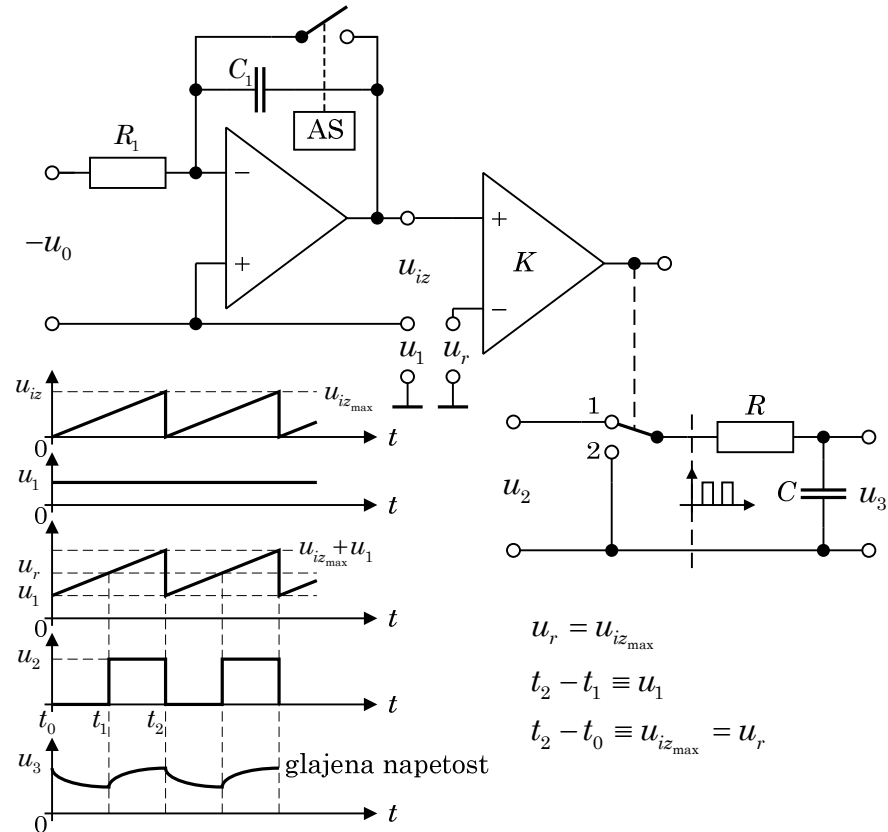
### Impulzni množilnik

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 med sabo 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 vloh 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 podanega 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

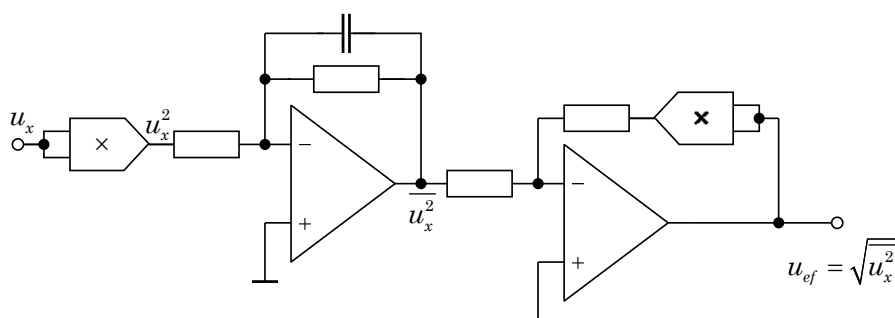
V večini primerov z meritvami določamo efektivno vrednost izmenične napetosti. To omogočajo različni merilni instrumenti. Vendar so pri nekaterih določene omejitve uporabe, saj merijo pravilno le sinusno obliko napetosti. Vezje, ki je podano na sliki 4-16, da na izhodu pravo efektivno vrednost napetosti, 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.



**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 diskretnosti teh signalov del informacije, ki jo še 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 so zelo podobne. Tok impulzov frekvence  $f$  teče med časovnim intervalom  $T$  v števec in povzroči v njem številčno stanje  $N$ :

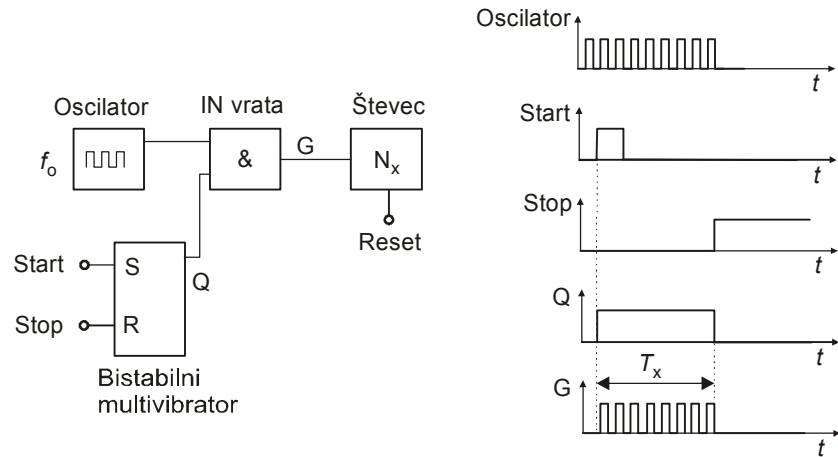
$$N = f \cdot T. \quad (4-13)$$

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 v stanje 0, ki zapre IN vrata in števec neha s štetjem.



**Slika 4-17:** Blokovna shema merjenja časa.

Prešteto število impulzov je:

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

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

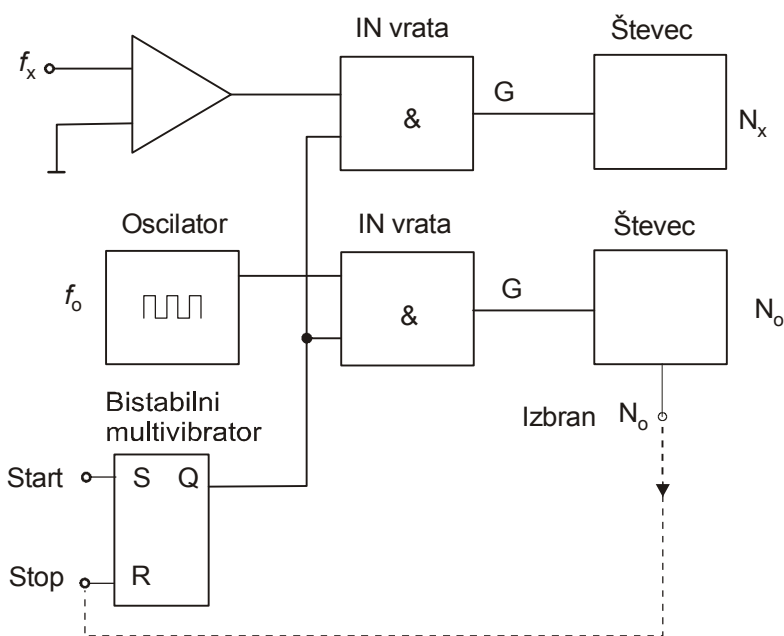
Pogrešek, ki lahko nastane pri štetju, imenujemo pogrešek kvantizacije. Za popolnoma enak čas  $T_x$  lahko namreč preštejemo za en impulz razlike, kar je odvisno od trenutka začetka prevajanja IN vrat glede na tok impulzov iz oscilatorja znane frekvence. Torej merimo z negotovostjo  $N_x \pm 1$  impulz. 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 tako 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  $f_x$ :

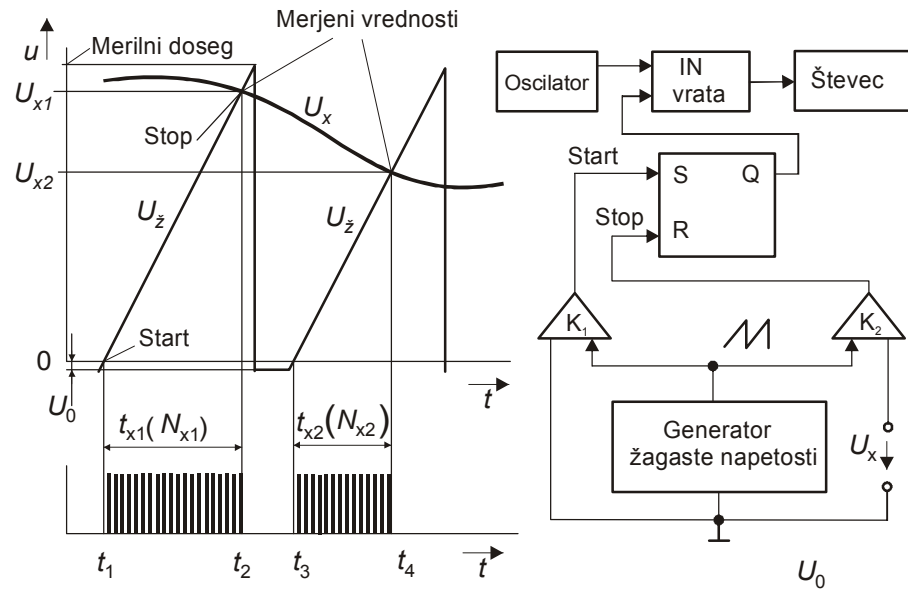
$$f_x = \frac{N_x}{T} = \frac{f_o}{N_o} N_x. \quad (4-17)$$

#### AD pretvorba $u/t$ z enojno žagasto napetostjo

To je osnovni princip pretvorbe, ki ga predstavljamo z blokovno shemo in časovnim potekom signalov. 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  $N_x$ .

Torej se meritev ponavlja. Hitrost merjenja je odvisna od frekvence generatorja žagaste napetosti.



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

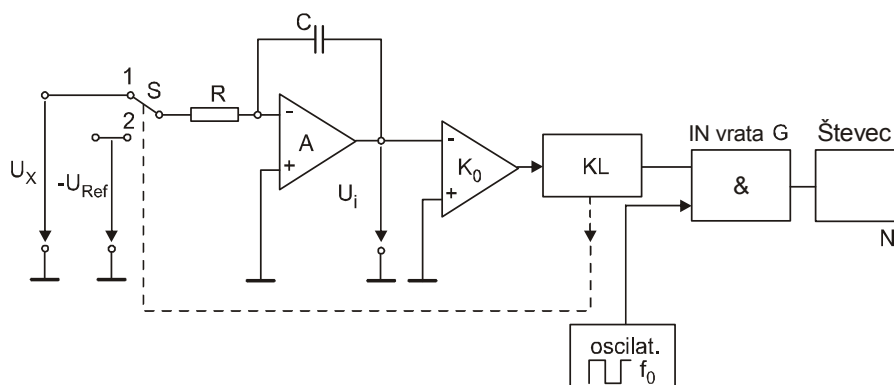
### AD pretvorba $u/t$ z dvojnimi nagibom

Blok 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.

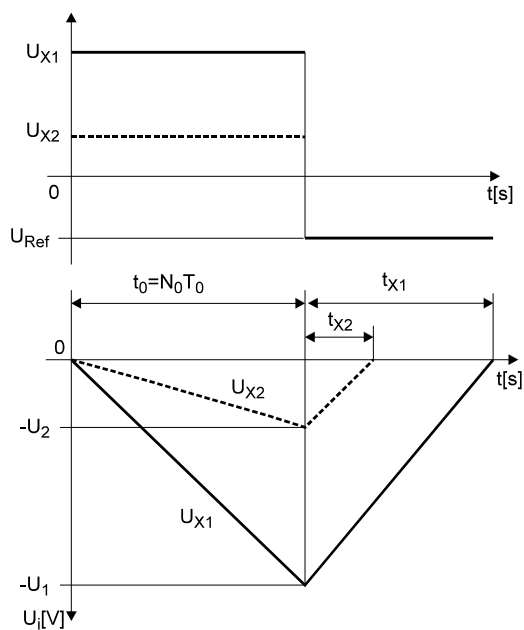
Meritev se prične, ko krmilna logika  $KL$  preklopi stikalo  $S$  v položaj 1 in s tem priključi neznano napetost  $U_x$  na vhod integratorja. Krmilna logika hkrati odpre vrata  $G$  in števec začne šteti impulze oscilatorja s frekvenco  $f_0$ . V primeru pozitivne polaritete  $U_x$  bo izhodna napetost 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 nasprotne 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 dvojnim nagibom.



**Slika 4-21:** Časovni poteki signalov A/D pretvornika z dvojnim 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  $N = \frac{t_{X1}}{T_0}$ .

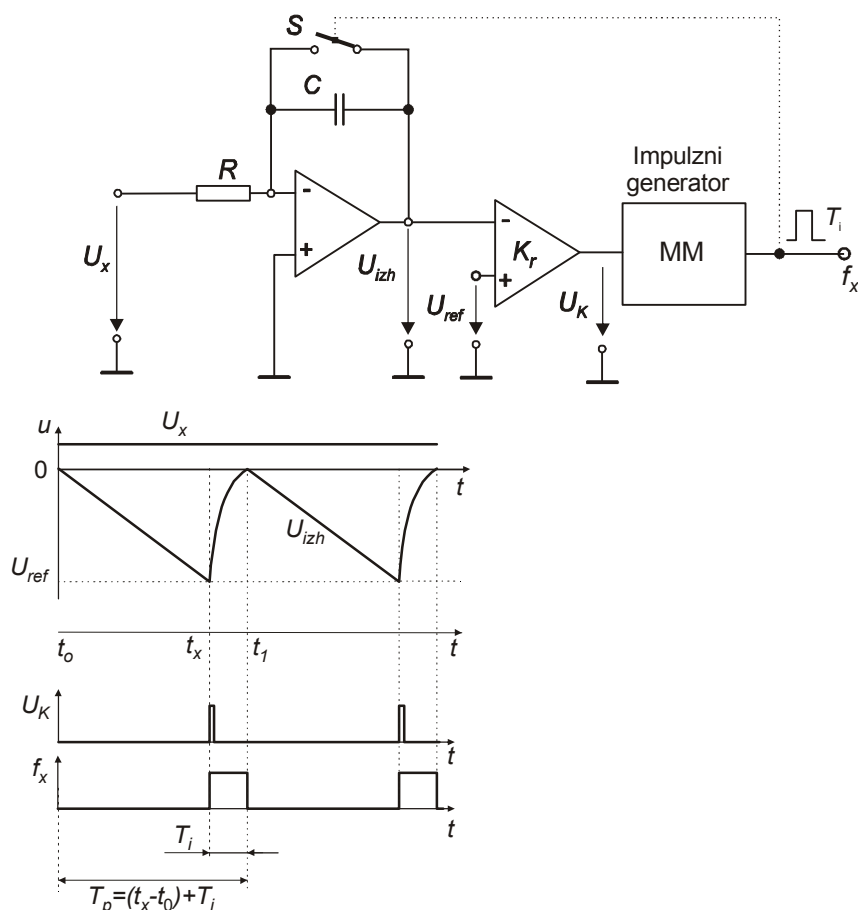
Iz zadnjih dveh enačb sledi

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

Število impulzov  $N$  na prikazovalniku števca je proporcionalno srednji vrednosti merjene napetosti  $\bar{U}_{x1}$ . Na točnost pretvornika vpliva le stabilnost referenčne napetosti  $U_{Ref}$ , drift integratorja in primerjalnika, prav nič pa elementa integratorja  $R$  in  $C$  in prav tako frekvenca oscilatorja  $f_0$  ne. 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 je predstavljen 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 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 frekvencometer. 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).

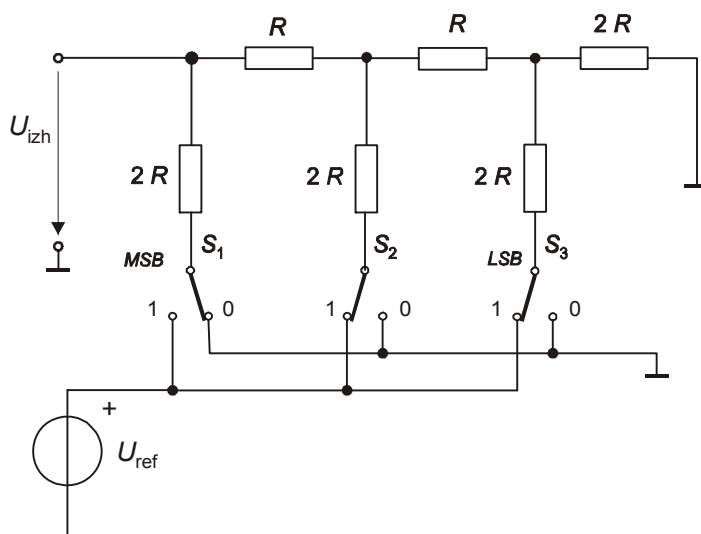
Poznamo več osnovnih izvedb DA pretvornikov, na primer: s paralelnim postopkom, z utežnostnim postopkom, s števnim postopkom. Paralelni postopek je zaradi izvedbenih razlogov najmanj uporabljan. Nekoliko več je uporabljan števeni postopek, predvsem v avdiotehniki. Največkrat pa srečamo utežnostni postopek.

#### 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:

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

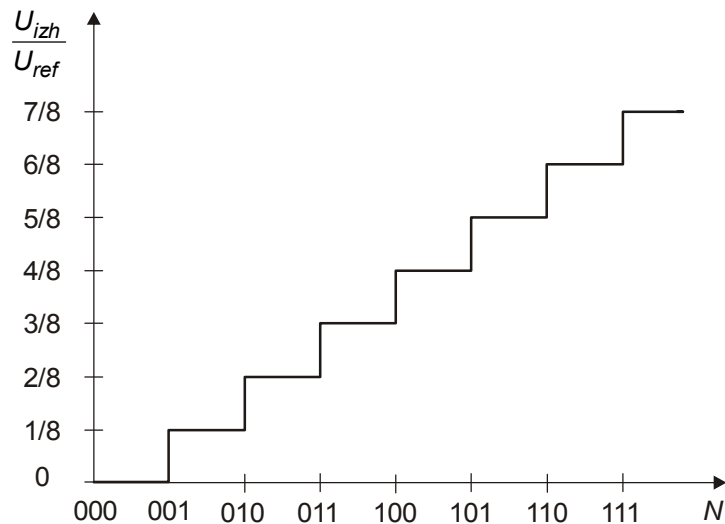
Največja napetost  $U_{izhm}$  za digitalno besedo 111, ko so vsa tri stikala v položaju 1, je:

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

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. To 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.

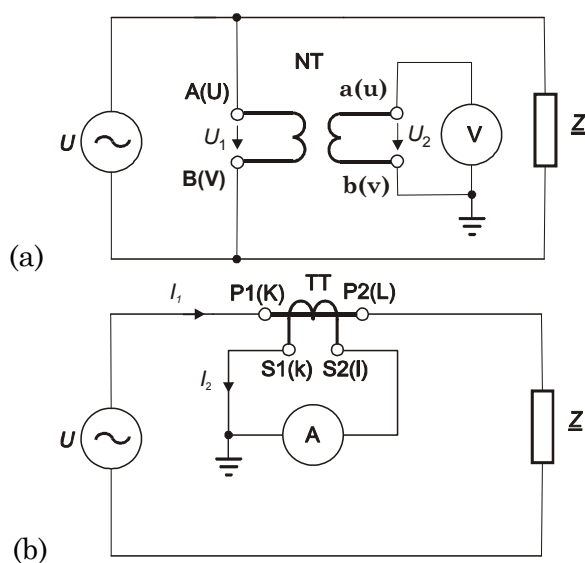
Neželena posledica uporabe merilnih transformatorjev je ta, da vnašajo v meritev dodatni pogrešek, oziroma merilno negotovost, ki se ji ne da izogniti in jo moramo pri oceni skupnega pogreška ali merilne negotovosti upoštevati.

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 merilnih 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 obojev, torej prestavnemu razmerju (prestavi) transformatorja.

Uporabljamo dve vrsti merilnih transformatorjev: merilne napetostne in merilne tokovne transformatorje, 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.

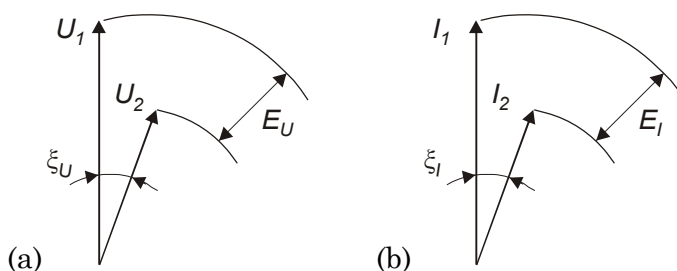


**Slika 4-25:** Vezje z NT in voltmetrom (a) in TT ter ampermetrom (b).

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 ovojev, 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  $\xi_U$  in  $\xi_I$ .



**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	$\pm 0,1$	$\pm 5$
0,2	$\pm 0,2$	$\pm 10$
0,5	$\pm 0,5$	$\pm 20$
1	$\pm 1,0$	$\pm 40$
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 $\xi_{TT}$ 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	±0,40	±0,2	±0,1	±0,1	±15	±8	±5	±5
0,2	±0,75	±0,35	±0,2	±0,2	±30	±15	±10	±10
0,5	±1,5	±0,75	±0,5	±0,5	±90	±45	±30	±30
1	±3,0	±1,5	±1,0	±1,0	±180	±90	±60	±60
3	od 0,5 do 1,2In ; ±3,0				niso predpisani			
5	od 0,5 do 1,2In ; ±5,0				niso predpisani			

Pomemben podatek pri merilnih transformatorjih je njegova nazivna (naznačena) moč. Zato mora biti zagotovljena ustrezna obremenitev na sekundarni strani, to predstavljajo merilni instrumenti, ki naj bo med 25 % in 100 % nazivne. 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, le-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 podane zahteve, upoštevajoč vse kriterije, najprimernejši. V nadaljevanju bomo predstavili nekatere najznačilnejše izvedbe pretvornikov za najpogosteje 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. Pogosteje 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:

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

$\alpha$  je temperaturni koeficient, odvisen od vrste materiala.

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

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

Standardizirana upornost uporovnih termometrov je  $100 \Omega$  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 je zaradi manjše mase bistveno hitrejša. So pa časovno manj stabilni in jih je treba pogosteje umerjati.

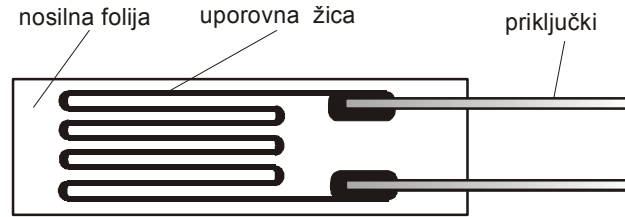
#### 4.5.2 Raztezni merilni lističi

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  $30 \mu\text{m}$ , 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.

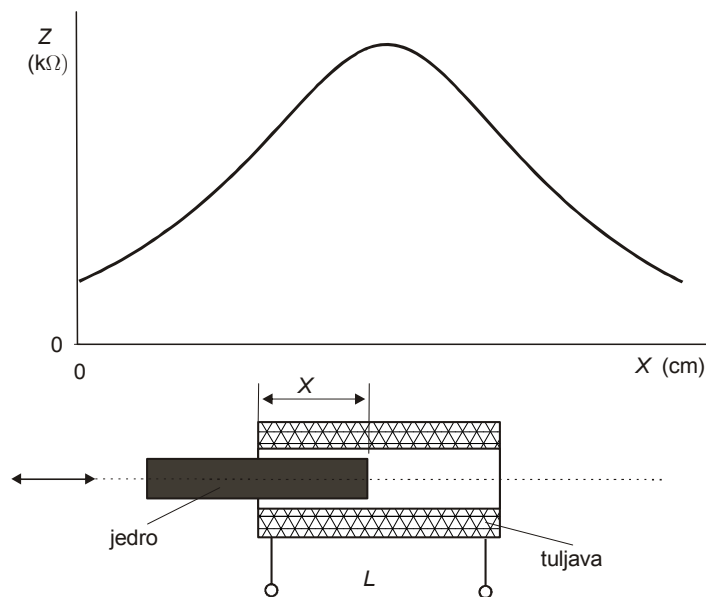
Merilni lističi so običajno nameščeni v eni veji mostičnega merilnega vezja. Merilni instrument, ki je priključen v diagonalo vezja, je umerjen tako, da lahko vrednost neelektrične merjene veličine na njem neposredno odčitamo.



**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 spremembo reaktance, oziroma impedance tuljave. Impedanco, oziroma neelektrično veličino merimo z metodami za merjenje upornosti.



**Slika 4-28:** Tuljava s spremenljivo lego jedra.

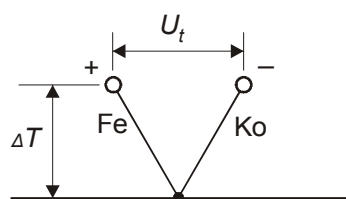
### 4.5.4 Kapacitivni merilni pretvorniki

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 se merjeno neelektrično veličino ugotovi z merjenjem reaktance, oziroma impedance, ki se spreminja zaradi spremembe kapacitivnosti pretvornika.



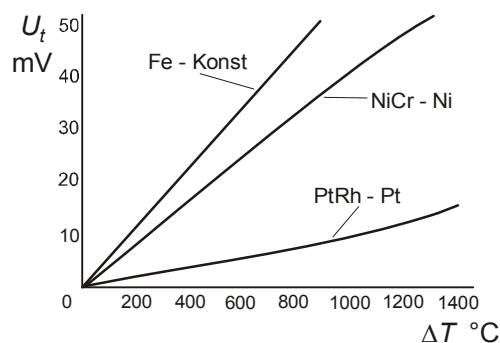
#### 4.5.5 Termoelektrični merilni pretvorniki (termopretvorniki, termoelementi)

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 med sabo 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 termostatiranje hladnega konca (0, 20 ali 50 °C) ali pa uporaba posebnega vezja, ki vpliv spremembe temperature kompenzira. Povezava od termopretvornika do tega vezja pa mora biti izvedena z istim materialom kot je termopretvornik.

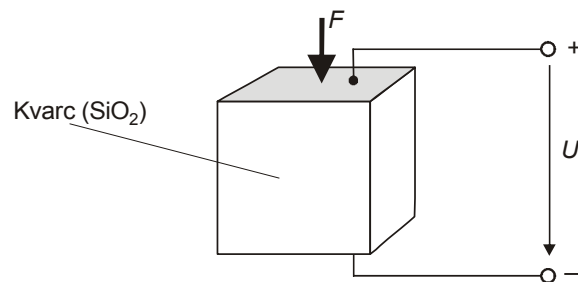
Napetost termopretvornika, oziroma temperaturo, merimo z ustreznim milivoltmetrom, uporabimo lahko merilni ojačevalnik, merimo pa lahko tudi s kompenzacijsko metodo, da ga ne obremenimo.

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 odjemo 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 rotor, ki je kakovosten vrteči se trajni magnet. Pri pretvornikih vibracij pa se ohišje s trajnim magnetom pritrudi na mirujočo podlago, na gibljivi vibrirajoči del pa se pritrudi 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 se položi na merjeni objekt, niha v ritmu vibracij, navitje pa ob dovolj visokih frekvencah merjenja praktično miruje.

## 5. MERILNI INSTRUMENTI IN NAPRAVE

---

### 5.1 Analogni (odklonski) merilni instrumenti

Tako proizvodnja kot uporaba analognih (odklonskih, klasičnih, elektromehanskih) merilnih instrumentov že dalj časa močno upada. Nekatere 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 s področjem uporabe 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 električna veličina spremeni v analogno mehansko, ki 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 pri praktično vseh instrumentih del pomičnega dela kazalec.

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

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

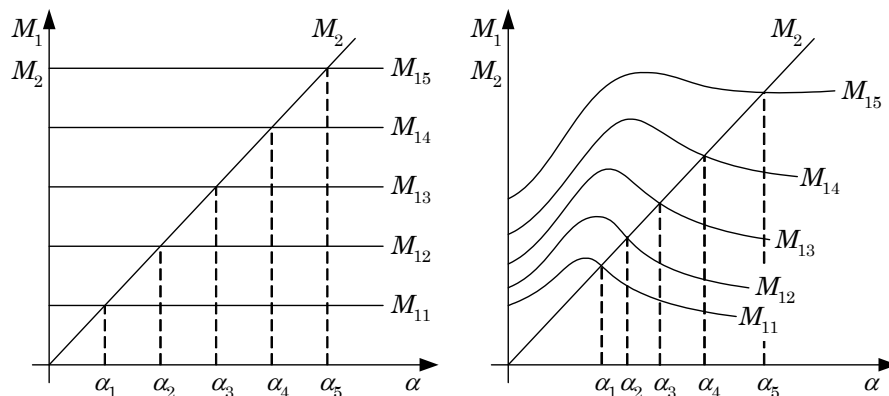
ki mu pravimo tudi električni vrtilni moment. Ne glede na velikost merjene veličine bi ta moment povzročil odklon merilnega sistema do neke skrajne fizične meje. Na tak način seveda merjenje ni izvedljivo. Zato na pomični del deluje tudi nasprotni mehanski moment  $M_2$ , ki ga na primer povzroča torzijski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

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

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

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

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.



Linearna skala

Nelinearna skala

**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. 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:

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

Če iz te enačbe izrazimo odklon  $\alpha$ , 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 prenihanj 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 dušenja gibanja v zraku, tekočini, pa tudi elektromagnetnih vplivov in je odvisen od konstante dušenja  $P$ , ki jo ti vplivi določajo in 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:

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

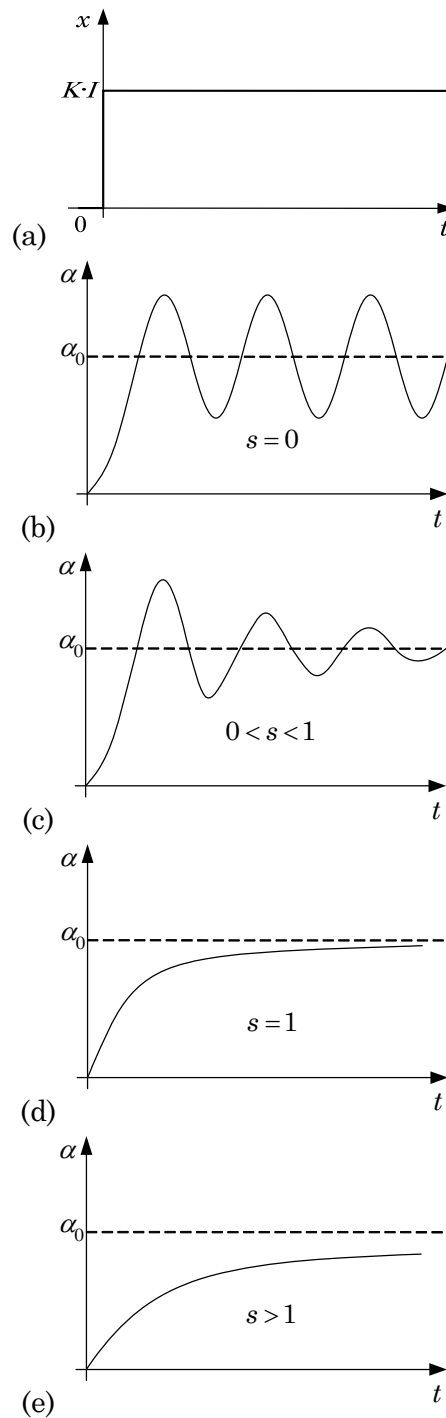
oziroma

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

Iz te enačbe izračunamo potek odklona  $\alpha$  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  $\alpha$ , ki je posledica stopničaste spremembe merjene veličine, na primer vklopa tokokroga, ko se  $M_1 = f(x) = 0$  spremeni na  $M_1 = f(x) = K I$ . 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.

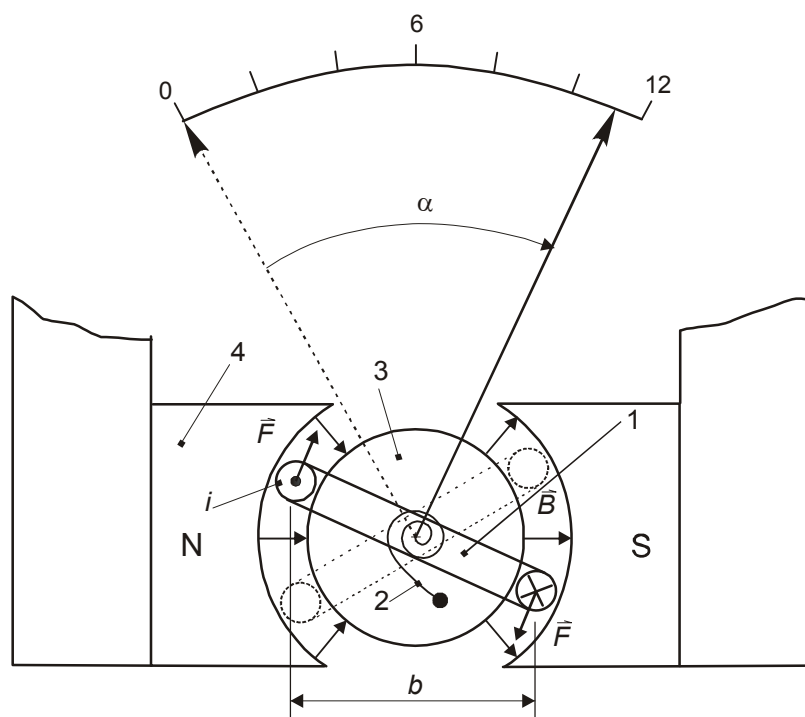


**Slika 5-2:** Graf prehodnega pojava. (a) Stopničasta sprememba merjene veličine, (b) nedušeno nihanje, (c) podkritično dušenje, (d) kritično dušenje in (e) nadkritično dušenje.

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 prenihnji ali celo brez njih.

### 5.1.3 Instrument z vrtljivo tuljavico

Instrument z vrtljivo tuljavico 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 različnimi dodatnimi elementi. Za njegovo delovanje je izkoriščen pojav sile  $F$  na vodnik, skozi katerega teče električni tok  $i$  in se ta vodnik nahaja v magnetnem polju gostote  $B$ .



- 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 se nahajajo v magnetnem polju 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 skalarni produkt:

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

Moment  $M_1$  je:

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

$\phi_0$  je celotni, to je  $N$ -kratni magnetni pretok skozi tuljavico.

Mehanski moment  $M_2$  je:

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

in ravnotežna enačba:

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

Iz nje izrazimo odklonsko enačbo:

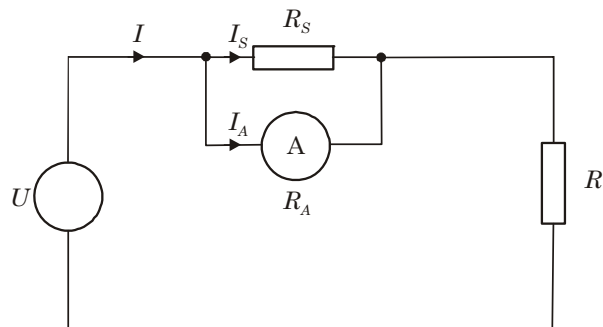
$$\alpha = \frac{\phi_0}{D} \cdot i . \quad (5-16)$$

Ta pove, da je odklon instrumenta z vrtljivo tuljavico premo sorazmeren toku, ki teče skozi tuljavico. Očitno pa je tudi, da se ob spremembi smeri toka spremeni smer odklona. Tako 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.



Če želimo določiti potrebno vrednost soupora  $R_s$ , moramo vedeti, za kolik tok bremena  $I$  moramo razširiti merilno območje. Poznati moramo tudi podatka instrumenta, njegovo merilno območje  $I_A$  in notranjo upornost  $R_A$ . Sedaj lahko nastavimo enačbo:

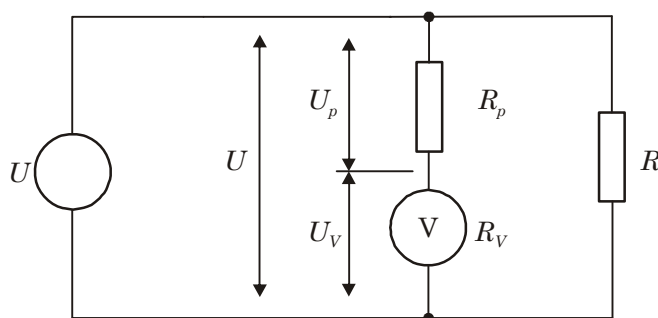
$$I_A R_A = I_S R_S = (I - I_A) R_S. \quad (5-17)$$

Torej mora biti upornost soupora  $R_s$ :

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

Suopor  $R_s$  ima tem manjšo vrednost, za 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 zvez lahko povzroči velike napake.

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



**Slika 5-5:** Razširitev merilnega območja s preduporom.

Za določitev predupora  $R_p$  moramo vedeti, za koliko napetost  $U$  na bremenu moramo 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:

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

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

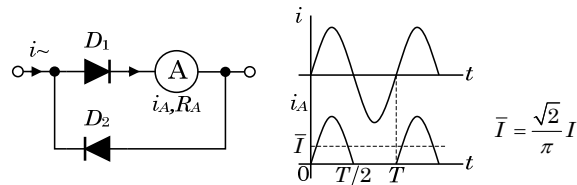
### Instrument z vrtljivo tuljavico za merjenje izmeničnih veličin

Instrument z vrtljivo tuljavico ima zelo dobre lastnosti, to je predvsem velika občutljivost in majhna lastna raba, 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, ki 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:** Vežje za polvalno usmerjanje.

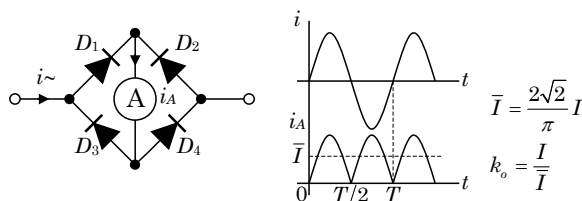
Praktično v tem primeru tečejo preko instrumenta le pozitivni polvali toka. Zaradi mehanske vztrajnosti zavzame merilni sistem lego, ki ustreza srednji vrednosti usmerjenega toka. Za sinusno obliko sta srednja vrednost toka in faktor oblike  $k_o$

$$\bar{I} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} I$$

$$k_o = \frac{I}{\bar{I}} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} = 2,22 \quad (5-21)$$

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.

Pogosteje uporabljamo polnovalno usmerjanje z usmernikom imenovanim tudi Graetzovo usmerniško vežje, 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  $k_o$

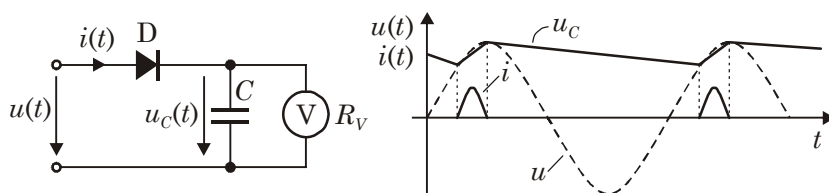
$$\bar{I} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I \quad (5-22)$$

$$k_o = \frac{I}{\bar{I}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11$$

Tudi v tem primeru gre za enako omejitev uporabe instrumenta kot v prejšnjem primeru.

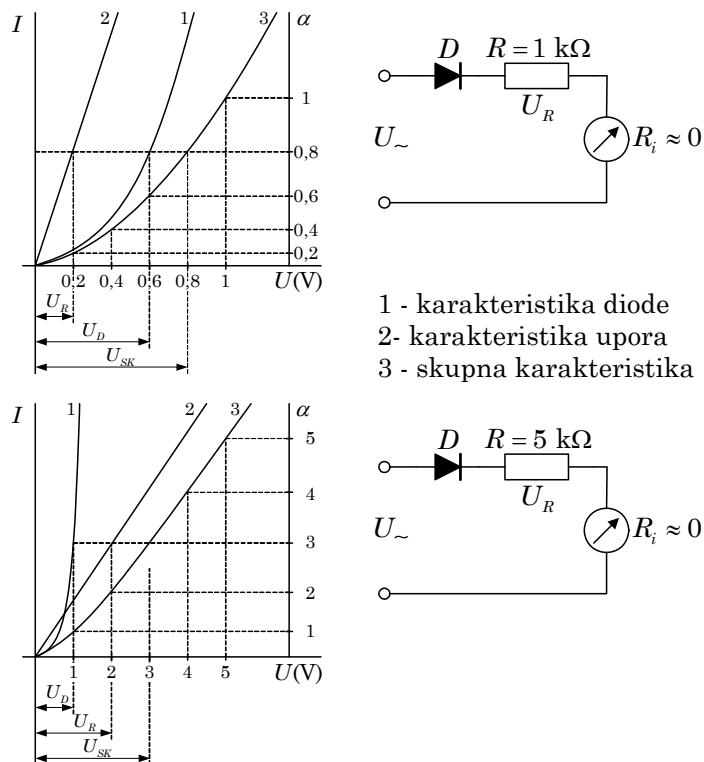
Omenjena nelinearnost skale instrumentov s polprevodniškim usmernikom je tem manjša, čim večja je upornost predupora k instrumentu, slika 5-9. Opozoriti velja tudi na to, da imajo včasih ti instrumenti ločeni skali za enosmerno in izmenično merjenje. Zamenjava skal pri odčitavanju pomeni napačne merilne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

Kadar želimo meriti temensko vrednost merjene veličine, uporabimo usmernik za temensko usmerjanje.



**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, tokrat upoštevajoč 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

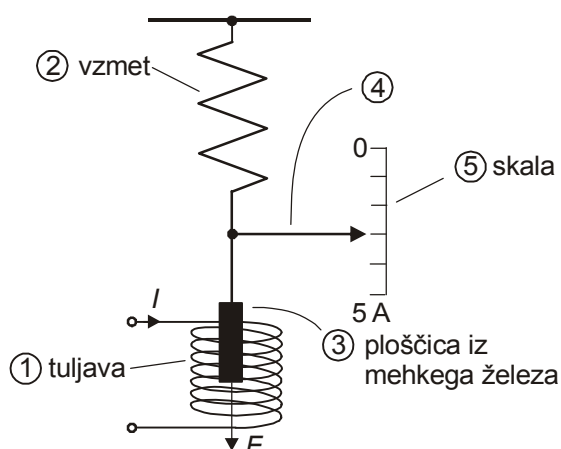
Včasih, sicer redko, najdemo instrument z vrtljivo tuljavico, kjer je usmerjanje izvedeno s termopretvornikom. V tem primeru merjeni tok (ta je sicer lahko tudi enosmerni) segreva spojno mesto termopretvornika. Merilni instrument je priključen med oba prosta konca termopretvornika med katerima se zaradi temperaturne razlike med segrevanim spojnim mestom in prostima koncema pojavi enosmerna napetost. Ta je približno premo sorazmerna temperaturni razliki, oziroma merjenemu toku 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 ni visoke točnosti, je pa zelo enostavne konstrukcije in se odlikuje po odpornosti proti raznim vrstam preobremenitev. Ima sorazmerno veliko lastno rabo, zato ni primeren za merjenja v nizko obremenljivih virih merilnega signala. Uporabljamo ga predvsem pri meritvah v energetiki.

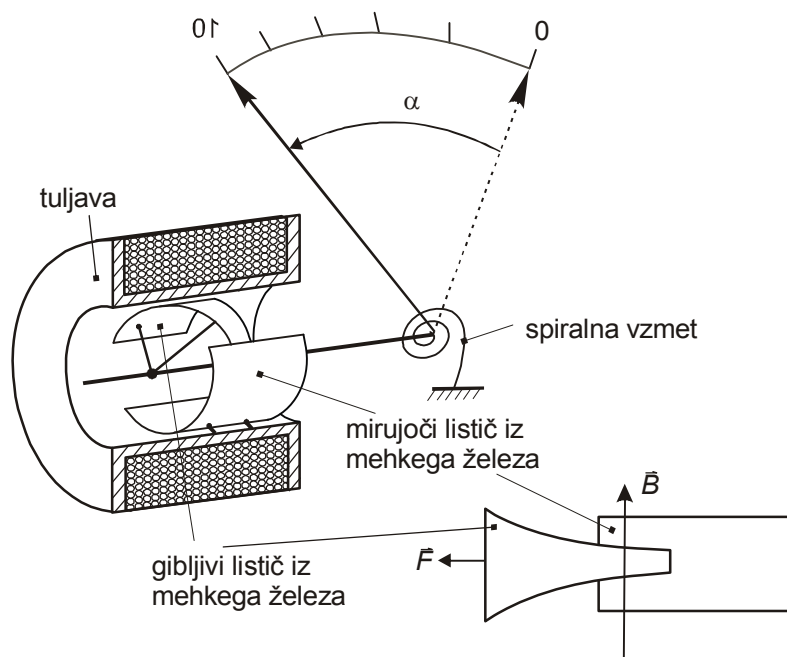
Princip delovanja instrumenta z vrtljivim železom prikazujemo s tuljavo (1), skozi katero teče merjeni tok  $I$ . Magnetno polje tuljave pritegne na vzmeti (2), ki je element za mehanski moment, visečo ploščico iz mehkega železa (3), ki nosi kazalec (4) ob skali (5). Večji tok povzroči, da se listič 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 proporcionalen 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:

$$\begin{aligned} M_1 &= \frac{\partial W_m}{\partial \alpha} \\ W_m &= \frac{L \cdot i^2}{2} \end{aligned} \quad (5-23)$$

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

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

V tej enačbi je  $I$  efektivna vrednost toka in instrument jo meri pravilno ne glede na obliko izmeničnega toka.

Ravnotežje se doseže z mehanskim momentom  $M_2$

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

oziroma

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

in je odklonska enačba instrumenta z mehkim železom

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

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

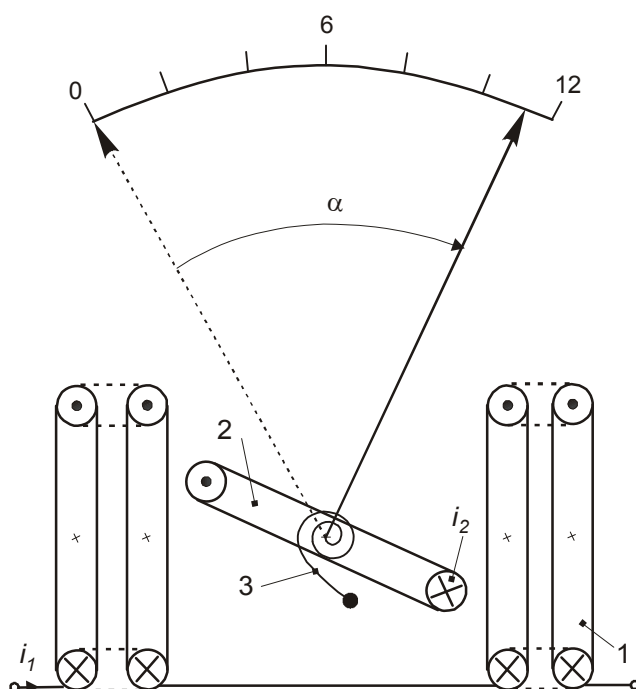
Merilno območje instrumenta se lahko razširi s predupori in soupori, vendar le za določeno frekvenco, ki je na instrumentih običajno tudi označena. Druga možnost je ta, da ima instrument več tuljav, ki se jih da različno povezovati in s tem doseči različna merilna območja.

Instrument z mehkim železom lahko torej uporabljamo za merjenje enosmernih tokov in napetosti, kjer izmerimo srednjo vrednost merjene veličine. V izmeničnih tokokrogih pa izmerimo efektivno vrednost za sinusne in nesinusne oblike.

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

### 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.



**Slika 5-12:** Elektrodinamični instrument.

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.

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 in je  $\delta$  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

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

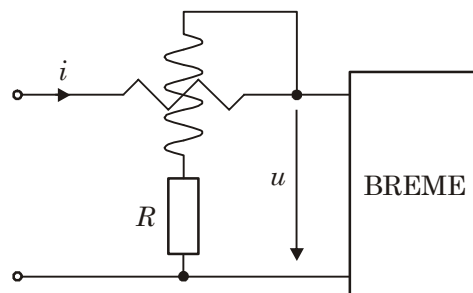
in

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

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, slika 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  $\delta$  enak faznemu kotu  $\varphi$  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 zakasnjena za napetostjo  $U$  za  $90^\circ$ . Odklonska enačba zato dobi obliko

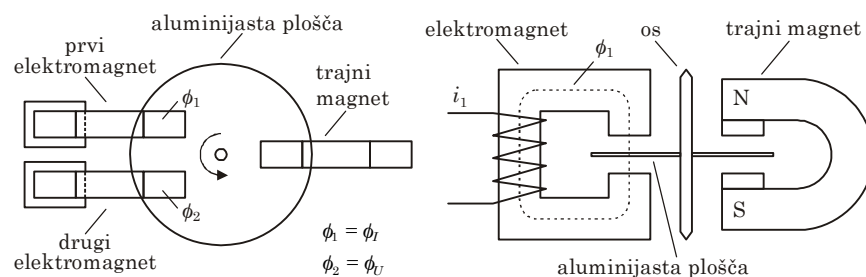
$$\alpha = K \cdot U \cdot I \cdot \cos(90^\circ - \varphi) = K \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi = K \cdot Q. \quad (5-43)$$

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 je mogoč poseben način priključitve napetostnih vej instrumentov.

### 5.1.6 Indukcijski instrument

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

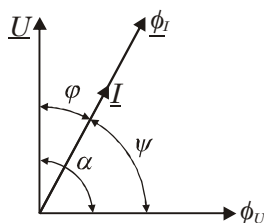
Merilni sistem tega instrumenta je sestavljen iz dveh elektromagnetov, katerih jedri imata zračni reži, v katerih se vrtilna os pritrjena okrogla plošča iz aluminija. Ta plošča se istočasno vrtilna tudi v zračni reži trajnega magneta. Vrtenje plošče se preko sistema povezanega z osjo prenaša na številčnik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



**Slika 5-14:** Indukcijski instrument.

Skozi navitje prvega elektromagneta teče tok bremena, zato je magnetni pretok (fluks)  $\phi_I$  v njegovi zračni reži sorprocionalen toku  $I$ . Navitje drugega elektromagneta pa je priključeno na napetost bremena, zato je njegov magnetni pretok (fluks)  $\phi_U$  sorprocionalen napetosti  $U$ . Oba pretoka sta izmenična in v

aluminijasti plošči inducirata napetosti, ki za  $90^\circ$  zaostajata za pretokoma. Napetosti poženeta v plošči vrtnična tokova  $I$  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

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

Torej je mehanski moment proporcionalen delovni moči  $P$ .

Ravnotežje sistema dosežemo z vplivom trajnega magneta, v katerega zračni reži se vrta aluminijasta plošča in torej 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, sorazmerno 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 števci 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 z njimi merimo zelo široko območje obremenljivosti. Ta znaša tudi do 400 % osnovnega toka.

## 5.2 Analogni elektronski voltmetri

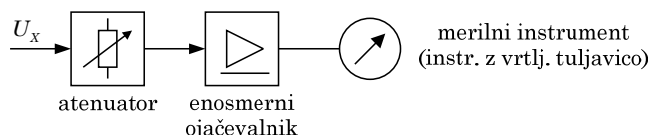
To so voltmetri, katerih bistveni del je merilni ojačevalnik, vrednost merjene veličine pa odčitamo na odklonskem instrumentu, praviloma na instrumentu z vrtljivo tuljavico. Taka izvedba instrumentov omogoča veliko občutljivost (okoli  $1 \mu\text{V}$ ), visoko vhodno upornost (nad  $10 \text{ M}\Omega$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

### 5.2.1 Enosmerni elektronski voltmeter

Enosmerni elektronski voltmeter je namenjen za merjenje 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, premočan vpliv na izmerjeni rezultat.

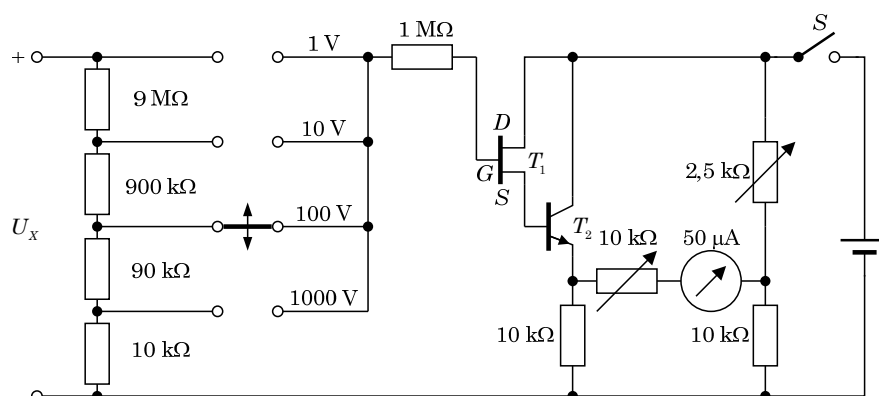
#### Enosmerni elektronski voltmeter z enosmernim ojačevalnikom

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



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

Za boljše razumevanje na sliki 5-17 predstavljamo enostavno vezje izveden po principu podane blokovne sheme.

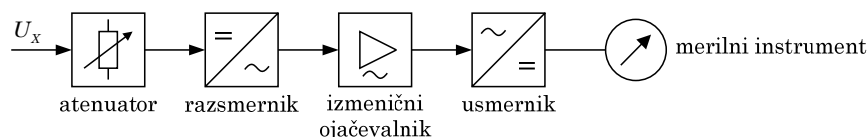


**Slika 5-17:** Vezje enosmernega voltmetra z enosmernim ojačevalnikom.

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 mostiča, 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 k $\Omega$ .

### Enosmerni elektronski voltmeter z izmeničnim ojačevalnikom

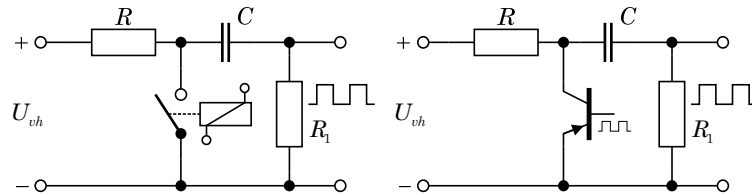
Enosmerni elektronski voltmeter z izmeničnim ojačevalnikom enosmerno napetost razsmeri, torej pretvori v izmenično napetost. Nato jo ojači v izmeničnem ojačevalniku ter ponovno usmeri, da jo lahko instrument z vrtljivo tuljavico prikaže.



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

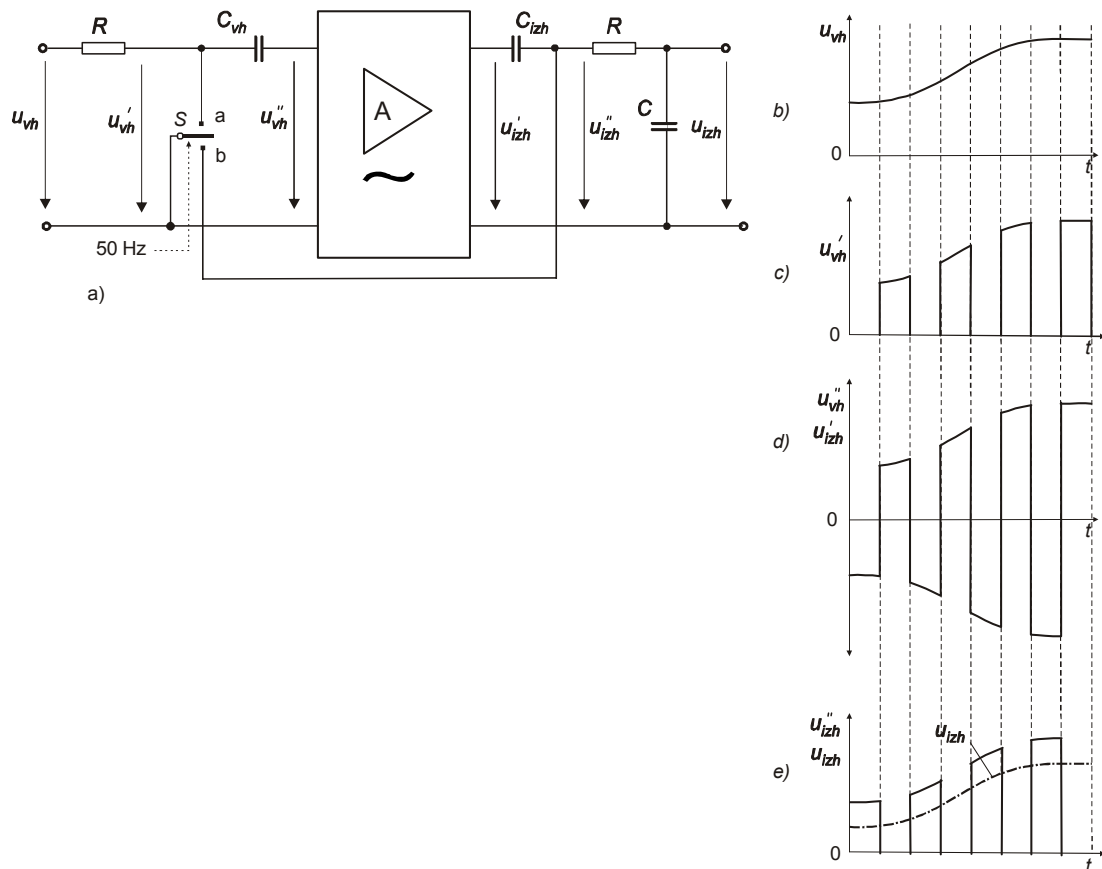
Kot prikazuje slika 5-18, je število komponent pri tej izvedbi večje, posledica je nekoliko manjša točnost, kot pri izvedbi z enosmernim ojačevalnikom.

Razmerjanje 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 časovno, ne pa amplitudno.



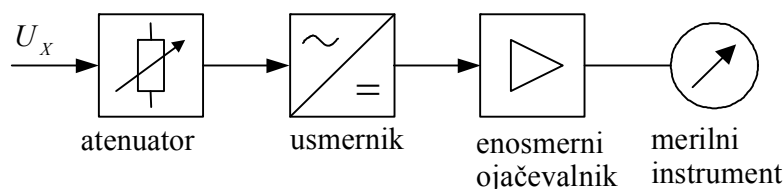
**Slika 5-20:** Elektronski voltmeter z izmeničnim ojačevalnikom (a) vezje, (b, c, d, e) časovni poteki napetosti.

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.

### 5.2.2 Izmenični elektronski voltmeter

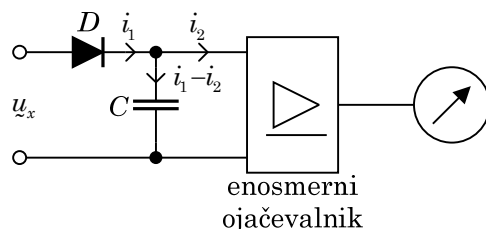
Z izmeničnim elektronskim voltmetrom merimo izmenične napetosti. Tudi za ta voltmeter lahko uporabimo enosmerni ali izmenični ojačevalnik. Za merjenje višjih napetosti lahko uporabljamo izvedbo z enosmernim, za merjenje nižjih pa izvedbo z izmeničnim ojačevalnikom.

Izmenični elektronski voltmeter z enosmernim ojačevalnikom izmenično napetost najprej usmeri, nato ojači in nato 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 naslednji sliki.

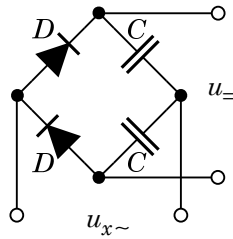


**Slika 5-22:** Izmenični voltmeter s temenskim usmerjanjem.

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 voltmetra 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).

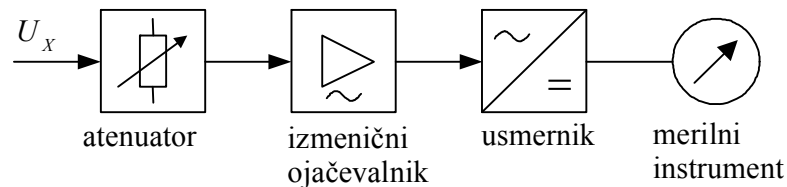
Za temensko usmerjanje pogosto uporabljamo vezje z dvema diodama in dvema kondenzatorjema, Greinacherjevo usmerniško vezje.



**Slika 5-23:** Greinacherjevo usmerniško vezje.

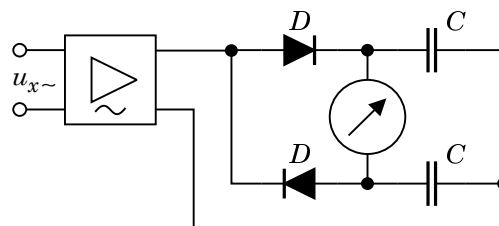
Na eno diagonalo tega vezja priključimo merjeno izmenično napetost, na drugi diagonali pa dobimo enosmerno napetost praktično dvakratne temenske vrednosti priključene izmenične napetosti. Občutljivost voltmetra smo z uporabo tega vezja močno povečali.

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 voltmetra z izmeničnim ojačevalnikom.

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



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

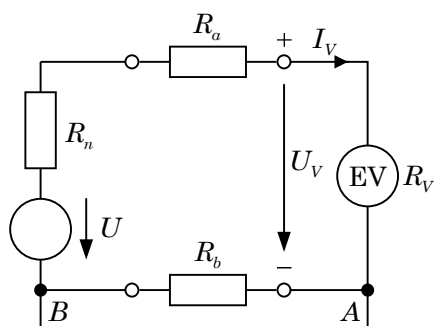
Pri merjenju izmeničnih napetosti največkrat ugotavljamo njeno efektivno vrednost. Instrument v predstavljenih izvedbah s temenskim usmerjanjem pa kaže sorazmerno temenski vrednosti napetosti. Zato mora biti skala instrumenta ali njegova konstanta prirejena tako, da pri odčitavanju rezultata dobimo efektivno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



prirejeni za sinusno obliko, kar pomeni, da ne merijo pravilno napetosti nesinusnih oblik.

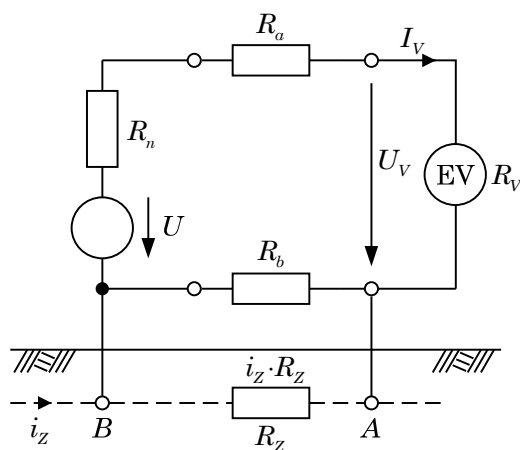
### 5.3 Problematika ozemljenega vhoda elektronskih merilnih instrumentov

Praviloma je ena od vhodnih priključnih sponk elektronskih merilnih instrumentov in naprav ozemljena. Povezana je z zaščitnim vodnikom, ki je povezan tudi 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.



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

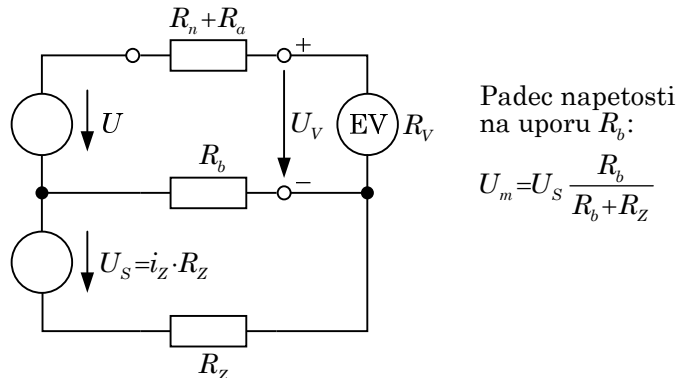
Dokler sta vir in merilni instrument ozemljena na isto ozemljilo, torej sta njuni ozemljeni vhodni sponki galvansko povezani, se ta problem pri merjenju ne pojavi. Kadar pa so razdalje med njima večje in sta vezana na galvansko ločeni ozemljili, lahko merimo napačno.



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

Med obema ozemljiloma se nahaja 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), povzročajo padec napetosti  $U_S$ , ki je sofazna napetost merjeni napetosti.

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



**Slika 5-28:** Sofazna napetost v merilnem vezju.

Napetost  $U_{Ss}$  požene tok preko upornosti zvez. Večina toka se sklone preko  $R_b$ , saj je zaradi velike upornosti merilnega instrumenta tok preko  $R_a$  zelo majhen. Ta tok povzroči na upornosti  $R_b$  motilni padec napetosti  $U_m$ . Torej voltmeter ne izmeri prave napetosti vira  $U$ , ampak neko drugo napetost.

Rešitev tega problema bi bil instrument z neozemljenim (lebdečim) vhodom. Vendar pa se lahko v takem primeru pojavijo problemi z varnostjo, saj ob stiku faznega vodnika z ohišjem instrumenta ne bi delovalo zaščitno stikalo.

## 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 števec 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:

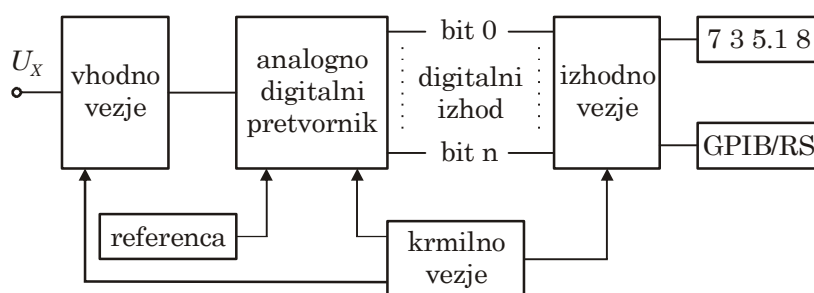
- veliko točnost,
- dobro ponovljivost,
- veliko občutljivost,
- visoko hitrost merjenj,
- enostavnejše in hitrejša odčitavanja,
- enostavnejšo avtomatizacijo merjenj,
- enostavno obdelavo, prikaz in prenos merilnih rezultatov.

### 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 enosmeren, mora biti merjena napetost bodisi enosmerna ali pa izmenična, ki jo z vhodnim vezjem predhodno pretvorimo v ekvivalentno enosmerno obliko (srednjo, efektivno ali temensko vrednost).

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 več mestno). Takšen voltmeter lahko izmeri 15 do 30 meritev v sekundi. Kadar potrebujemo hitrejše merjenje (npr. pri velikem številu multipleksiranih kanalov) uporabimo DVM, ki ima AD pretvornik s postopnim približevanjem.

Zaradi vse večjih potreb po avtomatizacijo merilnih postopkov imajo dražji instrumenti običajno vgrajen RS 232 vmesnik ali vodilo GPIB (General Purpose Interface Bus).



Slika 5-29: Blokovna shema digitalnega voltmetra.

### 5.4.2 Digitalni števec električne energije

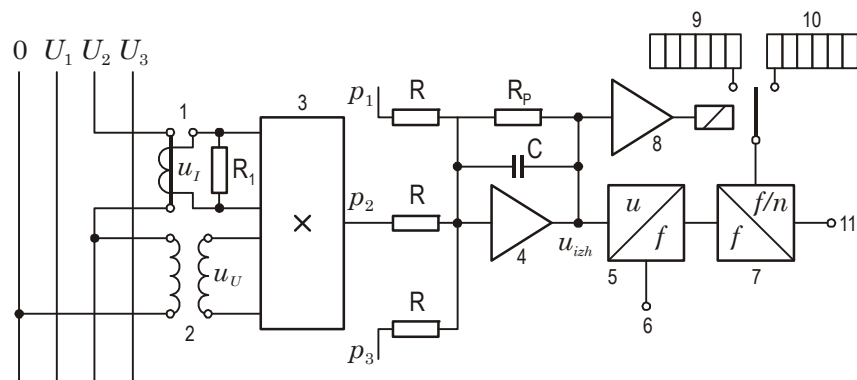
Indukcijski števeci električne energije zadostujejo zahtevam za merjenje energije v gospodinjstvih in so še vedno zelo številčni. V energetskih sistemih in industriji pa jih praktično ne najdemo več. Pri veliki količini izmenjane energije so zahteve po veliki točnosti zelo poudarjene, razen tega pa je izkoriščena njihova primernost za avtomatizacijo merjenj in daljinski prenos merilnih podatkov.

Zasnovo 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 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 analogni 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 preštevto število impulzov v času merjenja proporcionalno delovni energiji, ki je stekla čez števec v eni ali drugi smeri.

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

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



- |                                      |                                           |
|--------------------------------------|-------------------------------------------|
| 1 - tokovni merilni transformator    | 6 - kontrola impulzov                     |
| 2 - napetostni merilni transformator | 7 - delilnik frekvence                    |
| 3 - impulzni množilnik               | 8 - ojačevalnik signala za tarifni prekop |
| 4 - integrator in seštevalnik        | 9, 10 - štetje in prikazovanje            |
| 5 - pretvornik napetosti v frekvenco | 11 - odcep za daljinski prenos            |

**Slika 5-30:** Digitalni števec električne energije.

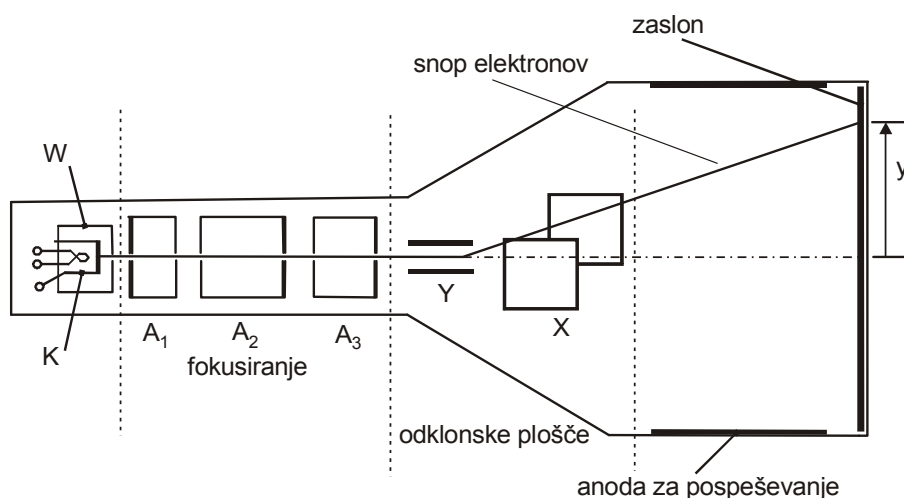
Različna smer pretoka energije povzroči različen predznak napetosti  $u_{izh}$ , ki jo ojačimo in z njo preklopimo stikalo na prvi (9) ali drugi (10) prikazovalnik. Tako je dana možnost različnega obračunavanja energije, ki jo porabnik prejema in energije, ki jo morda iz lastne proizvodnje oddaja.

Lastna raba takih števecov 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. Glede na svojo zasnovo, kjer je kazalec elektronski žarek, ki ima zelo majhno vztrajnost, lahko dobro sledi tudi hitrim spremembam merjenih veličin. Praktično lahko vzamemo, da meri trenutne vrednosti. Njegova prednost je tudi ta, da nam 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 osciloskopa.

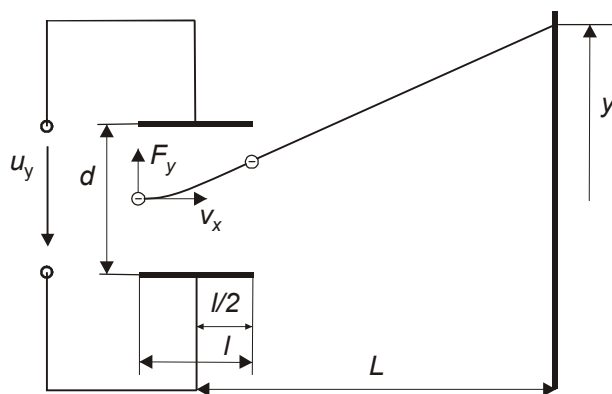


**Slika 5-31:** Braunova elektronka.

Iz segrevane katode K izstopajo elektroni, ki so zaradi potencialne razlike (nekaj sto ali celo nekaj tisoč voltov) med katodo in anodo A v cilindrični obliki (običajno je več anod), fokusirani in pospešeni proti fluorescentnemu zaslonu. Takoj za katodo, pred anodo je še ena elektroda, Wehneltov cilindar, 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, ki s svojima električnima poljema odklanjata elektronski žarek, eden vertikalno in drugi horizontalno. Pred zaslonom je še zadnja elektroda, grafitna obloga na najvišjem potencialu, ki dodatno pospeši elektrone pri njihovi poti proti zaslonu.

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



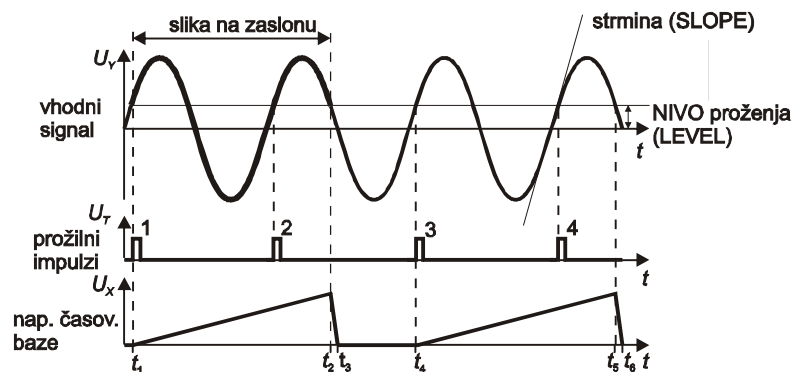
**Slika 5-32:** Prikaz y-odklona do zaslona.

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, ki se zaradi tega ne spremeni, pridobi pa 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. 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, idealno bi bilo v trenutku, na izhodiščno vrednost. 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.

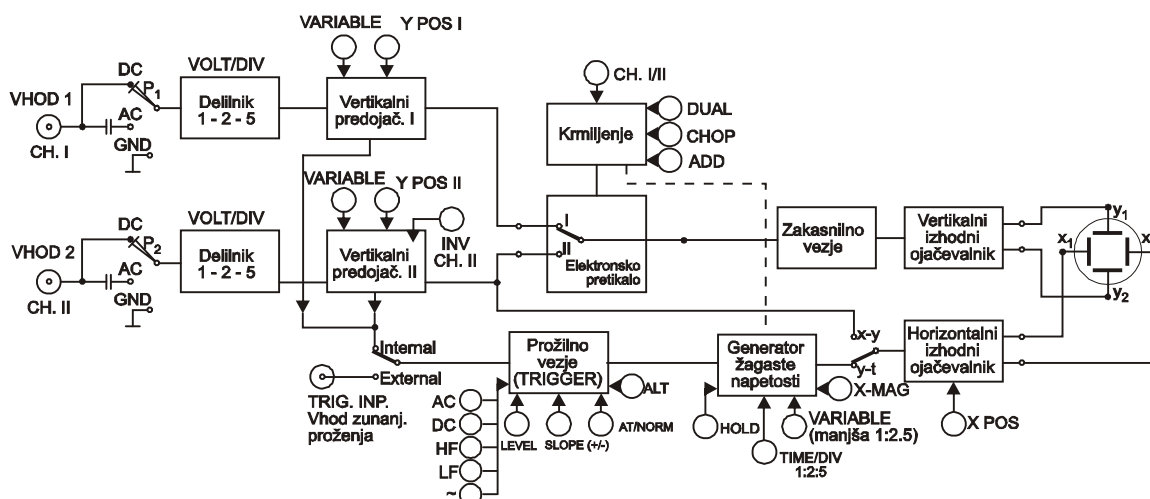


Slika 5-33: Potek  $u_y$  in  $u_x$ , z označenim proženjem.

Vsekakor je treba za ustrezno sliko na zaslonu izpolniti več pogojev, da lahko razberemo vse karakteristike merjenega signala. Nastavljena mora biti prava velikost slike, izbrana mora biti ustrezna frekvenca žagaste napetosti, izvedeno mora biti proženje

v  $x$  smeri, kar pomeni, da začne tek žarka v  $x$  smeri šele takrat, ko merjena napetost  $u_y$  doseže določen prožilni nivo.

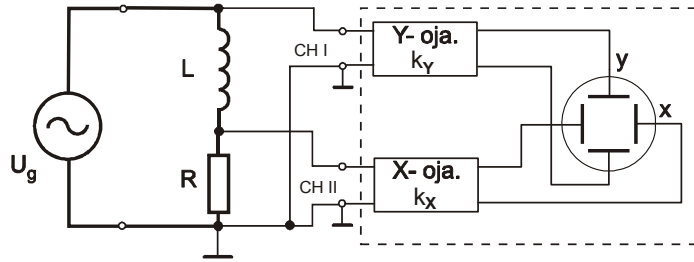
Osciloskop je naprava, ki vsebuje razen Braunove elektronke še vse sklope, ki so potrebni, da so ti pogoji izpolnjeni. Na sliki 5-34 predstavljamo dvokanalni osciloskop, s katerim se v praksi pogosto srečujemo in ki omogoča tudi istočasno opazovanje dveh merjenih napetosti.



*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  $u_{y1}$ , nato 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 omogoča tudi, 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 raznih elementov (na primer uporov, diod), magnetilnih karakteristik feromagnetnih materialov (na primer histerezne zanke) in še za vrsto drugih merjenj.



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

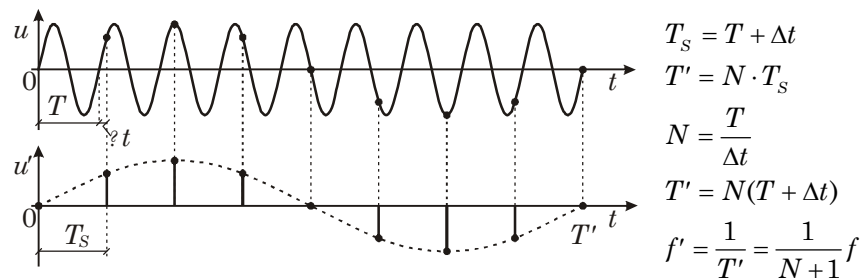
### 5.5.1 Posebne izvedbe osciloskopov

#### 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  $\Delta t$  večja od periode  $T$  opazovanega signala:

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

Z manjšanjem  $\Delta t$  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.

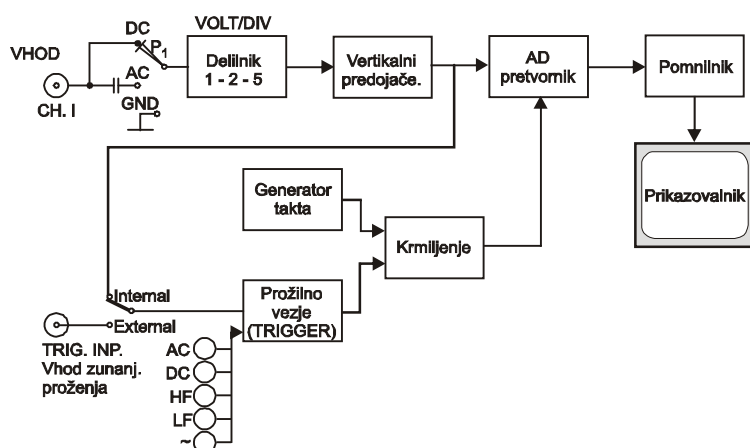
### Digitalni osciloskop

Analogni osciloskopi omogočajo opazovanje periodičnih signalov na zaslonu katodne cevi. Pri neperiodičnih signalih, ki se zgodijo v določenem trenutku in 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 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. V nasprotju z analognim osciloskopom, kjer generator žage odklanja žarek v  $x$  osi zaslona, se pri digitalnem osciloskopu uporablja "krožni pomnilnik", v katerega se shranjujejo otipane vrednosti od trenutka sproženja 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 analognno (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:

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

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 periodičnega signala. Problem je v tem, da napaka ni takoj opazna. Zato imajo nekateri osciloskopi *antialiasing filtre* na vhodu osciloskopa. To so v bistvu nizkofrekvenčni filtri z veliko strmino (>40 dB/dekado), ki frekvenčno omejijo vhodni signal.

### Prikazovanje signalov

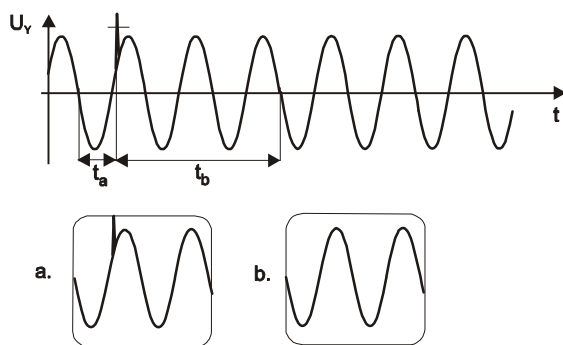
Otipani signali se pri digitalnem osciloskopu shranijo v krožni pomnilnik. Poznamo tri načine prikazovanja signala na zaslonu digitalnega osciloskopa:

- **Ponovljiv izris** (*refresh mode*), kjer se novo shranjevanje v krožni pomnilnik začne takoj po prenosu podatkov v zaslonski pomnilnik. Signal se izriše po koncu prenosa.
- **Enojni izris** (*single shot*). Signal se po tipanju prenese v zaslonski pomnilnik in novo tipanje se ne začne. Slika ostane na zaslonu poljubno dolgo.
- **Sprotni izris**, ki je primeren za opazovanje počasnih pojavov. Otipane vrednosti signala se 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 pred proženje (*pretrigger*) ali zakasnjeno proženje (*posttrigger*).

Slika 5-38 prikazuje različno proženje osciloskopa.



**Slika 5-38:** Pred proženje (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*. 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 elektronskega osciloskopa

Osciloskop je merilnik trenutne napetosti. Uporabljamo ga za merjenje in opazovanje *oblike napetosti* ali, s posrednim merjenjem, drugih električnih in neelektričnih veličin. 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

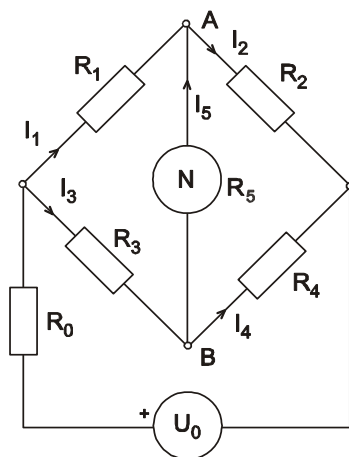
### 6.1 Merilni mostiči

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 (temperatura, tlak, premik, upogib...), 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 enosmerne Wheatstonovega mostiča.

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

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

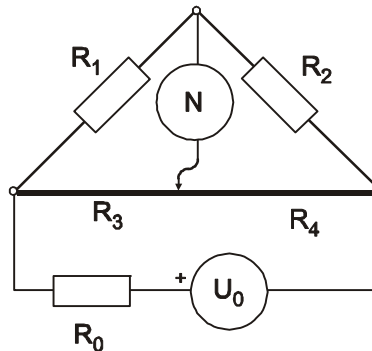
Ker je  $I_1 = I_2$  in  $I_3 = I_4$ , dobimo iz obeh enačb ravnovesno enačbo mostiča

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

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  $R_3/R_4$ , oziroma kadar je namesto uporov  $R_3$  in  $R_4$  uporabljena kalibrirana uporovna žica, je razmerje  $R_3/R_4$  odvisno od lege drsnika na njej, slika 6-2.



**Slika 6-2:** Mostič s kalibrirano žico.

### Odklonski Wheatstonov mostič

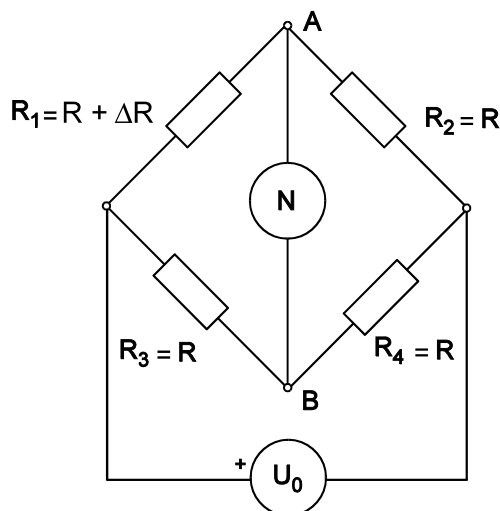
Odklonskih merilnih mostičev ne uravnovešamo, kazanje indikatorja  $N$  je sorazmerno merjeni veličini. Te mostiče uporabljamo za zvezno merjenje spremenljivih uporov, na primer uporovnih lističev, uporovnih termometrov itd. Zelo pogosto jih uporabljamo pri merjenju neelektričnih veličin.

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 četrtrinskega mostiča je na sliki 6-3.



**Slika 6-3:** Četrtrinski 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:

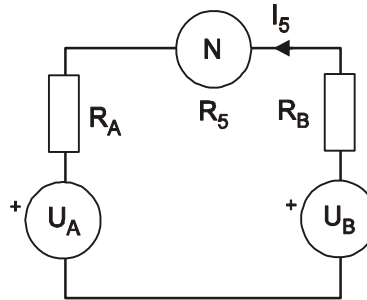
$$U_V \approx \frac{1}{4} \cdot U_0 \cdot \frac{\Delta R}{R} \quad \text{pri} \quad \frac{\Delta R}{R} \ll 1 \quad (6-8)$$

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

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



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

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  $\Delta I_5$

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

Namesto  $\Delta I_5$  vzemimo najmanjši tok  $\pm I_{5\min}$ , ki ga še opazimo na ničelnem indikatorju. Sedaj je (relativna) meja pogreška mostiča

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

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  $\Omega$  do 10 M $\Omega$ , v praksi pa velikokrat postavimo spodnjo mejo na vrednost 1  $\Omega$ . 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, ki je določeno z opremo, ki je na razpolago in 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	$R_1, U, q$	$\sqrt{\frac{q}{1+n+q}}$	$\approx 0,01$	$q$
2	$R_1, I, q$	$\approx 100$	$\sqrt{1+q\left(1+\frac{1}{m}\right)}$	$q$
3	$R_1, I_1, q$	$\approx 100$	$\approx 0,01$	$q$
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	$R_1, U, P_0$	0,5	$\approx 0,01$	0,336
6	$R_1, I, P_0$	$\approx 100$	2	2,97
7	$R_1, I_1, P_0$	$\approx 100$	$\approx 0,01$	1
8	$R_1, P, P_0$	1	1	1

Pri tem pomenijo:

- $R_1$  - merjena upornost,
- $U$  - napetost mostiča,
- $I$  - tok mostiča,
- $I_1$  - tok skozi  $R_1$  in  $R_2$ ,
- $P$  - porabljena moč na mostiču in
- $P_0$  - potrebna moč za odklon enega delca na ničelnem indikatorju.

Upornost  $R_5$  in  $R_1$  določita faktor  $q$ :

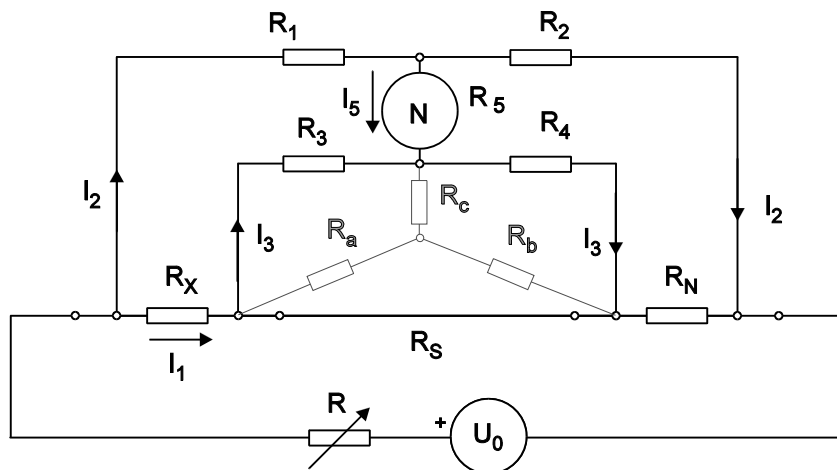
$$q = \frac{R_5}{R_1} \quad (6-17)$$

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  $1 \Omega$ . 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 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

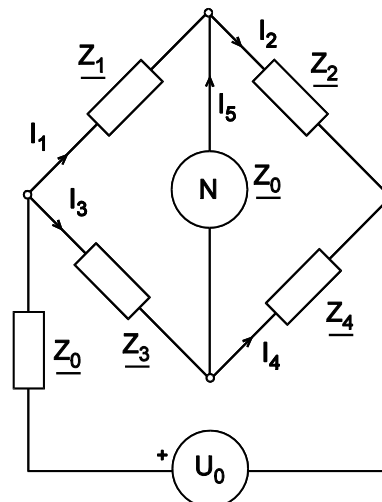
$$e_m = \pm \frac{I_{5\min}}{U} (R_1 + R_2) \cdot \left( 2 + R_5 \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \right). \quad (6-26)$$

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 je naslednje:



**Slika 6-6:** Vezje izmeničnega mostiča.

V ravnovesju ( $I_5 = 0$ ) mostiča velja

$$\begin{aligned} \frac{I_1 Z_1 - I_3 Z_3}{I_2 Z_2 - I_4 Z_4} = 0 & \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{I_3}{I_4} \\ \frac{I_2 Z_2 - I_4 Z_4}{I_1 Z_1 - I_3 Z_3} = 0 & \quad \frac{I_3}{I_4} = \frac{I_1}{I_2} \end{aligned} \quad (6-28)$$

in sledi

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4} \quad \text{ali} \quad \underline{Z_1 Z_4} = \underline{Z_2 Z_3}. \quad (6-29)$$

Če izrazimo impedance z realnimi in imaginarnimi komponentami, dobimo

$$(R_1 + jX_1) \cdot (R_4 + jX_4) = (R_2 + jX_2) \cdot (R_3 + jX_3). \quad (6-30)$$

Iz česar sledita dva pogoja za ravnovesje:

$$\begin{aligned} R_1 R_4 - X_1 X_4 &= R_2 R_3 - X_2 X_3 \quad \text{in} \\ R_1 X_4 + R_4 X_1 &= R_2 X_3 + R_3 X_2. \end{aligned} \quad (6-31)$$

Če pa impedance izrazimo v eksponentni obliki, je ravnovesna enačba

$$Z_1 \cdot e^{j\varphi_1} \cdot Z_4 \cdot e^{j\varphi_4} = Z_2 \cdot e^{j\varphi_2} \cdot Z_3 \cdot e^{j\varphi_3}, \quad (6-32)$$

iz katere prav tako sledita dva pogoja za ravnovesje

$$\begin{aligned} Z_1 Z_4 &= Z_2 Z_3 \quad \text{in} \\ \varphi_1 + \varphi_4 &= \varphi_2 + \varphi_3. \end{aligned} \quad (6-33)$$

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

$$\underline{e}_m = \pm \frac{I_{5\min}}{U_0} \left( \underline{Z}_{10} + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3 + \underline{Z}_4 + \underline{Z}_5 \left( \frac{\underline{Z}_{10}}{\underline{Z}_2} + 2 + \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_{10}} \right) \right). \quad (6-34)$$

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

$$\underline{e}_m = \pm \frac{U_{5\min}}{U_0} \left( \frac{\underline{Z}_{10}}{\underline{Z}_2} + 2 + \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_{10}} \right). \quad (6-35)$$

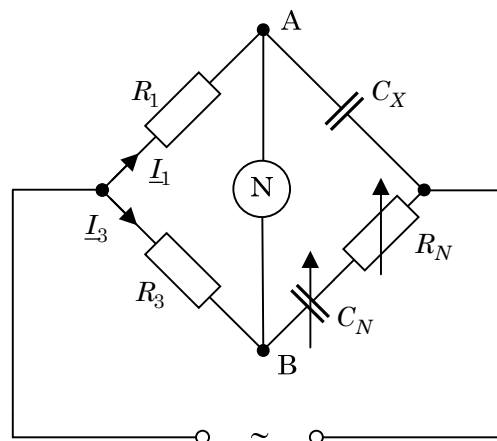
Pri tem velja, da je  $\underline{U}_{5_{\min}} = \underline{I}_{5_{\min}} \cdot \underline{Z}_5$ .

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, 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  $\text{tg}\delta_X$ . 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  $\text{tg}\delta_N \approx 0$ , 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:

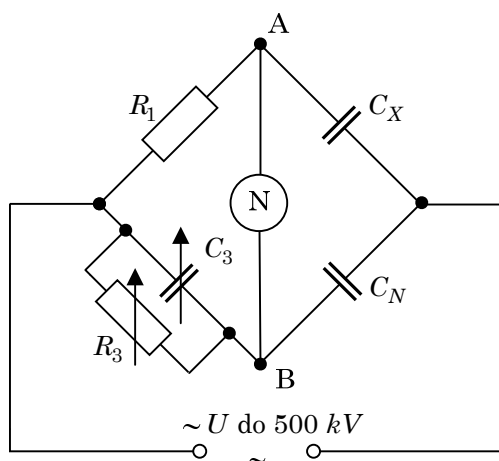
$$\frac{R_1}{j\omega C_N} = \frac{R_3}{j\omega C_X} \text{ in } C_X = C_N \frac{R_3}{R_1}. \quad (6-38)$$

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:

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

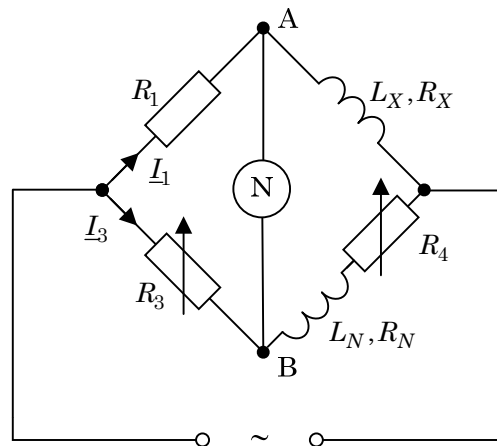
Izgubni faktor za zaporedno nadomestno vezavo  $C_X$  je:

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

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

### Maxwellov mostič

Z Maxwellovim mostičem lahko izmerimo induktivnost tuljave  $L_X$  in izgubni faktor  $\text{tg } \delta$ . 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.

Izhajajoč iz splošne ravnovesne enačbe (6-29) 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

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

Izgubni faktor tuljave  $\text{tg } \delta$  je



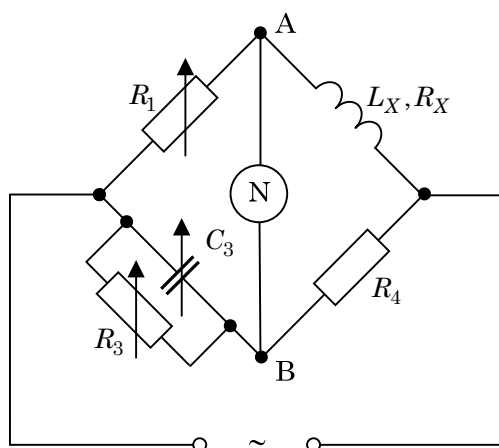
$$\operatorname{tg} \delta = \frac{R_X}{\omega L_X} = \frac{R_N + R_4}{\omega L_N}. \quad (6-48)$$

Faktor kakovosti tuljave pa

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

### 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  $Q$ .



**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

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

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

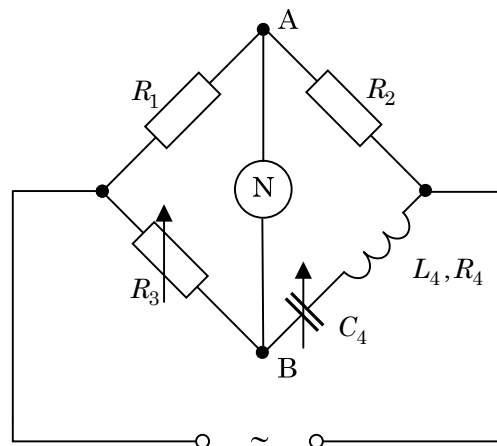
$$\operatorname{tg} \delta = \frac{R_X}{\omega L_X} = \frac{1}{\omega R_3 C_3}. \quad (6-53)$$

Faktor kakovosti tuljave pa

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

### 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. Ravnovesje dosežemo s spreminjanjem upora  $R_3$  in v primeru na sliki 6-11 s spreminjanjem kapacitivnosti kondenzatorja  $C_4$ .



**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

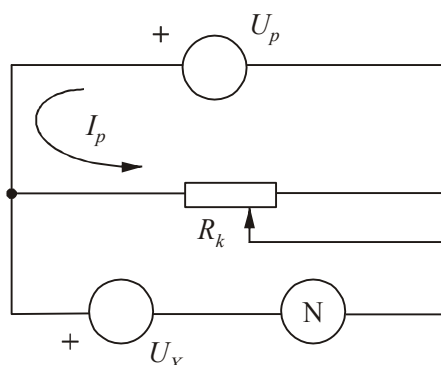
Kompenzator je merilno vezje, v katerem enosmerno (merjeno) napetost primerjamo z znano, ki jo spreminjamo tako, da se napetosti izenačita. Kompenzirano stanje, enakost obeh napetosti, ugotavljamo z ničelnim indikatorjem, čez katerega v tem stanju ne teče noben tok. Torej v času odčitavanja merilnega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

$$U_X = I_p R_k \tag{6-56}$$

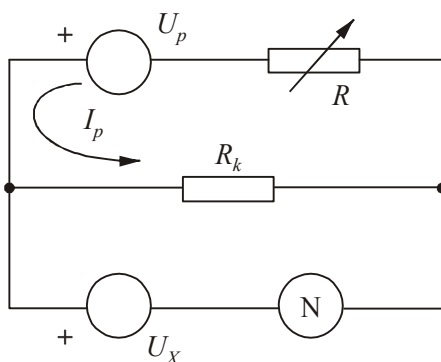


*Slika 6-12: Poggendorffov kompenzacijski princip.*

**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.

$$U_X = I_p R_k \tag{6-57}$$



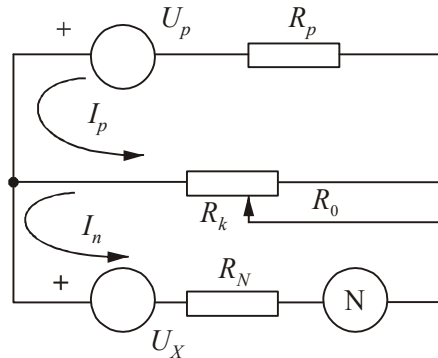
*Slika 6-13: Lindeck-Rothejev kompenzacijski princip.*

V obeh primerih moramo poznati vrednost toka  $I_p$ , ki ga lahko merimo z ampermetrom, ki na slikah ni vrisan. Vrednost upornosti  $R_k$  pa določimo s posebno meritvijo, ali pa z odčitavanjem nastavljenе 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 pogrškov 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 vnašamo v meritev zaradi tega.

### 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 Kirchoffovim 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  $\Delta U_X$ , 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.

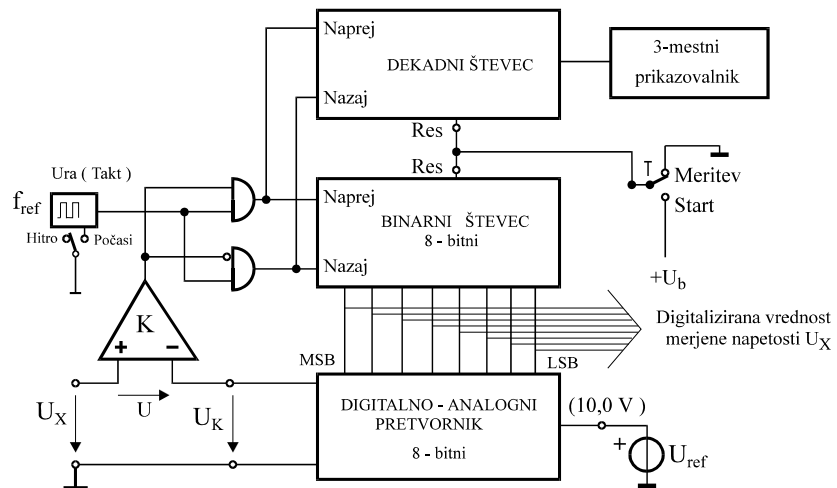
### 6.2.3 Samodejno digitalno kompenzacijsko vezje

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

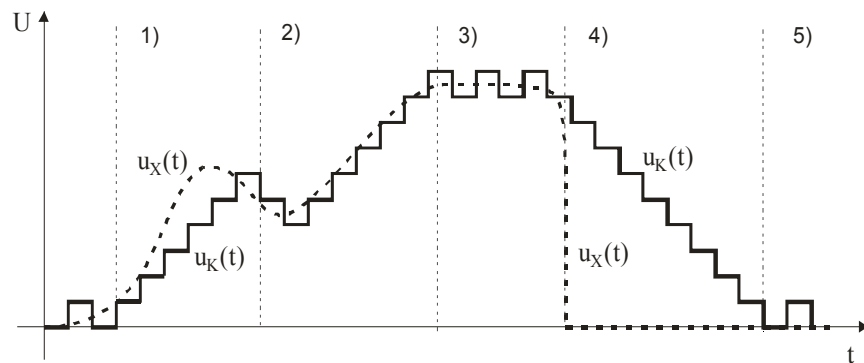
- primerjalnik,
- digitalno analogni pretvornik,
- števec in
- digitalno krmilno vezje.

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  $\Delta U$  se na izhodu primerjalnika vzpostavi stanje 0 (0 V) ali 1 (+15 V). Digitalno analogni pretvornik ( $D/A$ ) nastavlja napetost  $U_K$  tako, da doseže razlika  $\Delta U = U_X - U_K$  manjšo vrednost, kot je napetostna stopnica signala iz  $D/A$  pretvornika.  $D/A$  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  $D/A$  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.*



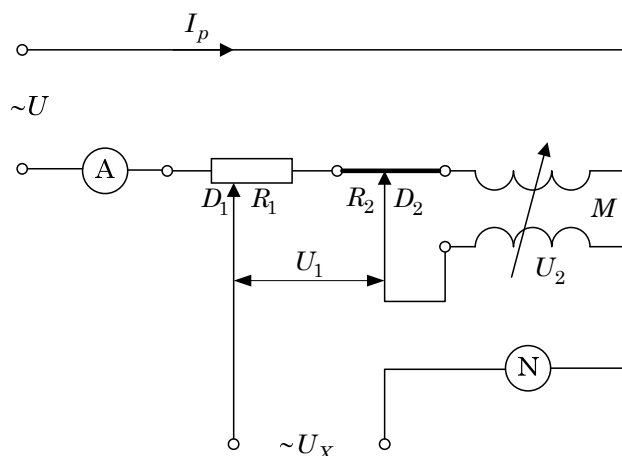
*Slika 6-16: Časovni potek signalov pri delovanju samodejnega digitalnega kompenzacijskega vezja.*

### 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. Oglejmo si eno od najenostavnejših.

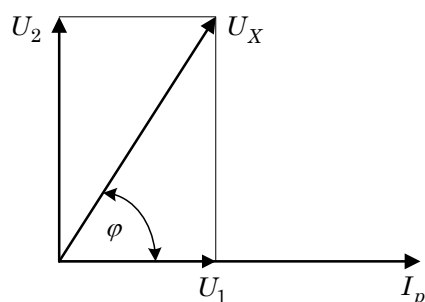
#### 6.3.1 Kompleksni kompenzator

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  $90^\circ$ , 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:

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

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  $\varphi$  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  $D_2$ , s čimer spreminjamo  $U_1$  in da s

spremembo medsebojne induktivnosti  $M$  zračnega transformatorja spreminjamo  $U_2$ .



## 7. MERJENJE ELEKTRIČNIH VELIČIN

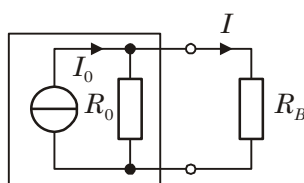
Električne veličine kot so tok, napetost, upornost, kapacitivnost, induktivnost, frekvenco, moč je mogoče meriti na različne načine. Velikokrat uporabimo merilne instrumente in naprave za neposredno merjenje, pogosto pa uporabimo primerne merilne metode in iskano veličino določimo posredno iz drugih 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.

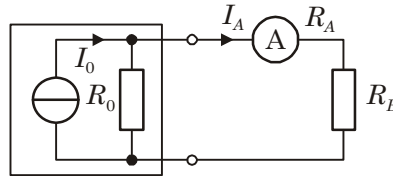
Tok  $I$  skozi breme  $R_B$  je v tem primeru

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

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.*

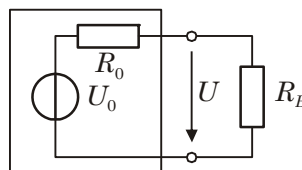
Če privzamemo, da je tok  $I_A$  enak toku, ki teče v vezju brez ampermetra, napravimo relativni sistematični pogrešek  $e_I$ , ki mu pravimo tudi pogrešek merilne metode:

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

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.*

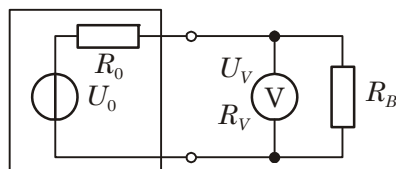
Napetost na bremenu  $R_B$  je v tem primeru

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

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 privzamemo, da je napetost  $U_V$  enaka napetosti, 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. 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, slika 5-8. Kondenzator  $C$  mora imeti visoko kakovost, torej čim manjši izgubni faktor  $\text{tg}\delta$ , 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

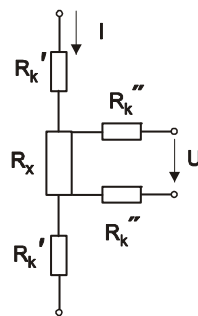
Ohmska upornost  $R$  je definirana kot recipročna vrednost ohmske prevodnosti  $G$ , ki je snovno geometrijska lastnost vodnika po katerem teče tok. Enota ohmske upornosti  $1 \Omega$  ( $\text{ohm} = \text{V/A}$ ) je upornost, ki jo ima ohmski upor, skozi katerega napetost  $1 \text{ V}$  požene tok  $1 \text{ A}$ . Upornost idealnega upora je torej razmerje trenutne napetosti in trenutnega toka. Realni upori vsebujejo še kapacitivnost in induktivnost in je zato upornost odvisna od oblike toka in napetosti. Zaradi upornosti se električna energija pretvarja v toplotno energijo. Količina toplotne energije je odvisna od oblike toka. 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 tokom praviloma sinusne oblike. Realne upore nadomestimo z nadomestnimi vezji, z vzporedno vezavo ali zaporedno vezavo idealnih elementov, tabela 7-1. Ohmsko upornost merimo z meritvijo delovne komponente napetosti (ali toka), oziroma z merjenjem delovne moči in napetosti (toka), odvisno od zaporedne ali vzporedne nadomestne vezave.

### 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 $\operatorname{tg} \delta$ in faktor kvalitete $Q$
(a)			$R_s = \frac{U \cdot \cos \varphi}{I} = \frac{P}{I^2}$ $L_s = \frac{U \cdot \sin \varphi}{\omega \cdot I} = \frac{\sqrt{(U \cdot I)^2 - P^2}}{\omega \cdot I^2}$ $Q = \frac{\omega \cdot L_s}{R_s} = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta}$
(b)			$R_s = \frac{U \cdot \cos \varphi}{I} = \frac{P}{I^2}$ $C_s = \frac{I}{\omega \cdot U \cdot \sin \varphi} = \frac{I^2}{\omega \cdot \sqrt{(U \cdot I)^2 - P^2}}$ $\operatorname{tg} \delta = \omega \cdot R_s \cdot C_s$
(c)			$R_p = \frac{U}{I \cdot \cos \varphi} = \frac{U^2}{P}$ $L_p = \frac{U}{\omega \cdot I \cdot \sin \varphi} = \frac{U^2}{\omega \cdot \sqrt{(U \cdot I)^2 - P^2}}$ $Q = \frac{R_p}{\omega \cdot L_p} = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta}$
(d)			$R_p = \frac{U}{I \cdot \cos \varphi} = \frac{U^2}{P}$ $C_p = \frac{I \cdot \sin \varphi}{\omega \cdot U} = \frac{\sqrt{(U \cdot I)^2 - P^2}}{\omega \cdot U^2}$ $\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega \cdot R_p \cdot C_p}$

### 7.2.3 Merjenje notranje upornosti aktivnih dvopolov

Pri aktivnih dvopolih (primer: baterija) notranjo upornost definiramo kot razmerje med spremembo napetosti na sponkah in ustrezno spremembo toka.

$$R_n = \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (7-7)$$

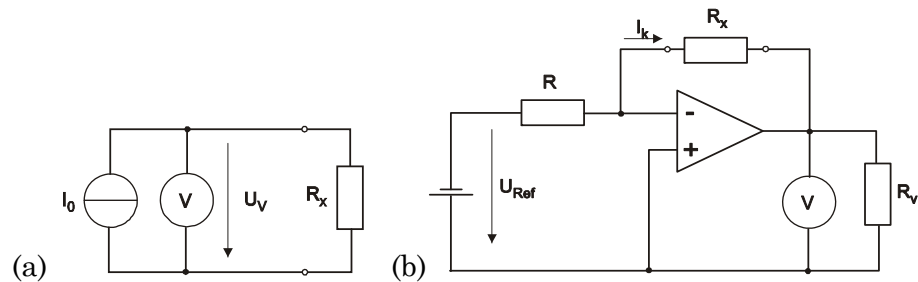
Notranja upornost je lahko konstantna ali pa se spreminja z obremenitvijo aktivnega dvopola. V tem drugem primeru moramo izmeriti odvisnost napetosti od toka in narisati njeno karakteristiko.

### 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).

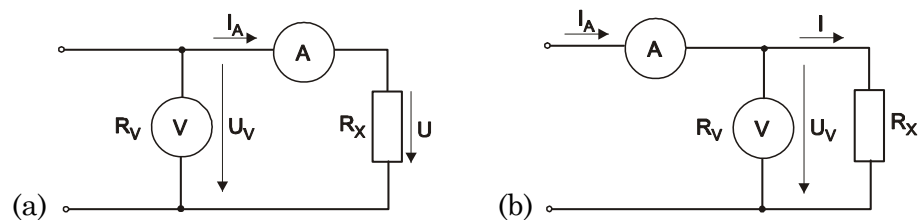
Ob upoštevanju  $R_v \gg R_x$  in konstantnem toku  $I_0$ , je  $U_V$  sorazmerna  $R_x$ .

$$U_V = I_0 \cdot \frac{R_x \cdot R_v}{R_x + R_v} = I_0 \cdot R_x \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_x}{R_v}} \approx I_0 \cdot R_x \quad (7-8)$$

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, slika 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:

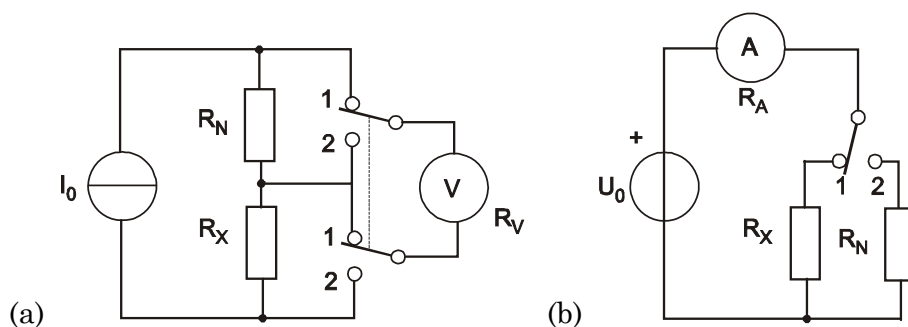
$$R = \frac{U_V}{I_A} = \frac{U_V}{U_V} \cdot \frac{R_x \cdot R_V}{R_x + R_V} = \frac{R_x \cdot R_V}{R_x + R_V} \text{ in}$$

$$e = \frac{R - R_x}{R_x} = \frac{\frac{U_V}{I_A} - R_x}{R_x} = -\frac{R_x}{R_x + R_V} \quad (7-11)$$

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 padec napetosti na vzporedni vezavi upornosti  $R_x$  in upornosti voltmetra  $R_V$ :

$$U_x = I_0 \cdot \frac{R_x \cdot R_V}{R_x + R_V}, \quad (7-14)$$

ko je stikalo v položaju 2. 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 tem 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 upornost voltmetra  $R_V$  ali pa z izbiro znanega upora  $R_N$ , ki naj bo približno enak neznanemu upornosti  $R_x$ .

Podobna izvajanja veljajo za tokovno primerjalno metodo na sliki 7-8b kjer dobimo:

$$R_x = (R_N + R_A) \cdot \frac{I_N}{I_x} - R_A \cong R_N \cdot \frac{I_N}{I_x}. \quad (7-17)$$

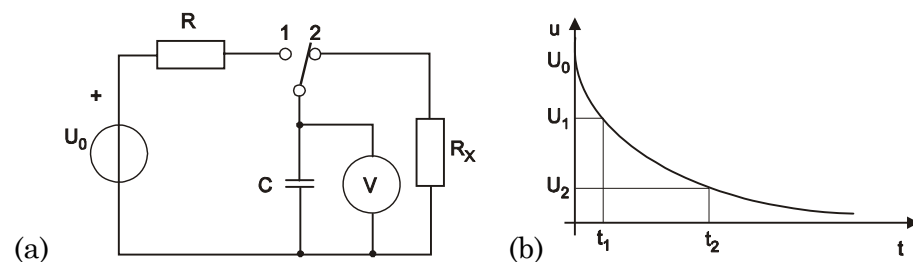
Pri računanju s poenostavljeno enačbo, kjer zanemarimo notranjo upornost ampermetra, smo napravili sistematski pogrešek:

$$e = \frac{R_A}{R_x} \cdot \frac{R_N - R_x}{R_N - R_A}. \quad (7-18)$$

Iz enačbe se vidi, da sistematski pogrešek zmanjšamo z izbiro znane upornosti  $R_N$ .

### 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 začetno 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 neznanu 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  $R_1 = R_i \parallel R_V$ , v drugi pa čez vzporedno vezavo voltmetra, izolacijske upornosti kondenzatorja in neznanega upora  $R_2 = R_1 \parallel R_x$ . 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 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  $\phi$  oziroma magnetnega sklepa  $\psi$ . 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  $\psi$  in tokom  $I$  tuljave. Enota induktivnosti je 1 H (henry) = 1 Vs/A.

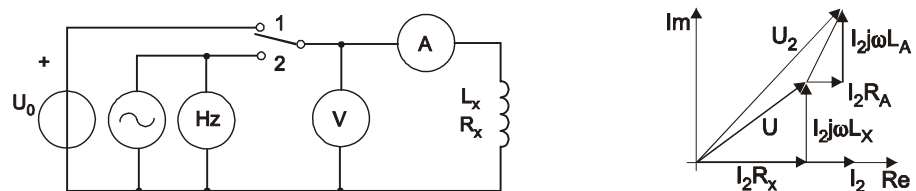
Induktivnost idealne tuljave je razmerje med napetostjo na tuljavi in odvodom toka po času. Realna tuljava ima poleg induktivnosti še določeno ohmsko upornost (kapacitivnost zanemarimo) in jo predstavljamo z vzporednim ali zaporednim nadomestnim vezjem idealnih elementov, podobno kot realni upor, tabela 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  $U_2$ , ampermetr pa vrednost  $I_2$ , ki sta narisani v kazalnem diagramu na sliki 7-10. Impedanco izračunamo po enačbi

$$Z = \frac{U_2}{I_2} = \sqrt{(R_x + R_A)^2 + \omega^2 \cdot (L_x + L_A)^2} \quad (7-24)$$

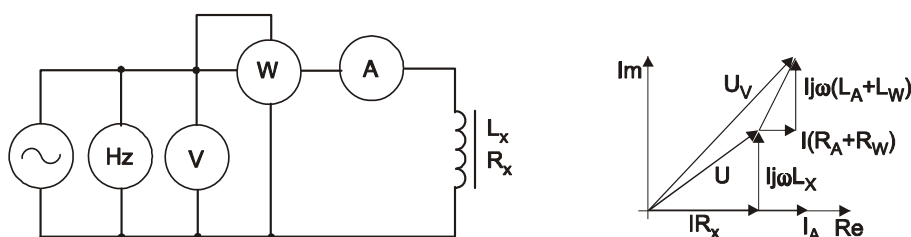
in po kratki izpeljavi induktivnost po enačbi

$$L_x = \frac{1}{\omega} \cdot \sqrt{\left(\frac{U_2}{I_2}\right)^2 - \left(\frac{U_1}{I_1}\right)^2} - L_A. \quad (7-25)$$

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, slika 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. To pomeni, da bo induktivnost tuljave z železnim jedrom odvisna od toka pri katerem jo merimo.
- Permeabilnost pa se spreminja tudi z obliko toka magnetenja. Meriti moramo 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  $\text{tg} \delta$  ( $\delta = 90^\circ - \varphi$ ), ki je podan z razmerjem ohmske in induktivne upornosti tuljave

$$\text{tg} \delta = \frac{R_x}{\omega L_x}. \quad (7-27)$$

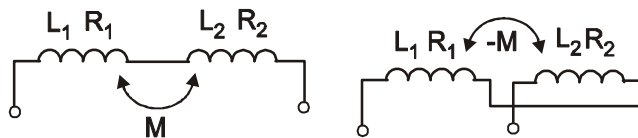
Torej je

$$Q = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta} = \frac{\omega L_x}{R_x}. \quad (7-28)$$

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 razmerje med inducirano napetostjo v enem krogu in časovnim odvodom toka v drugem krogu. Vpliv medsebojne induktivnosti  $M$  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  $M$  z merjenjem skupne induktivnosti.

V prvem primeru dobimo induktivnost

$$L' = L_1 + L_2 + 2 \cdot M \quad (7-29)$$

v drugem pa

$$L'' = L_1 + L_2 - 2 \cdot M \quad (7-30)$$

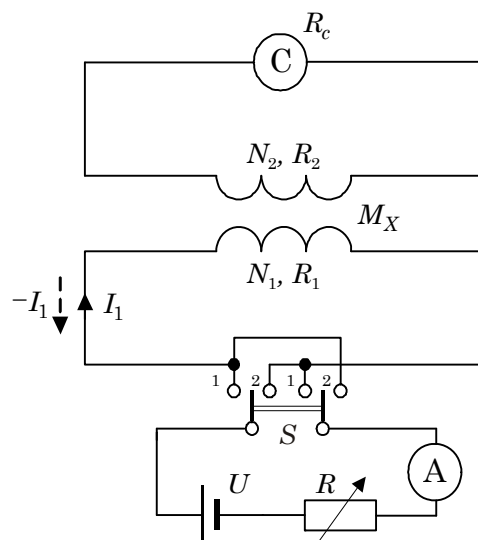
in medsebojno induktivnost

$$M = \frac{L' - L''}{4}. \quad (7-31)$$

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 C-metrom 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  $S$  preklopimo v položaj 2. Smer toka  $I_1$  skozi tuljavo z  $N_1$  ovoji se spremeni, zato se zaradi spremembe magnetnega pretoka s  $\phi$  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  $\alpha$ :

$$Q = C_b \cdot \alpha. \quad (7-36)$$

### 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*  $d$ ) in ga računamo kot tangens izgubnega kota  $\delta$ . Za zaporedno nadomestno vezje je

$$\operatorname{tg} \delta = d = \omega \cdot R_s C_s, \quad (7-37)$$

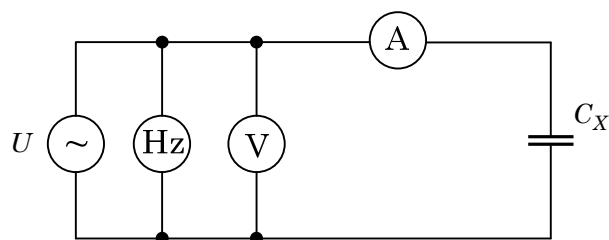
in za vzporedno

$$\operatorname{tg} \delta = d = \frac{1}{\omega \cdot R_p C_p}. \quad (7-38)$$

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.

$$Z = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + \frac{1}{(\omega \cdot C_x)^2}} = \frac{1}{\omega \cdot C_x} \cdot \sqrt{1 + d^2}. \quad (7-39)$$

Pri kvalitetnih kondenzatorjih ( $\operatorname{tg} \delta < 0,01$ ) so izgube zanemarljive in enačba se poenostavi

$$Z = \frac{1}{\omega \cdot C_x} \quad (7-40)$$

in kapacitivnost izračunamo kot

$$C_x = \frac{I}{\omega \cdot U}. \quad (7-41)$$

Padeč napetosti na ampermetru ni v fazi s padcem napetosti na kondenzatorju in zato prinaša manjši pogrešek kot pri  $U-I$  metodi merjenja ohmskih upornosti. Za razumevanje si narišite kazalčni diagram. Metoda je primerna za merjenje kapacitivnosti z omejeno merilno točnostjo.

Pri večjih zahtevah po točnosti merjenja kapacitivnosti moramo uporabiti mostična vezja.

### Merjenje kapacitivnosti elektrolitskih kondenzatorjev

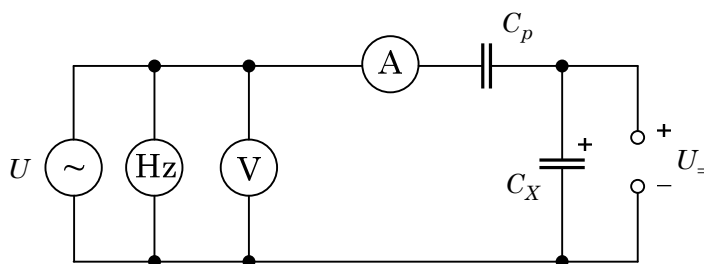
Tudi kapacitivnost elektrolitskih kondenzatorjev merimo z  $U-I$  metodo. Pozorni moramo biti le na pravilno napetostno polarizacijo. Ker merimo kapacitivnost z izmeničnim tokom in napetostjo, moramo kondenzator priključiti na enosmerno prednapetost, ki bo večja od amplitude izmeničnega signala. Vsota obeh napetosti ne sme biti večja od nazivne napetosti kondenzatorja. Izračun kapacitivnosti:

$$C = \frac{C_P \cdot C_X}{C_P + C_X}$$

$$C = \frac{I_C}{\omega \cdot U_C}$$

in

$$C_X = \frac{C \cdot C_P}{C_P - C_N}. \quad (7-42)$$



**Slika 7-15:** Merjenje kapacitivnosti elektrolitskih kondenzatorjev.

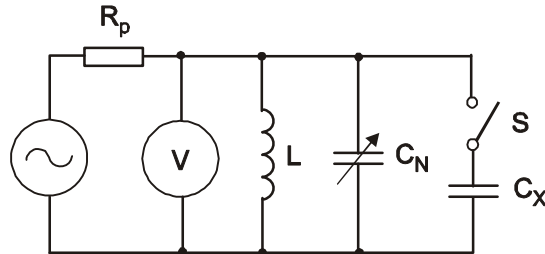
### Resonančna metoda

Za merjenje kapacitivnosti v visokofrekvenčnem področju je zaradi možnega vpliva parazitnih kapacitivnosti najbolj primerna resonančna metoda, slika 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

$L-C_N \parallel C_X$  in odčitamo kapacitivnost  $C_{N2}$ . Neznano kapacitivnost izračunamo po enačbi

$$C_x = C_{N1} - C_{N2}. \quad (7-43)$$



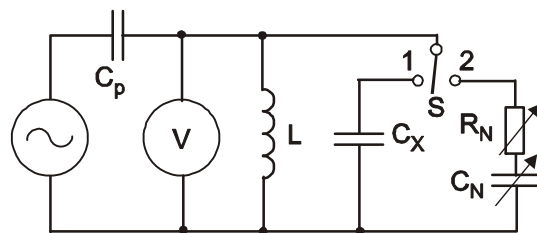
**Slika 7-16:** Resonančna metoda merjenja kapacitivnosti.

### 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 zaradi ohmske upornosti kondenzatorja in padca napetosti zaradi kapacitivnosti kondenzatorja. V primeru vzporednega nadomestnega vezja pa definiramo izgubni faktor kot razmerje toka zaradi ohmske upornosti kondenzatorja in toka skozi kapacitivnost.

### 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 dekad, za katero predpostavimo zanemarljive izgube, zaporedno dodamo uporovno dekad.



**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  $L-C_x$ . Zatem v položaju 2, pri nespremenjeni frekvenci, ponovno poiščemo resonanco s spreminjanjem kapacitivne in uporovne dekade. Pri tem mora voltmeter pokazati enak odklon. Takrat zaporedna vezava  $R_N$  in  $C_N$  ustreza zaporedni nadomestni vezavi  $C_X$  in  $R_X$  s pomočjo katerih lahko izračunamo izgubni faktor:

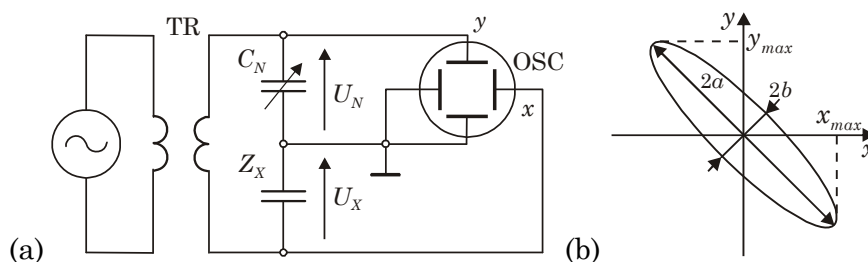
$$\operatorname{tg} \delta = \omega_0 \cdot R_x \cdot C_x = \omega_0 \cdot R_N \cdot C_N. \quad (7-44)$$



### Merjenje izgubnega faktorja kapacitivnega bremena z osciloskopom

Na zaslonu osciloskopa, ki je v  $x$ - $y$  načinu delovanja in ko sta na odklonskih ploščah osciloskopa dve fazno premaknjeni napetosti različnih frekvenc, dobimo eno od Lissajousovih krivulj. Oblika krivulje je odvisna od razmerja frekvenc obeh napetosti in faznega kota med njima. Ta princip izkoriščamo za merjenje frekvenc z osciloskopom in za merjenje fazne premaknitve med signali. Pri merjenju izgubnega faktorja vežemo zaporedno k merjencu (neznani impedanci) kapacitivno normalo z zanemarljivim izgubnim kotom. Na  $y$  odklonske plošče osciloskopa priključimo napetost na kapacitivni normalo 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  $90^\circ$  (in enakih napetosti ter ojačenj na osciloskopu), bi dobili na zaslonu krog. Izgubni faktor izračunamo iz ploščine elipse

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{a \cdot b}{x_{\max} \cdot y_{\max}}. \quad (7-45)$$



**Slika 7-18:** Merjenje izgubnega faktorja kapacitivnega bremena z osciloskopom. Vežje (a) in izris elipse (b).

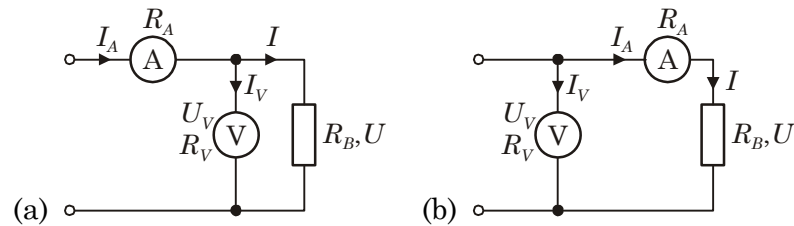
## 7.4 Merjenje moči

### 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

$$P = U \cdot I \quad (7-46)$$

Ker lahko merilna instrumenta, voltmeter in ampermeter, vključimo v vežje 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

$$P_B = U \cdot I. \quad (7-47)$$

V primeru po sliki 7-19a je iz izmerjenih vrednosti napetosti in toka dobljena moč

$$P_i = U_V \cdot I_A. \quad (7-48)$$

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

$$P_i = U \left( I + \frac{U}{R_V} \right) = U \cdot I + \frac{U^2}{R_V} = P_B + \frac{U^2}{R_V}. \quad (7-49)$$

Torej je izmerjena moč  $P_i$  nekoliko večja, kot je iskana moč bremena  $P_B$ .

Če privzamemo, da je izmerjena moč  $P_i$  moč bremena  $P_B$ , napravimo sistematski relativni pogrešek  $e$ , ki je imenovan tudi pogrešek merilne metode:

$$e = \frac{P_i - P_B}{P_B} = \frac{U \cdot I + \frac{U^2}{R_V} - U \cdot I}{U \cdot I} = \frac{U}{R_V \cdot I} = \frac{R_B}{R_V}. \quad (7-50)$$

Pogrešek merilne metode je pozitiven in tem manjši, čim večji je tok bremena in čim nižja je napajalna napetost, oziroma upornost bremena  $R_B$  majhna glede na upornost voltmetra  $R_V$ .

V primeru po sliki 7-19b je izmerjena moč

$$P_i = U_V \cdot I_A. \quad (7-51)$$

Ker je  $I_A = I$  in  $U_V = U + I_A \cdot R_A$  dobi izraz za  $P_i$  obliko

$$P_i = (U + I \cdot R_A) \cdot I = U \cdot I + I^2 \cdot R_A = P_B + I^2 \cdot R_A. \quad (7-52)$$

Tudi tokrat je izmerjena moč  $P_i$  nekoliko večja, kot je moč bremena  $P_B$ .

Določimo še pogrešek merilne metode  $e$  če privzamemo, da je izmerjena moč  $P_i$  moč bremena  $P_B$ :

$$e = \frac{P_i - P_B}{P_B} = \frac{U \cdot I + I^2 \cdot R_A - U \cdot I}{U \cdot I} = \frac{I^2 \cdot R_A}{U \cdot I} = \frac{I \cdot R_A}{U} = \frac{R_A}{R_B}. \quad (7-53)$$

Pogrešek merilne metode je pozitiven in je tem manjši čim manjši je tok bremena in višja je napetost na bremenu, oziroma upornost  $R_B$  velika 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.

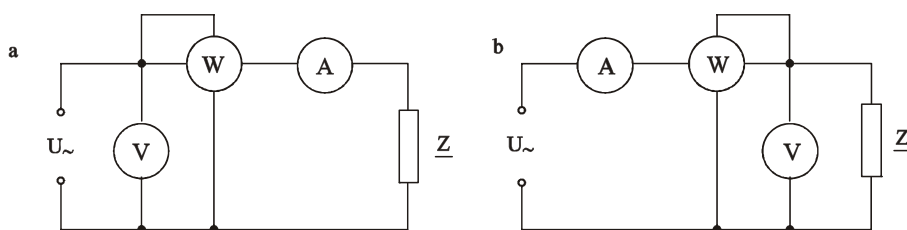
#### 7.4.2 Merjenje delovne moči v enofaznih sistemih

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:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi, \quad (7-54)$$

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 veje. Seveda instrument potem 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 pogosteje na razpolago, kot podatki tokovnih vej. Kot primer si oglejmo dve različni vezji.



**Slika 7-20:** Primera priklopa instrumentov pri merjenju moči.

Delovno moč  $P$  porabnika  $\underline{Z}$  v primeru a določimo z izrazom

$$P = P_W - I^2 (R_W + R_A). \quad (7-55)$$

Torej smo od moči, ki jo izmeri vatmeter, odšteli porabo tokovne veje vatmetra in ampermetra. Če pa predpostavimo, da je

$$P_W \approx P, \quad (7-56)$$

napravimo sistematski pogrešek

$$e = \frac{P_W - P}{P}, \quad (7-57)$$

katerega vrednost se da izračunati in na osnovi tega odločiti, če je taka poenostavitev sprejemljiva.

V primeru b pa izračunamo delovno moč  $P$  porabnika  $Z$  z izrazom

$$P = P_W - U^2 \left( \frac{1}{R_{nW}} + \frac{1}{R_V} \right). \quad (7-58)$$

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 pogosteje srečamo vezje b.

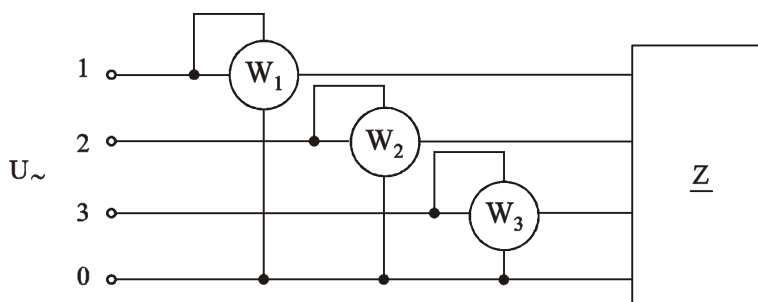
Posebno pazljivi moramo biti tudi pri merjenju delovne moči bremen z nizkim  $\cos \varphi$ . Če uporabljamo vatmeter s podatkom  $\cos \varphi_W = 1$ , kar pomeni, da instrument pokaže polno (končno) vrednost pri nazivni napetosti in toku, ter  $\cos \varphi = 1$ , je pri nizkem  $\cos \varphi$  porabnika 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 do  $\cos \varphi_W = 0,05$ .

### 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 najpogosteje 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,

$$P = P_{W1} + P_{W2} + P_{W3}. \quad (7-59)$$

Slika 7-21 prikazuje vezalno shemo za ta primer.



**Slika 7-21:** Vezje za merjenje moči s tremi  $W$ -metri.

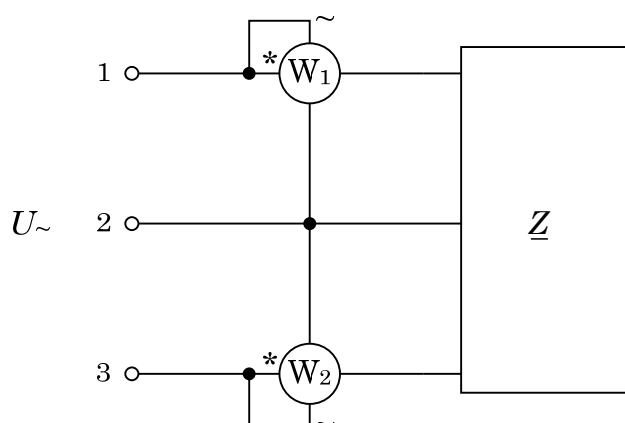
Le v primeru simetrične obremenitve je mogoče meriti z enim vatmetrom v eni fazi in je  $P = 3P_W$ .

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 in vse spremembe moči med preklapljanjem se odrazijo na končnem merilnem rezultatu in 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, upoštevaje 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, priključitev pa mora biti skladna z navedenim načinom.

Pojasnimo merjenje z Aronovo vezavo. Vsota trenutnih moči v posameznih fazah je skupna moč trifaznega sistema

$$p = u_1 \cdot i_1 + u_2 \cdot i_2 + u_3 \cdot i_3. \quad (7-60)$$

Ker ni nevtralnega vodnika, velja v vsakem trenutku

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0 \text{ in zato } i_2 = -(i_1 + i_3). \quad (7-61)$$

Zato je trenutna moč

$$\begin{aligned} p &= u_1 \cdot i_1 + u_2 \cdot (-(i_1 + i_3)) + u_3 \cdot i_3 = \\ &= u_1 \cdot i_1 - u_2 \cdot i_1 - u_2 \cdot i_3 + u_3 \cdot i_3 = \\ &= i_1 \cdot (u_1 - u_2) + i_3 \cdot (u_3 - u_2) = i_1 \cdot u_{12} + i_3 \cdot u_{32}. \end{aligned} \quad (7-62)$$

Vatmetra sta priključena ustrezno temu izrazu, kažeta pa srednjo vrednost obeh sumandov. Zato lahko zapišemo:

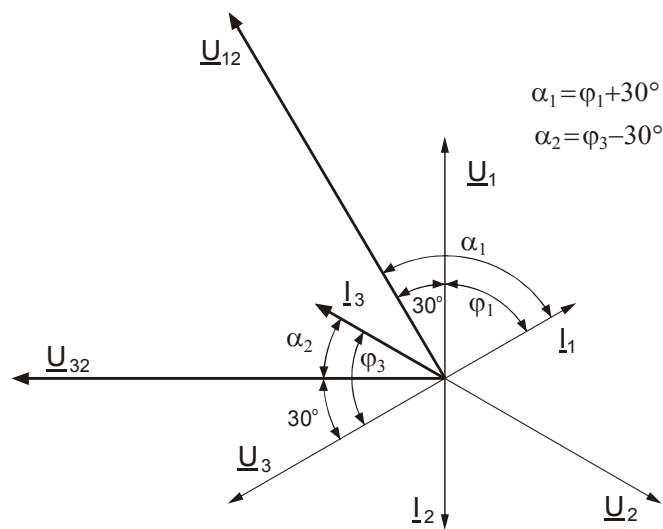
$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^T i_1 \cdot u_{12} \cdot dt + \frac{1}{T} \int_0^T i_3 \cdot u_{32} \cdot dt. \quad (7-63)$$

Pri sinusnih veličinah dobimo

$$P = I_1 \cdot U_{12} \cdot \cos \alpha_1 + I_3 \cdot U_{32} \cdot \cos \alpha_2, \text{ oziroma} \quad (7-64)$$

$$P = P_{W1} + P_{W2}. \quad (7-65)$$

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

$$P = I_1 \cdot U_{12} \cos(\varphi_1 + 30^\circ) + I_3 \cdot U_{32} \cos(\varphi_3 - 30^\circ). \quad (7-66)$$

Nekoliko enostavneje je opazovanje dogajanj za simetrične porabnike, torej pri vrednostih

$$I_1 = I_2 = I_3 = I \quad U_{12} = U_{23} = U_{32} = U \quad \varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \varphi \quad \text{in}$$

$$P = U \cdot I \cdot \cos(\varphi + 30^\circ) + U \cdot I \cdot \cos(\varphi - 30^\circ). \quad (7-67)$$

Vatmetra bosta pokazala enako moč pri  $\varphi = 0^\circ$

$$P_1 = P_2 = U \cdot I \cdot \cos 30^\circ$$

$$\cos 30^\circ = \cos(-30^\circ), \quad (7-68)$$

v vseh drugih primerih pa različno. Pri  $\varphi = 60^\circ$  bo prvi vatmeter kazal nič, ker je

$$\cos(\varphi + 30^\circ) = \cos 90^\circ = 0 \quad \text{in je } P = P_2, \quad (7-69)$$

pri kotih  $\varphi > 60^\circ$  pa je kazanje prvega vatmetra negativno in je treba skupno moč določiti z izrazom

$$P = P_2 - P_1. \quad (7-70)$$

Praktično pa v teh primerih postopamo tako: vežemo po osnovni vezalni shemi, če sta po priključitvi kazanja 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	
$\varphi < 60^\circ$	$P = P_1 + P_2$	$P = P_1 + P_2$	(7-71)
$\varphi = 60^\circ$	$P = P_2 (P_1 = 0)$	$P = P_1 (P_2 = 0)$	
$\varphi > 60^\circ$	$P = P_2 - P_1$	$P = P_1 - P_2$	

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

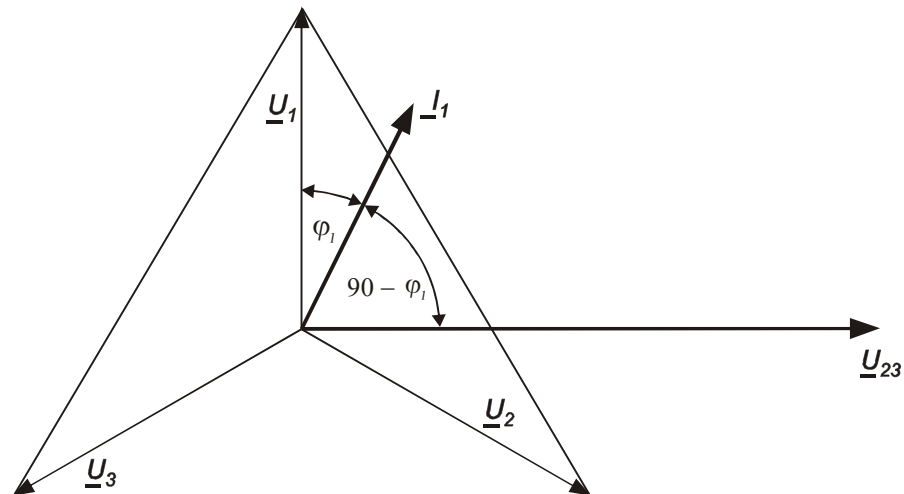
Jalovo moč lahko v trifaznem sistemu merimo s tremi vatmetri vendar tako, da njihove napetostne veje priključimo na ustrezne medfazne napetosti.

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  $\varphi$  kot med njima.

Za jalovo moč pa velja izraz

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi = U \cdot I \cdot \cos(90^\circ - \varphi). \quad (7-72)$$

Če, na primer, napetostno vejo vatmetra priključimo na napetost, ki je za  $90^\circ$  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

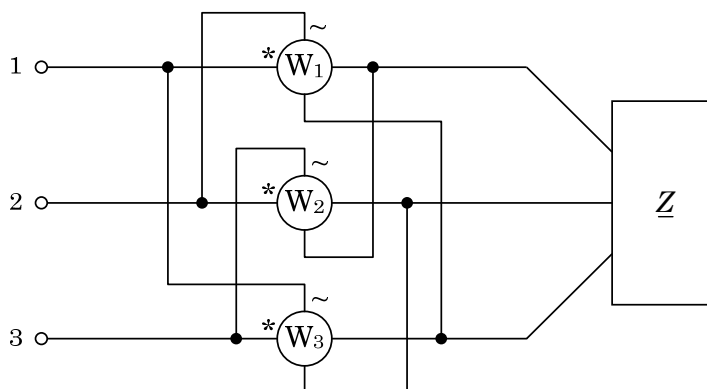
$$Q_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} P_{W_1}, \quad (7-73)$$

jalova moč trifaznega bremena pa

$$Q = \frac{1}{\sqrt{3}} (P_{W_1} + P_{W_2} + P_{W_3}). \quad (7-74)$$

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  $\underline{Z}$ . Vzemimo primer simetričnega sistema z ohmsko induktivnim porabnikom in tvorimo razliko kazanj obeh vatmetrov:

$$\begin{aligned} \Delta &= P_2 - P_1 = U \cdot I \cdot \cos(\varphi - 30^\circ) - U \cdot I \cdot \cos(\varphi + 30^\circ) = \\ &= UI(\cos \varphi \cos 30^\circ + \sin \varphi \sin 30^\circ) - UI(\cos \varphi \cos 30^\circ - \sin \varphi \sin 30^\circ) = \\ &= UI(\cos \varphi \cos 30^\circ + \sin \varphi \sin 30^\circ - \cos \varphi \cos 30^\circ + \sin \varphi \sin 30^\circ) = \\ &= 2 \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi \sin 30^\circ = U \cdot I \cdot \sin \varphi. \end{aligned} \quad (7-75)$$

Jalova moč simetričnega porabnika je

$$\begin{aligned} Q &= \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi, \text{ oziroma} \\ Q &= \sqrt{3} \cdot \Delta \text{ in} \\ Q &= \sqrt{3} \cdot (P_2 - P_1). \end{aligned} \quad (7-76)$$

Tudi v tem primeru pride pri  $\varphi > 60^\circ$  do sprememb smeri (predznaka) kazanja enega vatmetra, odvisno od vrste porabnika in velja tabela za izračun jalove moči:

	$R - L$ porabnik	$R - C$ porabnik	
$\varphi < 60^\circ$	$Q = \sqrt{3} \cdot (P_2 - P_1)$	$Q = \sqrt{3} \cdot (P_1 - P_2)$	. (7-77)
$\varphi = 60^\circ$	$Q = \sqrt{3} \cdot P_2$	$Q = \sqrt{3} \cdot P_1$	
$\varphi > 60^\circ$	$Q = \sqrt{3} \cdot (P_2 + P_1)$	$Q = \sqrt{3} \cdot (P_1 + P_2)$	

#### 7.4.6 Merjenje delovne moči z osciloskopom

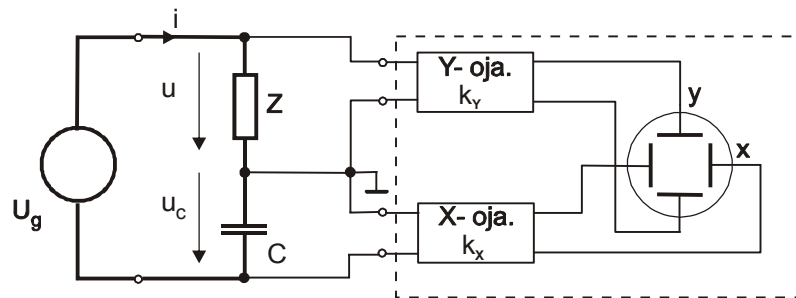
Tak način merjenja je uporabljan za merjenje majhnih delovnih moči, samo pri izmeničnem napajanju. Tok in napetost ne smeta imeti enosmerne komponente, ni pa nujno, da sta sinusna. Merilno vezje je na sliki 7-26.

Tok čez kondenzator je enak toku bremena in je

$$i(t) = C \frac{du_c(t)}{dt}, \quad (7-78)$$

hkrti je delovna moč

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot C \frac{du_c(t)}{dt} \cdot dt = f \cdot C \cdot \oint u \cdot du_c. \quad (7-79)$$



**Slika 7-26:** Vezje za merjenje delovne moči z osciloskopom.

Pojav se periodično ponavlja, zadnji izraz vsebuje integral po sklenjeni poti. Obe napetosti izmerimo z osciloskopom:

$$u = u_y = k_y \cdot y \quad (7-80)$$

$$u_c = -u_x = -k_x \cdot x \Rightarrow du_c = -k_x \cdot dx. \quad (7-81)$$

Z upoštevanjem enačb (7-80) in (7-81) izraz za moč (7-79) preoblikujemo v obliko

$$P = -f \cdot C \cdot k_x \cdot k_y \cdot \oint_L y \cdot dx. \quad (7-82)$$

Ker pa velja

$$\oint_L y \cdot dx = -\oint_L x \cdot dy, \quad (7-83)$$

izračunamo delovno moč z enačbo

$$P = f \cdot C \cdot k_x \cdot k_y \cdot A, \quad (7-84)$$

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

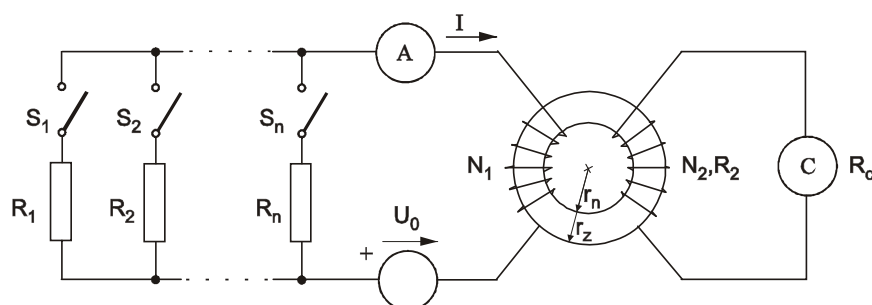
Merilne metode, s katerimi določamo lastnosti feromagnetnih snovi, so zelo pomembne, saj dobimo z njimi osnovne podatke, ki služijo za izračun in konstrukcijo predvsem električnih strojev in drugih naprav. Največkrat se pri teh merjenjih določajo poteki deviških in komutacijskih magnetilnic, statičnih 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 merjenca, oziroma preizkušenelega 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 (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 namestitvev 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

$$H_k = \frac{I_k N_1}{l_{sr}}. \quad (7-85)$$

Srednjo dolžino silnic  $l_{sr}$  izračunamo z enačbo

$$l_{sr} = 2\pi \frac{r_z + r_n}{2}. \quad (7-86)$$

Če pa je razlika polmerov toroida  $(r_z - r_n) \frac{1}{5} r_z$  pa z enačbo

$$l_{sr} = 2\pi \frac{r_z - r_n}{l_n \left( \frac{r_z}{r_n} \right)}. \quad (7-87)$$

Pri vsakokratni spremembi toka se spremeni tudi magnetni pretok, ki v navitju  $N_2$  inducira napetostni impulz  $U_i = -N_2 A \frac{dB}{dt}$ , katerega posledica je tokovni impulz

$$i = \frac{U_i}{R_2 + R_g} = -\frac{N_2 A}{R_2 + R_g} \frac{dB}{dt}. \quad (7-88)$$

Ploščina tokovnega impulza je količina elektrine  $Q$ ,

$$Q = \int i dt \text{ oziroma}$$

$$Q = \int_{B_{k-1}}^{B_k} -\frac{N_2 A}{R_2 + R_g} dB = \frac{N_2 A}{R_2 + R_g} \Delta B_k. \quad (7-89)$$

Ker pa z balističnim galvanometrom to količino elektrine izmerimo,  $Q = c_b \alpha$ , je

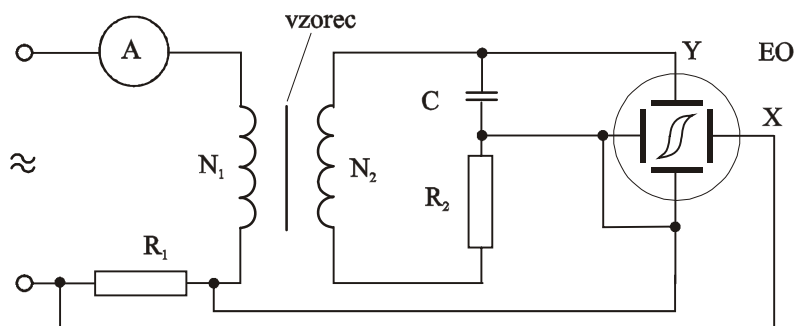
$$c_b \alpha = \frac{N_2 A}{R_2 + R_g} \Delta B_k \text{ in} \quad (7-90)$$

$$\Delta B_k = \frac{c_b \alpha}{N_2 A} (R_2 + R_g). \quad (7-91)$$

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 uporabljena predvsem za hitra kontrolna merjenja in za pogonska merjenja. Merilno vezje je naslednje



**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

$$u_{R1} = i_1 R_1. \quad (7-92)$$

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

$$u_{R1} = \frac{R_1 l}{N_1} H = k_H H. \quad (7-93)$$

Sekundarno navitje (indukcijsko) z  $N_2$  ovoji je zaključeno z zaporedno vezavo kondenzatorja  $C$  in ohmskega upora  $R_2$ )  $\frac{1}{\omega C}$ .

Zato čez njiju teče tok  $i_2 \approx \frac{U_{i2}}{R_2}$ . Inducirana napetost  $U_{i2}$  pa je

$$U_{i2} = -N_2 A \frac{dB}{dt}, \text{ tok } i_2 \text{ pa} \quad (7-94)$$

$$i_2 = -\frac{N_2 A}{R_2} \frac{dB}{dt}. \quad (7-95)$$

Na kondenzatorju  $C$  je napetost, ki jo lahko izrazimo z

$$u_C = -\frac{N_2 A}{R_2 C} B = k_H B. \quad (7-96)$$

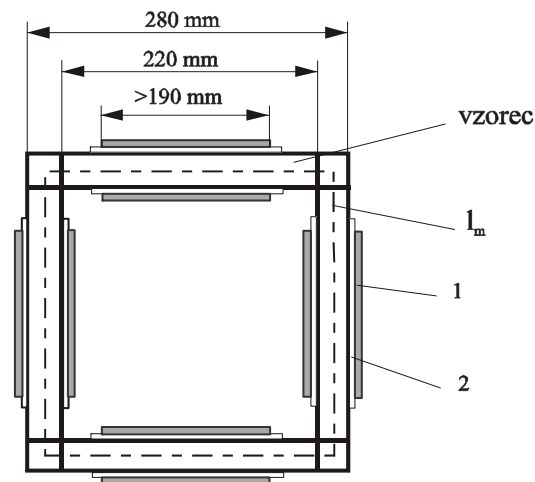
Torej je potek te napetosti proporcionalen magnetni gostoti  $B$  in jo vodimo na sistem osciloscopa za vertikalno odklanjanje elektronskega snopa.

Napajalno napetost običajno nastavljamo z regulacijskim transformatorjem. Če jo ustrezno spreminjamo, dobimo večje

število histereznih zank. S povezovanjem njihovih vrhov dobimo dinamično (komutacijsko) magnetilnico.

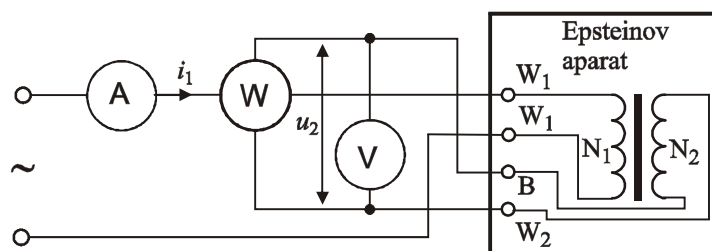
### 7.5.3 Merjenje izgub v feromagnetikih z Epsteinovim aparatom

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 podan 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 induksijske, njihova dolžina ne pokriva celotnega vzorca. Vse štiri magnetilne tuljave so vezane zaporedno, prav tako vse štiri induksijske. Število obojev je enako in sicer  $4 \times 175 = 700$  obojev. 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

$$P_w = \frac{1}{T} \int_0^T u_2 i_1 dt. \quad (7-97)$$

Napetost  $u_2$  pa je

$$u_2 = U_{i_2} - i_2 R_2, \quad (7-98)$$

pri čemer je  $R_2$  upornost sekundarnega (indukcijskega) navitja. Iz tega sledi

$$u_2 = U_{i_2} - \frac{U_{i_2}}{R_p + R_2} R_2 = U_{i_2} \frac{R_p}{R_2 + R_p} \quad (7-99)$$

$$R_p = \frac{R_{nw} R_v}{R_{nw} + R_v}.$$

Ker sta števili ovojev  $N_1$  in  $N_2$  enaki, velja tudi  $U_{i_2} = U_{i_1}$  in lahko zapišemo

$$P_w = \frac{R_p}{R_2 + R_p} \frac{1}{T} \int_0^T U_{i_1} i_1 dt. \quad (7-100)$$

Izraz  $\frac{1}{T} \int_0^T U_{i_1} i_1 dt$  predstavlja celotno moč v vezju, to so izgube v

železu  $P_{Fe}$  in moč  $P_2$  na sekundarni strani. Ta je  $P_2 = \frac{U_2^2}{R_p^2} (R_p + R_2)$

in sledi

$$P_w = \frac{R_p}{R_2 + R_p} (P_{Fe} + P_2) = \frac{R_p}{R_2 + R_p} \left( P_{Fe} + \frac{U_2^2}{R_p^2} (R_p + R_2) \right) \quad \text{in} \quad (7-101)$$

$$P_{Fe} = \frac{R_2 + R_p}{R_p} \left( P_w - \frac{U_2^2}{R_p} \right). \quad (7-102)$$

Ker je praviloma  $R_2 \ll R_p$  se ta izraz lahko poenostavi v obliko

$$P_{Fe} = P_w - \frac{U_2^2}{R_p}. \quad (7-103)$$

Meritve izgub opravimo pri določenih vrednostih magnetnih gostot v vzorcu, običajno pri 1 T in 1,5 T. Magnetno gostoto določamo izhajajoč iz inducirane napetosti v sekundarnem navitju  $U_{i_2} = 4k_0 N_2 f AB$ , izmerjena napetost pa je

$$U_2 = \frac{4k_0 N_2 f A B_m}{1 + \frac{R_2}{R_p}}. \quad (7-104)$$

V enačbi za  $U_2$  mora biti upoštevan čisti presek  $A$  feromagnetnega vzorca, ki ga določimo iz mase  $m$ , ki jo dobimo s tehtanjem:

$$A = \frac{m}{4l\rho}. \quad (7-105)$$

Končni merilni rezultat so specifične izgube  $p_{Fe}$ . Te dobimo z izrazom

$$p_{Fe} = \frac{P_{Fe}}{m^*}. \quad (7-106)$$

$m^*$  je reducirana masa, ki jo dobimo iz dejanske mase vzorca  $m$ , pomnožene z izkustvenim korekcijskim faktorjem  $k = 0,94$ , torej

$$m^* = km. \quad (7-107)$$

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. Zato so ogli 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

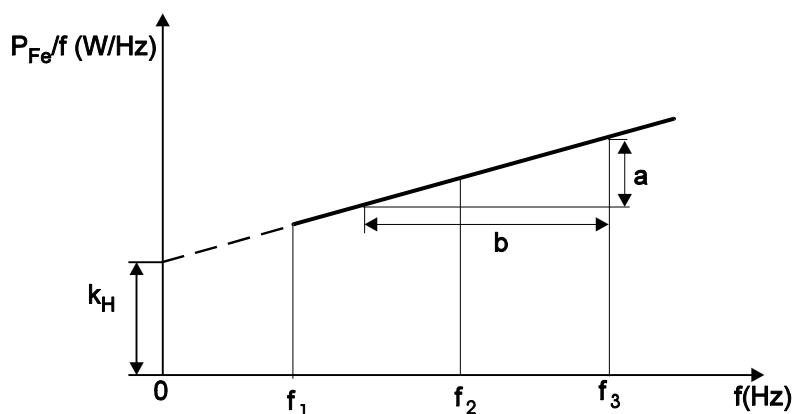
$$P_{Fe} = P_H + P_V = k_H f + k_V f^2. \quad (7-108)$$

Vrednost koeficientov  $k_H$  in  $k_V$  ugotovimo tako, da zgornjo enačbo izrazimo v obliki



$$\frac{P_{Fe}}{f} = k_H + k_V f. \quad (7-109)$$

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

$$k_V = \frac{a}{b}. \quad (7-110)$$

Pri merjenju z Epsteinovim aparatom izračunamo oboje specifične izgube z izrazoma

$$p_H = \frac{P_H}{m^*} \text{ in } p_V = \frac{P_V}{m^*}. \quad (7-111)$$

za neko iskano frekvenco in določeno magnetno gostoto.



## Priloga A: Seznam najpogosteje uporabljenih oznak

$E$	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
$u'$	relativna merilna negotovost
$m, max$	maksimalno
$i$	trenutno
$eff$	efektivno
$min$	minimalno
$ref$	referenčno
$r, rel$	relativno
$i$	izmerjeno
$\approx$	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, ničlovod)
$\underline{Z}$	kompleksna impedanca
$Z$	modul impedance
$\underline{S}$	kompleksna moč
$\lambda$	faktor moči ( $\lambda = \frac{P}{S}$ ) pri sin toku in napetosti
	$\lambda = \cos \varphi$
$\xi$	kotni pogrešek merilnega transformatorja
$p$	prestavno razmerje merilnega transformatorja



## Priloga B: Oznake in enote nekaterih veličin

<i>Veličina</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
Celzijeva 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	$Z$	$\Omega$
upornost	$R$	$\Omega$ (1 $\Omega$ = 1 V/1 A)
reaktanca	$X$	$\Omega$
frekvenca	$f$	Hz (1 Hz = 1 s <sup>-1</sup> )
trajanje periode	$T$	s
kotna hitrost	$\omega$	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	$\varphi$	rad (1 rad = 180°/π)
magnetna gostota	$B$	T (1 T = 1 Vs/m <sup>2</sup> )
magnetna poljska jakost	$H$	A/m
magnetni pretok	$\phi$	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 nekorogiranemu 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 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] SIST ISO 31-5, *Quantities and units – Part 5: Electricity and magnetism*, Second edition 1992-11-01.
- [9] *Merilna negotovost*, A13, Urad za standardizacijo in meroslovje RS, Ljubljana, 1996.
- [10] *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, ISO, First edition, 1995.

