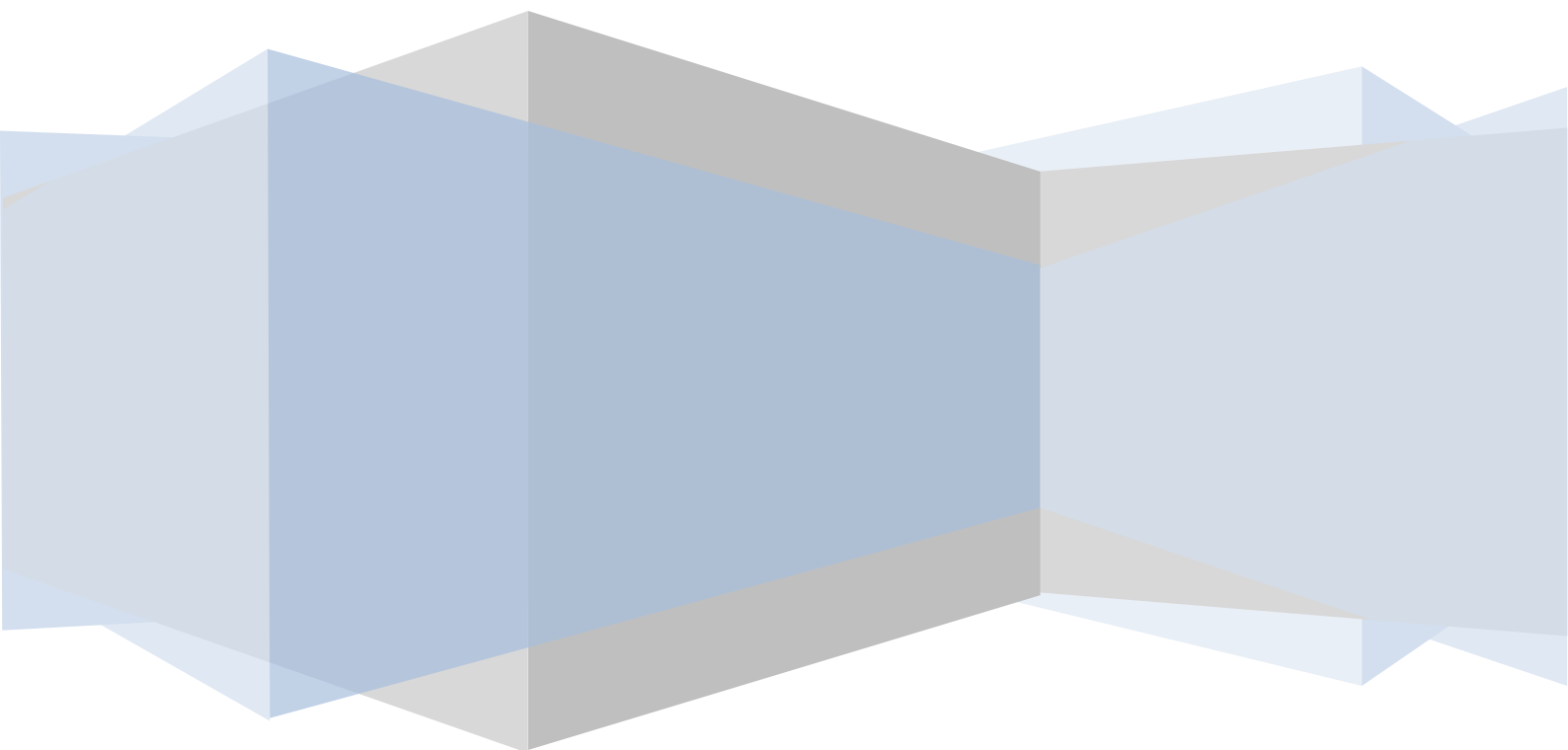


ELEKTROTEHNIKA

Prof: Petar Rajaković mag. ing. el.



Ova skripta namijenjena je prije svega učenicima drugih razreda srednjih elektrotehničkih škola koji u programu zanimanja imaju predmete: *Elektrotehnički materijali i komponente* i *Mjerenja u elektrotehnici*. Skripta sadrži sve teme prema nastavnom planu i programu, a također su dodani novi i prošireni sadržaji koji učenicima omogućuju da prema želji prošire i prodube svoje znanje. Namijenjena je i studentima koji u njoj mogu pronaći potrebno gradivo za polaganje ispita iz elektrotehničkih predmeta.

Cilj izrade ove skripte bio je poboljšati nastavu iz mjerenja u elektrotehnici, te ga povezati sa gradivom osnova elektrotehnike i elektrotehničkih materijala i komponenti. Na kraju svake tematske cjeline nalaze se pitanja i zadatci za provjeru znanja, koji služe za kvalitetnije i lakše usvajanje nastavnih sadržaja.

Zahvaljujem kolegicama i kolegama na savjetima i konstruktivnim kritikama, a unaprijed zahvaljujem svima koji mi ukažu na eventualne pogreške i pomognu savjetom kako još poboljšati skriptu.

Autor

SADRŽAJ

ELEKTROTEHNIČKI MATERIJALI I KOMPONENTE

1. PODJELA I SVOJSTVA MATERIJALA

1.1. PODJELA ELEKTROTEHNIČKIH MATERIJALA	15
1.1.1. MATERIJALI ZA ELEKTRIČNE VODIČE	15
1.1.2. MATERIJALI ZA POLUVODIČE	16
1.1.3. MATERIJALI ZA ELEKTRIČNE IZOLATORE	16
1.1.4. MATERIJALI ZA MAGNETSKE KRUGOVE	16
1.2. SVOJSTVA ELEKTROTEHNIČKIH MATERIJALA	17
1.2.1. OPĆA FIZIKALNA SVOJSTVA MATERIJALA	18
1.2.2. ELEKTRIČNA SVOJSTVA MATERIJALA	19
1.2.3. MEHANIČKA SVOJSTVA MATERIJALA	20
1.2.4. TOPLINSKA SVOJSTVA MATERIJALA	21
1.2.5. MAGNETSKA SVOJSTVA MATERIJALA	21
1.2.6. OPTIČKA SVOJSTVA MATERIJALA	22
1.2.7. KEMIJSKA SVOJSTVA MATERIJALA	22
1.2.8. TEHNOLOŠKA SVOJSTVA MATERIJALA	22
1.3. ISPITIVANJE MATERIJALA	23
1.4. PITANJA ZA PROVJERU ZNANJA	24

2. VODLJIVI I SPECIJALNI MATERIJALI

2.1. PODJELA I SVOJSTVA VODLJIVIH MATERIJALA	25
2.2. BAKAR	26
2.2.1 SVOJSTVA BAKRA	26
2.2.1.1 Tehnološka i mehanička svojstva	26
2.2.1.2 Kemijska svojstva	27
2.2.2 LEGURE (SLITINE) BAKRA	27
2.2.2.1 Bronce	27
2.2.2.2 Mjed ili mesing	28
2.3. ALUMINIJ	29
2.3.1 SVOJSTVA ALUMINIJA	30
2.3.1.1 Tehnološka i mehanička svojstva	30
2.3.1.2 Kemijska svojstva	30
2.4. ŽELJEZO	31
2.4.1 SVOJSTVA ŽELJEZA	32
2.4.1.1 Tehnološka i mehanička svojstva	32
2.4.1.2 Kemijska svojstva	32
2.4.1.3 Čelik	32

2.5. OLOVO	33
2.5.1 SVOJSTVA OLOVA.....	33
2.5.1.1 Tehnološka i mehanička svojstva.....	33
2.5.1.2 Kemijska svojstva	33
2.5.1.3 Legure olova.....	34
2.6. CINK	35
2.6.1 SVOJSTVA CINKA	35
2.6.1.1 Tehnološka i mehanička svojstva.....	35
2.6.1.2 Kemijska svojstva	35
2.7. ŽIVA	36
2.7.1 SVOJSTVA ŽIVE	37
2.7.1.1 Tehnološka i mehanička svojstva.....	37
2.7.1.2 Kemijska svojstva	37
2.8. ZLATO.....	38
2.8.1 SVOJSTVA ZLATA	38
2.8.1.1 Tehnološka i mehanička svojstva.....	38
2.8.1.2 Kemijska svojstva	39
2.9. SREBRO	39
2.9.1 SVOJSTVA SREBRA.....	40
2.9.1.1 Tehnološka i mehanička svojstva.....	40
2.9.1.2 Kemijska svojstva	40
2.10. PLATINA	41
2.10.1 SVOJSTVA PLATINE.....	41
2.10.1.1 Tehnološka i mehanička svojstva.....	41
2.10.1.1 Kemijska svojstva	41
2.11. KOSITAR	42
2.11.1 SVOJSTVA KOSITRA	42
2.11.1.1 Tehnološka i mehanička svojstva.....	42
2.11.1.2 Kemijska svojstva	43
2.11.1.3 Legure kositra.....	43
2.12. NIKAL	43
2.12.1 SVOJSTVA NIKLA.....	44
2.12.1.1 Tehnološka i mehanička svojstva.....	44
2.12.1.2 Kemijska svojstva	44
2.12.1.3 Legure nikla	45

2.13. VOLFRAM	46
2.13.1 SVOJSTVA VOLFRAMA	46
2.13.1.1 Tehnološka i mehanička svojstva	47
2.13.1.2 Kemijska svojstva	47
2.13.1.3 Legure volframa	47
2.14. SUPRAVODLJIVI MATERIJALI	48
2.14.1 ENERGETSKI PROCIJEP	48
2.14.2 MEISSNEROV EFEKT	49
2.14.3 BCS TEORIJA	50
2.14.4 VISOKOTEMPERATUNI SUPRAVODIČI	50
2.14.5 KUPRATI	51
2.14.6 PRIMJENA SUPRAVODIČA	51
2.15. PITANJA ZA PROVJERU ZNANJA	51
3. VODOVI	
3.1. VODOVI PREMA KONSTRUKCIJI	53
3.1.1 NADZEMNI VODOVI	53
3.1.2 IZOLIRANI VODOVI	53
3.1.2.1 H05V - K	54
3.1.2.2 P/F	54
3.1.2.3 PP/J	55
3.1.2.4 PP/R	55
3.1.2.5 PP, PP-Y	55
3.1.2.6 PUR / PUR	56
3.1.3 KABELI	56
3.1.3.1 Koaksijalni kabel	57
3.1.3.2 Optički kabel	57
3.2. VODOVI PREMA NAMJENI	58
3.2.1 VODOVI ZA PRIJENOS SNAGE	58
3.2.1 VODOVI ZA PRIJENOS INFORMACIJA	58
3.3. VODOVI PREMA ELEKTROTEHNIČKIM KARAKTERISTIKAMA	58
3.3.1 HOMOGENI VODOVI	58
3.3.2 NEHOMOGENI VODOVI	59
3.4. TISKANI VODOVI	59
3.4.1 ČIŠĆENJE BAKRENE POVRŠINE	59
3.4.2 NANOŠENJE ZAŠTITNOG SLOJA	59
3.4.2.1 Vodootporni flomaster	59

3.4.2.2	Ljepiva traka	60
3.4.2.3	Letraset postupak	60
3.4.2.4	Transfer postupak	61
3.4.2.5	Sitotisak	61
3.4.2.6	Fotopostupak	62
3.4.3	JETKANJE PLOČICE	62
3.5.	VODIČI	62
3.6.	PITANJA ZA PROVJERU ZNANJA	63
4. PRIMJENA VODLJIVIH MATERIJALA		
4.1.	VRSTE OTPORNIKA	64
4.1.1	OTPORNICI STALNE OTPORNOSTI	64
4.1.2	OTPORNICI PROMJENJIVE OTPORNOSTI	66
4.1.3	OTPORNICI S POSEBNIM SVOJSTVIMA	68
4.1.3.1	Otpornici ovisni o temperaturi	68
4.1.3.2	Otpornici ovisni o naponu	69
4.1.3.3	Otpornici ovisni o magnetskom polju	70
4.1.3.4	Otpornici ovisni o svjetlu	70
4.2.	MATERIJALI ZA OTPORNIKE	71
4.2.1	MATERIJALI ZA REGULACIJSKE I TEHNIČKE OTPORNIKE	71
4.2.2	MATERIJALI ZA PRECIZNE OTPORNIKE	71
4.2.3	MATERIJALI ZA GRIJAĆE OTPORNIKE	71
4.2.4	MATERIJALI ZA SLOJNE I ŽIČANE OTPORNIKE	72
4.3.	MATERIJALI I VRSTE KONDENZATORA	72
4.3.1	KONDENZATORI STALNOG KAPACITETA	72
4.3.2	KONDENZATORI PROMJENJIVOG KAPACITETA	75
4.4.	MATERIJALI I VRSTE ZAVOJNICA	76
4.4.1	ZAVOJNICE BEZ JEZGRE	76
4.4.2	ZAVOJNICE S JEZGROM	77
4.4.3	PROMJENJIVE ZAVOJNICE	78
4.5.	MATERIJALI ZA ELEKTRIČNE KONTAKTE	79
4.6.	MATERIJALI ZA ČETKICE STROJA	80
4.7.	MATERIJALI ZA TERMOBIMETALE	81
4.8.	MATERIJALI ZA TERMOELEMENTE	81
4.9.	MATERIJALI ZA RASTALNE OSIGURAČE	82
4.10.	PITANJA ZA PROVJERU ZNANJA	83

5. POLUVODIČKI MATERIJALI I ELEMENTI

5.1. SILICIJ	84
5.1.1 SVOJSTVA SILICIJA	84
5.1.1.1 Tehnološka i mehanička svojstva	84
5.1.1.2 Kemijska svojstva	85
5.2. GERMANIJ	85
5.2.1 SVOJSTVA GERMANIJA	86
5.2.1.1 Tehnološka i mehanička svojstva	86
5.2.1.2 Kemijska svojstva	87
5.3. BOR	87
5.3.1 SVOJSTVA BORA	87
5.3.1.1 Tehnološka i mehanička svojstva	87
5.3.1.2 Kemijska svojstva	88
5.4. SELENIJ	88
5.4.1 SVOJSTVA SELENIJA	89
5.4.1.1 Tehnološka i mehanička svojstva	89
5.4.1.2 Kemijska svojstva	89
5.5. TELURIJ	90
5.5.1 SVOJSTVA TELURIJA	90
5.5.1.1 Tehnološka i mehanička svojstva	90
5.5.1.2 Keramika svojstva	90
5.6. GALIJ	91
5.6.1 SVOJSTVA GALIJA	91
5.6.1.1 Tehnološka i mehanička svojstva	92
5.6.1.2 Kemijska svojstva	92
5.7. OSNOVNA SVOJSTVA POLUVODIČKIH MATERIJALA	92
5.8. POLUVODIČKI ELEMENTI	95
5.8.1 POLUVODIČKE DIODE	96
5.8.2 TRANZISTORI	98
5.8.3 TIRISTORI	102
5.8.4 OPTOELEKTRONIČKI ELEMETI	104
5.8.5 INTEGRIRANI SKLOPOVI	105
5.9. ISPITIVANJE POLUVODIČKIH ELEMENATA	107
5.9.1 ISPITIVANJE POLUVODIČKE DIODE	107
5.9.2 ISPITIVANJE TRANZISTORA	107

5.10. PITANJA ZA PROVJERU ZNANJA.....	108
6. IZOLACIJSKI MATERIJALI	
6.1. ZAHTJEVI ZA IZOLACIJSKE MATERIJALE.....	110
6.2. SISTEMATIZACIJA IZOLACIJSKIH MATERIJALA	112
6.3. ORGANSKI IZOLACIJSKI MATERIJALI	113
6.3.1 MINERALNA ULJA.....	113
6.3.2 MODIFICIRANA ULJA	114
6.3.3 BILJNA ULJA.....	114
6.3.4 VOSKOVI I BITUMEN	114
6.3.5 PRIRODNE SMOLE	114
6.3.6 MODIFICIRANE SMOLE.....	114
6.3.7 KAUČUK I GUMA	114
6.3.8 PRIRODNA ORGANSKA VLAKNA.....	115
6.3.9 UMJETNE MASE (SMOLE).....	115
6.3.10 TERMOPLASTIČNE MASE.....	116
6.3.11 TERMOSTABILNE MASE.....	118
6.3.12 SILIKONI.....	119
6.3.13 VLAKNASTI MATERIJALI.....	120
6.3.14 DRVO	120
6.3.15 PREŠPANI.....	121
6.3.16 TEKSTILNI PROIZVODI.....	121
6.4. ANORGANSKI IZOLACIJSKI MATERIJALI.....	121
6.4.1 TINJAC	121
6.4.2 AZBEST	122
6.4.3 KVARC.....	122
6.4.4 STAKLO	122
6.4.5 KERAMIKA	123
6.4.6 PORCULAN	123
6.4.7 STEATIT.....	124
6.4.8 SUPSTRATI.....	124
6.4.9 RUTILI	124
6.4.10 VATROSTALNA KERAMIKA	124
6.5. SLOŽENI IZOLACIJSKI MATERIJALI	125
6.6. PITANJA ZA PROVJERU ZNANJA.....	125

7. MAGNETSKI MATERIJALI

7.1. OSNOVNA SVOJSTVA MAGNETSKIH MATERIJALA	127
7.2. VRSTE MAGNETSKIH MATERIJALA.....	128
7.3. PITANJA ZA PROVJERU ZNANJA.....	131

8. MATERIJALI ZA SPAJANJE

8.1. SPAJANJE VIJCIMA I ZAKOVICAMA	132
8.2. UPLITANJE, STISKANJE I OMATANJE VODOVA.....	132
8.3. SPAJANJE VARENJEM	132
8.4. LEMLJENJE I LEMOVI	133
8.5. LIJEPLJENJE I LJEPILA	134
8.6. PITANJA ZA PROVJERU ZNANJA.....	136

9. OSTALI MATERIJALI

9.1. "PAMETNI" MATERIJALI	138
9.2. AEROGELOVI	139
9.3. DIJAMANTI.....	139
9.4. FULERENI I NANOCJEVČICE	140
9.5. TITANIJEVE LEGURE.....	140
9.6. POSTUPCI MODIFICIRANJA I PREVLAČENJA POVRŠINA	141
9.7. MOGUĆNOSTI RAZVOJA MATERIJALA U HRVATSKOJ	141

MJERENJA U ELEKTROTEHNICI**1. UVOD U MJERNU TEHNIKU**

1.1. DEFINICIJE I POJMOVI	145
1.2. POGRJEŠKE MJERENJA	147
1.3. ANALIZA I PRIKAZIVANJE MJERNIH REZULTATA	150
1.4. MJERNI SUSTAVI I OPREMA	152
1.5. LABORATORIJSKI ELEMENTI	153
1.6. PITANJA ZA PROVJERU ZNANJA.....	165
1.7. ZADATCI	166

2. MJERNI INSTRUMENTI

2.1. PROPISI I STANDARDI MJERNIH INSTRUMENATA.....	173
2.1.1. KARAKTERISTIKE ANALOGNIH INSTRUMENATA	174
2.1.2. KARAKTERISTIKE DIGITALNIH INSTRUMENATA	179

2.1.3 KARAKTERISTIKE KVAZIANLOGNIH INSTRUMENATA	180
2.1.4 PROŠIRENJE MJERNOG OPSEGA INSTRUMENTA	180
2.1.4.1 Proširenje strujnog mjernog opsega	181
2.1.4.2 Proširenje naponskog mjernog opsega	181
2.1.4 SVOJSTVA SIGNALA	182
2.2 ANALOGNI MJERNI INSTRUM. S JEDNODIMENZIONALNIM PRIKAZOM	183
2.2.1 PODJELE ANALOGNIH MJERNIH INSTRUMENATA	183
2.2.2 INSTRUMENTI S POMIČNIM SVITKOM I PERMANENTNIM (TRAJNIM) MAGNETOM	183
2.2.2 INSTRUMENTI S POMIČNIM MAGNETOM	185
2.2.3 ELEKTROSTATIČKI INSTRUMENTI	185
2.2.4 INSTRUMENTI S POMIČNIM SVITKOM I ISPRAVLJAČEM	186
2.2.5 INSTRUMENTI S POMIČNIM ŽELJEZOM	187
2.2.5.1 Instrumenti s pomičnim željezom i okruglim svitkom	187
2.2.5.2 Instrument s pomičnim željezom i plosnatim svitkom	188
2.2.6 ELEKTRODINAMIČKI INSTRUMENTI	188
2.2.6.1 Elektrodinamički instrumenti bez željeza	189
2.2.6.2 Elektrodinamički instrumenti zaštićeni ili zatvoreni željezom	190
2.2.6.3 Astatički elektrodinamički instrumenti	190
2.2.7 INSTRUMENTI S UNAKRSNIM SVITCIMA.....	190
2.2.8 INDUKCIJSKI INSTRUMENTI.....	191
2.2.8.1 Indukcijska brojila	192
2.2.9 TERMIČKI INSTRUMENTI	193
2.2.9.1 Instrumenti s vrućom žicom	193
2.2.9.2 Instrumenti s termopretvornikom	194
2.2.9.3 Bimetalni instrumenti	194
2.2.10 VIBRACIJSKI INSTRUMENTI	195
2.2.10.1 Frekvenciometri s mehaničkom rezonancijom	196
2.2.10.2 Frekvenciometri s električnom rezonancijom	196
2.3 ANALOGNI MJERNI INSTRUM. S DVODIMENZIONALNIM PRIKAZOM	197
2.3.1 KATODNI OSCILOSKOP	197
2.3.1.1 Katodna cijev	198
2.3.1.2 Sustav za vertikalni otklon	201
2.3.1.3 Sustav za horizontalni otklon	203
2.3.1.4 Mjerenja katodnim osciloskopom	206
2.3.1.5 Mjerena sonda osciloskopa	209
2.3.2 GRAFIČKI PISAČI	211
2.3.2.1 Oscilografski instrumenti s pomičnim papirom	211

2.3.2.2 X-Y pisači	212
2.3.3 VOBLERI.....	212
2.3.4 ANALIZATORI SPEKTRA	213
2.4 DIGITALNI MJERNI INSTRUM. S JEDNODIMENZIONALNIM PRIKAZOM	215
2.4.1 DIGITALNI VOLTMETRI	215
2.4.1.1 Digitalni izmjenični voltmetri	216
2.4.1.2 Digitalni istosmjerni voltmetri	216
2.4.2 DIGITALNI MULTIMETRI	217
2.4.3 DIGITALNI VATMETRI	218
2.5 DIGITALNI MJERNI INSTRUMENTI S DVODIMENZIONALNIM PRIKAZOM ..	219
2.5.1 DIGITALNI OSCILOSKOP	219
2.5.1.1 Digitalni osciloskopi s memorijom	220
2.5.1.2 Digitalni osciloskopi s uzimanjem uzoraka.....	225
2.5.1.3 Digitalni fosforni osciloskopi	226
2.6 PITANJA ZA PROVJERU ZNANJA.....	227
2.7 ZADATCI	228
3. MJERNE METODE	
3.1. METODE ZA MJERENJE NAPONA I STRUJA	237
3.1.1 MJERENJE ISTOSMJERNE STRUJE	237
3.1.2 MJERENJE ISTOSMJERNOG NAPONA	238
3.1.3 MJERENJE IZMJENIČNE STRUJE	240
3.1.4 MJERENJE IZMJENIČNOG NAPONA	241
3.2 METODE ZA MJERENJE SNAGE	243
3.2.1 MJERENJE SNAGE U JEDNOFAZNOM SUSTAVU	243
3.2.2 MJERENJE SNAGE U TROFAZNOM SUSTAVU	246
3.2.3 POLUIZRAVNO I NEIZRAVNO MJERENJE SNAGE	248
3.3 METODE ZA MJERENJE OTPORA	249
3.3.1 MJERENJE OTPORA U – I METODOM.....	249
3.3.2 MJERENJE OTPORA METODOM USPOREDBE	250
3.3.3 MJERENJE OTPORA OMOMETARSKOM METODOM	250
3.3.4 MJERENJE OTPORA METODOM STALNE STRUJE	251
3.3.5 MJERENJE OTPORA MOSNOM METODOM.....	251
3.3.6 METODE ZA MJERENJE VELIKIH OTPORA.....	252
3.3.6.1 Metoda gubitka naboja	252
3.3.6.2 Mjerenje otpora uzemljenja	252
3.3.7 METODE ZA MJERENJE VRLO MALIH OTPORA.....	254

3.4 METODE ZA MJERENJE INDUKTIVITETA	255
3.4.1 MOSNE METODE MJERENJA INDUKTIVITETA	257
3.5 METODE ZA MJERENJE KAPACITETA	259
3.5.1 MOSNE METODE MJERENJA KAPACITETA	260
3.6 MAGNETSKA MJERENJA	261
3.7 MJERNI PRETVORNICI NEELEKTRIČNIH VELIČINA	263
3.8 PITANJA ZA PROVJERU ZNANJA.....	265
3.9 ZADATCI	266

ELEKTROTEHNIČKI MATERIJALI I KOMPONENTE

1. PODJELA I SVOJSTVA MATERIJALA

1.1. PODJELA ELEKTROTEHNIČKIH MATERIJALA

Elektrotehnički materijali su svi oni materijali koji ulaze u električne proizvode, a u užem smislu to su oni materijali, koji svojim svojstvima omogućuju optimalno djelovanje električnih i elektromagnetskih pojava. **Elektrotehnički proizvodi** su oni proizvodi koji svoj rad zasnivaju na iskorištenju električnih i elektromagnetskih pojava (pretvaranje mehaničke u električnu energiju i obrnuto, električne u toplinsku, prijenos signala i sl.) Za neki proizvod potrebni su određeni materijali odnosno sirovina. Pri tome je pojam proizvoda odnosno sirovine relativan, a ovisi o fazama odnosno vrsti proizvodnje. Na primjer proizvodni niz za bakar: bakrena ruda - bakar - žica - izolirana žica - namot - električni stroj.

Zbog specifičnih svojstva materijala kao i zbog stanja na tržištu, ili različitih tehnologija obrade i sredstva rada potrebno je birati optimalno rješenje. Izbor materijala bit će to bolji kada se za poznate zahtjeve daje veći broj podataka važnih za krajnji proizvod. Materijal je moguće podijeliti na različite načine, a općenito sve su tvari kemijski elementi, kemijski spojevi i legure, umjetni spojevi i složeni materijali.

MATERIJALI U ELEKTROTEHNICI		
Električni materijali	Konstruktivski materijali	Pomoćni materijali
Služe za ostvarivanje temeljne zadaće električnih proizvoda kao vodič, izolator, magnetski material i dr.	Služe za uobličavanje proizvoda u funkcionalnu cjelinu. Također služe za mehaničko povezivanje te pomažu u izgledu proizvoda.	Namjera im je osigurati bolji i dugotrajniji rada električnog proizvoda. Služe u izradi i funkcioniranju elektrotehničkih proizvoda.

1.1.1 MATERIJALI ZA ELEKTRIČNE VODIČE

Pri izradi vodiča moraju se birati materijali koji dobro vode električnu struju i toplinu. Takvim materijalima električna vodljivost mora biti veća od $10 \cdot 10^6 \text{ S/m}$. Obično se koriste metali (bakar – Cu, aluminij – Al, Željezo – Fe, njihove slitine, meki čelik i td.) – **vodiči 1. vrste**. U ovoj skupini također pripadaju i specijalni vodljivi materijali za električne kontakte, termoelemente, rastalne osigurače i td. U ovu skupinu ubrajaju se i otporni materijali s visokom električnom otpornošću od $0.2 - 1.6 \cdot 10^6 \Omega \text{m}$ (elektroliti). Elektroliti su također vodljivi materijali, a to su tekućine u kojima su otopljeni različiti kemijski spojevi, kiseline, lužine, soli – **vodiči 2. vrste**.



Slika 1.1.1. – Primjeri vodiča 1. i 2. vrste

1.1.2 MATERIJALI ZA POLUVODIČE

Poluvodički materijali služe za izradu aktivnih poluvodičkih komponenata npr. diode, tranzistori, MOS – strukture i td. Imaju veliku električnu otpornost od nekoliko desetaka do nekoliko stotina tisuća $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$, dok im je temperaturni otpor negativan. Glavni poluvodički materijali su: silicij – Si, germanij – Ge, Selen – Se, silicijev karbid, srebrni sulfid, talijev sulfid, oksidi bakra, cinka, urana, titana i td.



Slika 1.1.2 – 1 Primjeri poluvodičkih elemenata

1.1.3 MATERIJALI ZA ELEKTRIČNE IZOLATORE

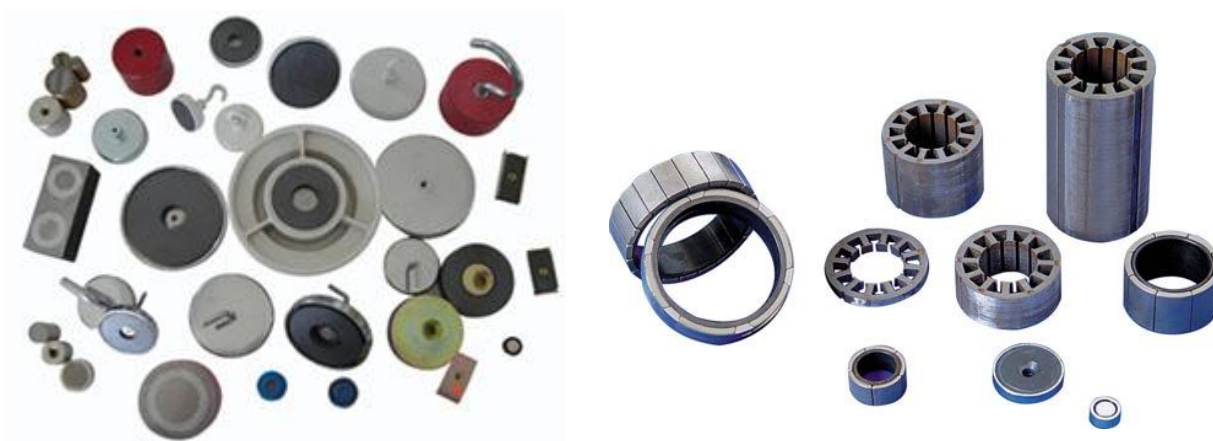
Za izradu električne izolacije koriste se izolatori ili dielektrici koji imaju zadatak razdvajati vodiče. Takvi materijali imaju visoku električnu otpornost od 10^6 do $10^{18} \Omega\text{m}$. Primjeri izolatora ili dielektrika mogu biti: PVC, polietilen, kvarcno staklo, porculan, destilirana voda, drvo, papir, vakuum (idealni izolator) i td.



Slika 1.1.3 – 1 Primjeri električnih izolatora

1.1.4 MATERIJALI ZA MAGNETSKE KRUGOVE

Za izradu magnetskih krugova biraju se materijali koji mogu dobro voditi magnetski tok. Uglavnom se koriste feromagnetski materijali. Oni po svojoj podjeli mogu biti meki i tvrdi magnetski materijali. Glavni feromagnetski materijali su: željezo – Fe, kobalt – Co, nikal – Ni, gadolinij – Gd, disprozij – Dy, terbij – Tb, holmij – Ho, erbij – Er i njihove slitine i oksidi.



Slika 1.1.4 – 1 Primjeri magnetskih komponenti

1.2. SVOJSTVA ELEKTROTEHNIČKIH MATERIJALA

Pri konstrukciji elektrotehničkih materijala, potrebno je voditi računa o njihovim brojnim svojstvima. Sva svojstva moraju odgovarati zahtjevima korisnika, načinu uporabe, posebnim uvjetima rada, mogućnosti nabave, cijeni itd. **Zahtjevi korisnika** mogu se odnositi na sigurnost, trajnost, način rukovanja, održavanje, standarde i norme. Kako bi se znalo koja su svojstva materijala, potrebno ih je ustanoviti, a to se čini ispitivanjem. **Ispitivanje materijala** obavlja se u raznim ustanovama, laboratorijima, ali i kod proizvođača. **Kontrola** dovodi do smanjenja škarta, otpada materijala, dorade proizvoda, zastoja u proizvodnji te reklamacija korisnika.



Općenito **svojstva materije** ovise o njezinoj građi. Karakteristike svakog elementa definirane su građom atoma. Prema najnovijim otkrićima u prirodi ima ukupno 117 različitih elemenata. Prvi sustavni prikaz kemijskih elemenata dao je Dimitrij Ivanovič Mendeljejev (ruski kemičar) 1871. godine i do danas u njemu nije pronađena pogriješka. U svom sustavu on je uspio povezati kemijske i fizikalne značajke elemenata.

Prvu elementarnu česticu – **elektron** otkrio je Joseph John Thomson 1897. godine proučavajući ponašanje katodnih zraka u magnetskom i električnom polju.



Naboj i masa elektrona iznosi:

$$e = -1.6021892 \cdot 10^{-19} \text{ C} ; m_e = 9.109534 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

1909. godine Ernest Rutherford je dokazao da je pozitivni naboj atoma koncentriran u jezgri atoma. Rutherford je također pokazao da je **jezgra atoma** vrlo malena u odnosu na atom, pa ipak najvećim dijelom određuje masu atoma. Pojedini atomi elemenata uz jednak broj protona u jezgri mogu imati različit broj neutrona. Takve atome nazivamo **izotopima** nekog elementa. Izotope je otkrio Francis William Aston

1919. godine. Atomi su u cijelosti električki neutralni jer imaju jednak broj elektrona u elektronskim ljuskama i protona u jezgri. Ravnotežu je moguće narušiti dovodenjem ili odvođenjem jednog ili više elektrona. Električka i kemijska ponašanje nekog atoma uglavnom ovise o popunjenosti vanjske (valentne) ljuske (odnosno vanjskih pod ljuski) s elektronima.



Ioni su atomi ili grupe atoma koji imaju višak ili manjak elektrona. Pozitivni ion ili **kation** nastaje tako da neutralni atom (molekula, grupa atoma) izgubi elektron(e). Negativni ion ili **anion** nastaje kada neutralni atom (molekula, grupa atoma) primi jedan ili više elektrona. Kationi i anioni međusobno se privlače električnom silom (Coulombovom silom) koja je dana izrazom:

$$F = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{4\pi\epsilon r^2} \text{ (N)}$$

gdje je:

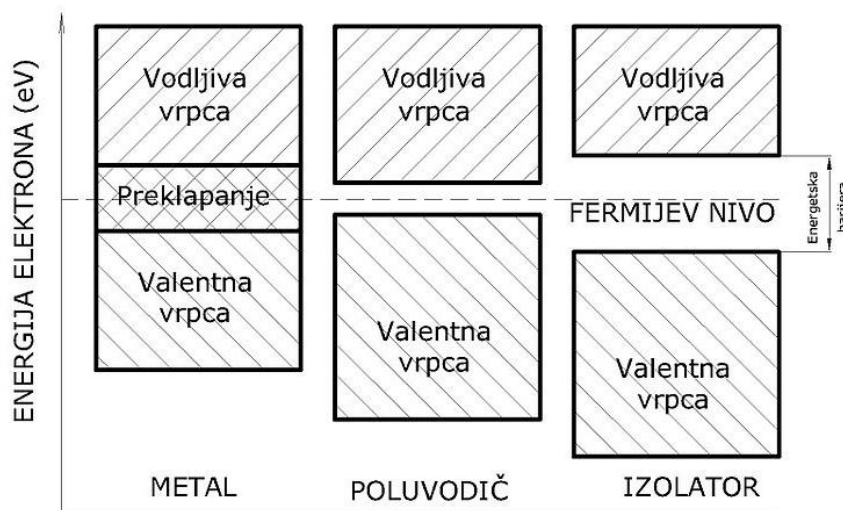
Q_1 – umnožak broja elektrona prvog atoma s elementarnim nabojem, Q_2 – umnožak broja elektrona drugog atoma s elementarnim nabojem, $\epsilon = \epsilon_0$ – dielektrična konstanta vakuuma ($\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ F/m), r – udaljenost između naboja

Materijali se sastoje od međusobno povezanih atoma, istih ili različitih elemenata. Međusobno povezivanje se ostvaruje posebnim vezama: ionske veze, kovalentne (atomske) veze i metalne veze. **Ionske veze** su veze aniona i kationa, zasnovane na privlačenju elektrostatskim silama. Materijali s ionskim vezama imaju slabu električnu vodljivost, a dobra mehanička svojstva. **Kovalentne (atomske) veze** nastaju kod neutralnih atoma (uglavnom nemetala), a zasnivaju se na zajedničkim putanjama parova valentnih elektrona. Ovim vezama stvaraju se pravilni trodimenzionalni kristalni oblici. Materijali s kovalentnim vezama su uglavnom izolatori dok rjeđe poluvodiči. **Metalne veze** čine materijali (metali-kovine) koji lako gube elektrone iz valentne ljuske. Ovisno o broju slobodnih elektrona, tvore različite prostorne oblike-rešetke. Materijali s metalnim vezama dobro vode električnu struju. Električna svojstva materijala nastaju zbog tipa veza, a s obzirom na broj atoma, jednostavno se tumače teorijom pojaseva koji se još nazivaju **energetskim pojasevima**. Pojasevi dopuštenih energija nazivaju se **valentni** i **vodljivi pojasevi**, dok pojas bez dopuštene energije naziva se **zabranjeni pojas**. Na količinu slobodnih elektrona utječu energetske razine, vrste materijala, ali i temperatura. Jedno je dopuštena energija, a drugo je hoće li biti elektrona koji zauzimaju tu energiju. Da bi se vodila električna struja, elektroni moraju biti u vodljivom pojasu. To su slobodni elektroni, a njima se zbog vibracije atoma u prosjeku predaje energije:

$$E_T = \frac{kT}{e} \text{ (V)}$$

gdje je:

k – Boltzmannova konstanta ($k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$), T – apsolutna temperatura, e – naboj elektrona



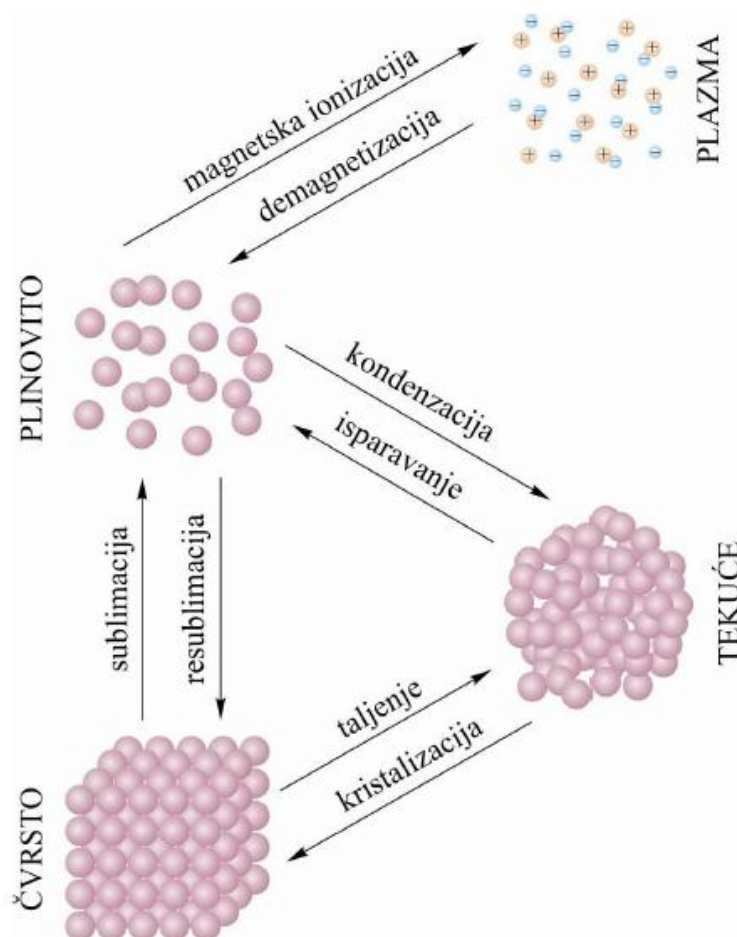
Slika 1.2 – 1 Primjeri strukture elektronske vrpce

1.2.1 OPĆA FIZIKALNA SVOJSTVA MATERIJALA

Agregatna stanja materije također igra ulogu u odabiru materijala. Materija se u prirodi javlja u tri osnovna agregatna stanja: krutom, tekućem i plinovitom. **Krutine** imaju stalan oblik i volumen. Slabi su vodiči zbog jakih atomskih veza. Ako imaju vodljiva svojstva, struju vode slobodni elektroni. **Tekućine** imaju stalan volumen, a nestabilan oblik. Kod vodljivih tekućina struju vode kationi i anioni gibajući se slobodno u tekućini ili otopini. **Plinovi** nemaju stalan niti oblik niti volumen. U pravilu ne vode struju. Ako dođe do ionizacije plina, tada im je vodljivost slična vodljivosti tekućina.

Između agregatnih stanja prelazi se dovođenjem ili odvođenjem topline:

- kondenzacija – prelazak iz plinovitog u tekuće agregatno stanje
- kristalizacija – prelazak iz tekućeg ili plinovitog u kruto agregatno stanje
- taljenje – prelazak iz krutog u tekuće agregatno stanje
- isparavanje – prelazak iz tekućeg u plinovito agregatno stanje
- sublimacija – prelazak iz krutog u plinovito agregatno stanje
- resublimacija – prelazak iz plinovitog u kruto agregatno stanje



Slika 1.2.1 – 1 Prijelazi između agregatnih stanja

Kada se na visokim temperaturama ionizira plin pri utjecaju jakog magnetskog polja, dolazi do preoblikovanja plina kroz četvrto agregatno stanje – **PLAZMA**. Kod plazme su elektroni potpuno odvojeni od matičnih atoma zbog velike energije koju imaju. Primjeri plazme mogu se naći u prirodi kao npr. u zvijezdama.

GUSTOĆA (γ) je odnos mase i volumena materijala, koji se izražava u g/cm^3 , kg/dm^3 , t/m^3 . Materijali prema gustoći mogu se podijeliti na lake i teške. U elektrotehnici gustoća ima značajnu ulogu zbog težine elektrotehničkih materijala.

TALIŠTE je temperatura pri kojoj kruto tijelo prelazi u tekuće stanje, a točka taljenja predstavlja granicu između krutog i tekućeg stanja materijala.

VRELIŠTE je temperatura pri kojoj tekuća tvar prelazi u plinovito stanje, a predstavlja granicu između tekućeg i plinovitog stanja.

KAPLIŠTE je temperatura pri kojoj plinovita tvar prelazi u tekuće stanje, a predstavlja granicu između plinovitog i tekućeg stanja.

HIGROSKOPNOST je sposobnost materije da apsorbira vlagu iz zraka.

1.2.2 ELEKTRIČNA SVOJSTVA MATERIJALA

Električna svojstva materijala govore o samom karakteru materijala, a mogu se podijeliti u nekoliko segmenata:

- **specifična električna vodljivost materijala (κ)** - je vodljivost materijala duljine 1 m, presjeka 1 mm^2 na 20°C , jedinice Sm/mm^2 . Sa stajališta specijalne električne vodljivosti materijali se dijele na: vodiče (valentna i vodljiva pojasevi se preklapaju), poluvodiče (postoji zabranjeni pojas), izolatore (velik zabranjeni pojas). Dobiva se prema izrazu:

$$\kappa = \frac{1}{R} \frac{1}{S} = G \cdot \frac{1}{S}$$

- **električna otpornost materijala (ρ)** – je svojstvo materijala koje se očituje pri prolasku električne struje. Mjerna jedinica za električnu otpornost materijala je $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$. Električna otpornost ovisi o čistoći materijala, gdje čisti metali pružaju najmanji otpor. Električna otpornost materijala dobiva se prema izrazu:

$$\rho = R \cdot \frac{S}{l}$$

gdje je R – otpor vodiča, S – presjek vodiča i l – duljina vodiča.

Materijali se mogu podijeliti po njihovoj električnoj otpornosti:

- vodiči (metali) $< 10 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$
- poluvodiči od 10 do $10^{12} \Omega\text{mm}^2/\text{m}$
- izolatori $> 10^{12} \Omega\text{mm}^2/\text{m}$
- **temperaturni koeficijent električne otpornosti (α)** – je mjera promjene električne otpornosti tvari u ovisnosti o temperaturi. Njegova jedinica je K^{-1} , a dobiva se izrazom:

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha_0 (T - T_0)]$$

gdje je ρ_0 i ρ otpornosti pri temperaturama T_0 i T (K).

Temperaturni koeficijent otpornosti ovisi i o čistoći materijala, a čisti metali imaju relativno visok koeficijent.

1.2.3 MEHANIČKA SVOJSTVA MATERIJALA

Mehanička svojstva materijala opisuju vezu između deformacije materijala i opterećenja na materijal. Najznačajnija mehanička svojstva materijala su:

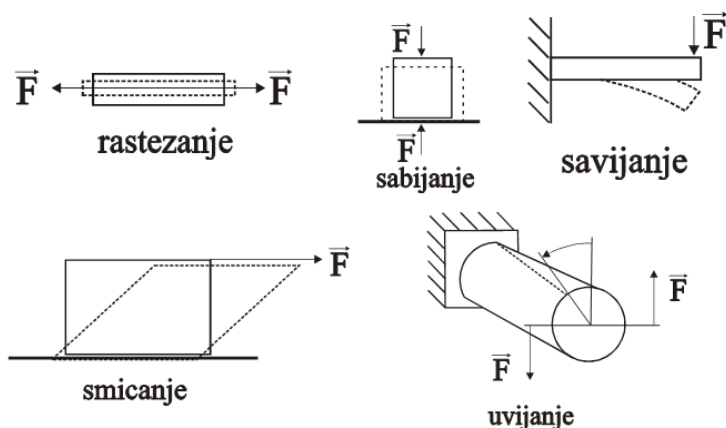
- **čvrstoća** – je svojstvo materijala da se opire vanjskoj sili koja mu nastoji promijeniti oblik, npr. da ga rasteže, sabija, izvija, uvija, prereže i td. Naprezanje materijala može se izraziti kao:

$$\sigma = \frac{F}{A} \text{ (N/m}^2\text{)}$$

gdje je F – vanjska sila, A – površina materijala na kojoj djeluje ta sila.

S obzirom na čvrstoću materijala postoji nekoliko karakterističnih područja ponašanja samog materijala uslijed djelovanja sile:

- **elastičnost** – je svojstvo materijala da se nakon djelovanja sile (npr. rastezanje) vrati u prvobitni oblik.
- **plastičnost** – je svojstvo materijala da se trajno oblikuje djelovanjem sile.
- **rastezljivost** – je sposobnost materijala da se deformira.
- **krhkost** – je svojstvo materijala da se pod utjecajem naprezanja slomi bez promjene oblika.
- **žilavost** – je sposobnost materijala da se uslijed djelovanja sile prvo deformira, a tek onda slomi.

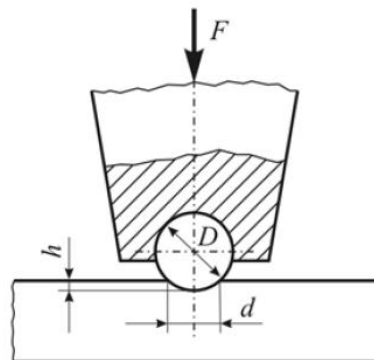


Slika 1.2.3 -1 Različite deformacije materijala

- **tvrdća** – je sposobnost materijala da se opire prodiranju nekog drugog tijela u njegovu površinu. Prema postupku određivanja razlikujemo:
 - **tvrdća prema Brinellu**
 - **tvrdća prema Vickersu**
 - **tvrdća prema Rockwellu**
 - **tvrdća prema Mohsu**
 - **tvrdća prema Shoreu i td.**

Brinellova metoda se primjenjuje kod mekših materijala kao npr. bakar, aluminij i njihove slitine. Ispituje se tako da se čelična kuglica neko vrijeme silom utiskuje u ispitivani materijal. Promjer koji je nastao utiskivanjem se mjeri s posebnim mikroskopom pomoću skale koja je ugravirana na okular. Mjereni promjer se zatim pomoću odgovarajućih krivulja pretvara u indeks tvrdoće po Brinellu.

Slika 1.2.3 -2 Brinellova metoda ispitivanja



1.2.4 TOPLINSKA SVOJSTVA MATERIJALA

Pod toplinskim svojstvima materijala podrazumijeva se utjecaj topline na materijal. Važnija toplinska svojstva materijala su:

- **toplinska vodljivost** – je sposobnost materijala da provodi toplinu. Izražava se jedinicom W/mK.
- **specifični toplinski kapacitet** – je svojstvo materijala da prima toplinu iz okoline. Također predstavlja količinu topline potrebnu da se masi materijala povisi temperatura za 1 K. Izražava se jedinicom J/kgK.
- **toplinsko rastezanje** – je svojstvo materijala da mijenja svoj obujam promjenom temperature. Izražava se jedinicom %/K.
- **toplina taljenja** – je količina topline potrebna da se masa od 1 kg materijala prevede iz krutog u tekuće stanje nakon što je dosegnuta temperatura taljenja. Izražava se jedinicom J/kg.

1.2.5 MAGNETSKA SVOJSTVA MATERIJALA

Magnetska svojstva materijala karakteriziraju ponašanje nekog materijala u magnetskom polju. Najznačajnija magnetska svojstva su:

- **permeabilnost** – je omjer gustoće magnetskog toka (magnetske indukcije B) i jakosti magnetskog polja (H) prema izrazu:

$$\mu = B/H$$

Ona pokazuje kakva je propustljivost magnetskog toka kroz neki materijal ($\mu = \mu_0 \mu_r$), gdje je μ_0 apsolutna permeabilnost vakuuma ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am), a μ_r relativna permeabilnost vakuuma.

- **remanencija (zaostajanje)** – je svojstvo magnetskih materijala da po prestanku djelovanja vanjskog magnetskog polja zadržava neko vrijeme magnetska svojstva, tj. u materijalu zaostane određeni magnetizam.
- **koercitivnost** – je mjera za jakost magnetskog polja koja je potrebna da se ukloni remanentni magnetizam u feromagnetskom materijalu. Kod čestih promjena smjera magnetiziranja (izmjeničnom strujom) koercitivnost određuje gubitke zbog premagnetiziranja. Oni su manji što je koercitivna sila manja.

1.2.6 OPTIČKA SVOJSTVA MATERIJALA

Najznačajnija optička svojstva materijala su:

- **boja** – je svojstvo materijala koje se očituje kao vidni osjet, dok boja ovisi o frekvenciji svjetlosnog zračenja.
- **sjaj** – je svojstvo materijala da reflektira svjetlost.
- **svjetlosna propustljivost** – je svojstvo materijala koje pokazuje koliku količinu svjetla i koji dio spektra propušta materijal.

Optička svojstva značajna su za izradu fotoelemenata, izvora svjetlosti, sunčanih kolektora i baterija, optičkih kabela, indikatora i td.

1.2.7 KEMIJSKA SVOJSTVA MATERIJALA

Kemijska otpornost ili ponašanje materijala je njihova sposobnost otapanja u drugim materijalima i njihovim spajanjem. Također dolazi i do postojanosti materijala pod djelovanjem različitih atmosferskih prilika. Glavna kemijska svojstva materijala su:

- **otpornost prema koroziji** – je otpornost prema razaranju strukture materijala zbog kemijskih ili elektrokemijskih utjecaja.
- **otpornost prema kiselinama** – je otpornost prema kemijskim procesima koje kiselina pospješuje.
- **otpornost prema lužinama** – je svojstvo materijala da se ne spaja s lužinama i da se pod njihovim utjecajem ne razara.
- **otpornost prema zapaljivosti** – je svojstvo materijala da se neće zapaliti ili povećati opasnost vatre ili dima.

Kemijska korozija nastaje zbog sklonosti dvaju ili više elemenata (spojeva) na međusobnu kemijsku reakciju, ovisno o temperaturi, koncentraciji, strukturi i stanju. **Elektrokemijska korozija** je elektrokemijski proces kojim se na površinu metala, zbog kontakta s drugim metalom veće plemenitosti, uz prisutnost vodenih otopina (elektrolita) tvore mali galvanski članci (elementi) koji uzrokuju koroziju.



Slika 1.2.7 – 1 Primjeri korozije materijala

1.2.8 TEHNOLOŠKA SVOJSTVA MATERIJALA

Tehnološka svojstva materijala daju informaciju o njegovoj obradivosti. Najznačajnija svojstva su:

- **deformiranja u hladnom i toplom stanju** – je sposobnost materijala da se može valjati, kovati, izvlačiti, savijati, duboko izvlačiti, previjati i td.
- **sposobnost struganja** – je mjerilo za obradivost materijala ručnim alatom i strojevima koji rade na principu skidanja strugotine.
- **zavarljivost i lemljivost** – je sposobnost spajanja materijala varenjem i lemljenjem.
- **sposobnost lijevanje** – je sposobnost ispunjavanja kalupa složenih oblika rastaljenim materijalom.
- **rezljivost** – je sposobnost materijala da se može obrađivati rezanjem. Primjenjuje se kao obrada metala, plastike, drva i td.
- **otpornost prema habanju** – je otpornost materijala prema skidanju površinskog sloja.

1.3. ISPITIVANJE MATERIJALA

Ispitivanje materijala je potrebno da se što točnije ustanove njegova svojstva, koja je potrebno poznavati bilo kod prerade bilo kod primjena. To se može postići samo ukoliko se točno poznaju i ako su točno određene različite okolnosti za utvrđivanje svojstava, npr. kod utvrđivanja temeljnih kemijskih svojstava, općih fizikalnih svojstava materijala, električne vodljivosti metalnih vodiča, temeljnih magnetskih karakteristika metala i td. Međutim postoji cijeli niz drugih svojstava, koja pored ostaloga ovise i o načinu ispitivanja. Tako npr. mehanička svojstva ovise o obliku uzorka, brzini porasta naprezanja kod ispitivanja i sl., nadalje sposobnost lijevanja, postojanost na koroziju, otpornost na habanje i drugi. Općenito se vrše tri vrste ispitivanja materijala:

- **ispitivanje prema standardima** – su točno propisana i daju podatke o tome u kojoj mjeri materijal po vrijednosti odgovara kvaliteti koja se od njega očekuje.
- **Ispitivanje materijala za rad u određenim uvjetima** – baziraju se na različitim ispitnim metodama, uključujući i metode standardnih ispitivanja. Koriste se metode koje su prilagođene prilikama koje vladaju u pogonu, a režimom ispitivanja nastoji se cijeli postupak ustanovljavanja posljedica u razumnim granicama ubrzati. Iako ne daju rezultate na sve praktične slučajeve pogona, najčešće se koriste kod usvajanja novih proizvoda i sl.
- **ispitivanja ponašanja materijala u gotovim proizvodima** – su često dugotrajna i veoma skupa, ali omogućuju uvid u ponašanje materijala u konkretnom slučaju primjene. Također omogućuju prenošenje iskustava na druge slične slučajeve.

Sa svrhom unificiranja zahtijeva na materijale kao uvođenje jednakih metoda i režima ispitivanja izrađuju se u svim tehnički razvijenijim zemljama **standardi za materijale** i njihovo ispitivanje. Ovim standardima nastoji se obuhvatiti sve materijale upotrebljavane u tehnici. U toku posljednjih godina učinjeno je i u našoj zemlji mnogo na području standardizacije, te se ide za sistematskim standardiziranjem materijala i ispitivanja po grupama.

Od stranih standarda poznati su DIN (Deutsche Industrie - Normen), VDE (Verband deutscher Elektrotechniker), ASTM (American Society for testing materials), BS (British Standards), GOST (Gosudarstvenie standardi) i dr. Od međunarodnih standarda za područje elektrotehnike poznati su **IEC** (International Electrotechnical Commission) te **ISO** (International Standard Assotiation). Nastoji se da se nacionalni standardi usklade s međunarodnim standardima, kako bi i usporedba rezultata ispitivanja dobivenih u raznim zemljama bila lakša.

Kada se govori o ispitivanjima, u praksi je isto tako važno i ispitivanje tržišta prije polaska u bilo kakav program izrade proizvoda, a i kasnije prilikom nabavke određenih materijala.

HRVATSKE NORME – nekoliko primjera:

- **HRN EN 10282:2001** – Magnetični materijali -- Metode mjerenja za određivanje otpora površinske izolacije elektrolimova i elektrotraka (EN 10282:2001)
- **HRN EN 10332:2008** – Magnetni materijali -- Trajni magnetni (magnetični tvrdi) materijali -- Metode mjerenja magnetskih svojstava (EN 10332:2003)
- **HRN EN 60146-1-1:2001** – Poluvodički pretvarači -- Opći zahtjevi i mrežom komutirani pretvarači -- 1-1. dio: Specifikacije temeljnih zahtjeva (IEC 60146-1-1:1991+A1:1996; EN 60146-1-1:1993+A1:1997)
- **HRN HD 21.15 S1:2007** – Kabeli nazivnog napona do i uključivo 450/750 V s termoplastičnom izolacijom -- 15. dio: Jednožilni kabeli, izolirani bezhalogenim termoplastičnim smjesama, za čvrsto ožičenje (HD 21.15 S1:2006)
- **HRN HD 538.1 S1:2008** – Trofazni suhi distributivni transformatori 50 Hz, od 100 kVA do 2500 kVA za najviši napon opreme koji ne prelazi 36 kV -- 1. dio: Opći zahtjevi i zahtjevi za transformatore za najviši napon opreme koji ne prelazi 24 kV (HD 538.1 S1:1992+A1:1995)

1.4. PITANJA ZA PROVJERU ZNANJA

1. Što su elektrotehnički materijali?
2. Što su elektrotehnički proizvodi?
3. Navedite sve vrste materijala koji se koriste u elektrotehnici?
4. Čemu služe električni materijali?
5. Koji metali se koriste za izradu vodiča?
6. Čemu služe poluvodički materijali?
7. Navedite glavne poluvodičke materijale.
8. Koja je uloga električnih izolacija?
9. Koji se materijali koriste za magnetske krugove?
10. Koliko iznosi masa i naboj elektrona?
11. Što su ioni?
12. Pojasnite Coulombovu silu.
13. Što su ionske veze?
14. Kako se ostvaruju kovalentne veze?
15. Kako se ostvaruju metalne veze?
16. Koji su sve energetske pojasevi materijala i kako se ti materijali razlikuju?
17. Navedite razlike između agregatnih stanja materijala.
18. Što je gustoća materijala?
19. Što je talište materijala?
20. Što je vrelište materijala?
21. Što je kapljište materijala?
22. Što je hrogroskopnost materijal?
23. Što govore električna svojstva materijala?
24. Koja su sve važna električna svojstva materijala?
25. Pojasnite što je specifična električna vodljivost materijala?
26. Pojasnite što je električna otpornost materijala?
27. Pojasnite što je temperaturni koeficijent električne otpornosti?
28. Što govore mehanička svojstva materijala?
29. Koja su sve važna mehanička svojstva materijala?
30. Kako sve djeluje sila na materijal?
31. Što govore toplinska svojstva materijala?
32. Koja su sve važna toplinska svojstva materijala?
33. Što govore magnetska svojstva materijala?
34. Koja su sve važna magnetska svojstva materijala?
35. Koja su sve važna optička svojstva materijala?
36. Što govore kemijska svojstva materijala?
37. Koja su sve važna kemijska svojstva materijala?
38. Kako nastaje kemijska korozija?
39. Kako nastaje elektrokemijska korozija?
40. Koja su sve važna tehnološka svojstva materijala?
41. Zašto je potrebno provesti ispitivanje materijala?
42. Koje su opće vrste ispitivanja materijala?
43. Navedite nekoliko međunarodnih standarda.

2. VODLJIVI I SPECIJALNI MATERIJALI

2.1 PODJELA I SVOJSTVA VODLJIVIH MATERIJALA

Vodljivi materijali kao i svi ostali materijali mogu se podijeliti prema više kriterija:

- veličini električne provodnosti
- sastavu (čiste metale i legure)
- položaju u periodnom sustavu elemenata (alkalni i zemnoalkalni)
- strukturi elektronskog omotača
- boji (crni i obojani)
- temperaturi taljenja (teško i lako taljivi)
- primjeni (vodiči, električni kontakti, elektrode)

Prema vrsti nosilaca naboja vodljivi materijali se dijele na:

- **vodiče prvog reda** (metali i slitine) – slobodni elektroni su nosioci naboja. Ug koriste u polikristalnom stanju. Možemo ih podijeliti na:
 - **metale velike električne provodnosti** (bakar, aluminij, srebro i zlato) imaju najmanju električnu otpornost (oko $10^{-8} \Omega\text{m}$) i zato se koriste za izradu vodiča.
 - **metale male električne provodnosti** (nikal, željezo, kositar, olovo, molibden, volfram, cink, itd.) imaju veću električnu otpornost (oko $10^{-7} \Omega\text{m}$) i posebne primjene u elektrotehnici.
 - **specijalne vodljive materijale** su oni materijali koji se koriste u izradi električnih kontakata, termoelektričnih parova, rastalnih osigurača, nelinearnih otpornika, galvanskih elemenata i akumulatora.
 - **otporne legure** (kantal, cekas, manganin, konstantan, itd.) od svih vodiča imaju najveću električnu otpornost (oko $10^{-6} \Omega\text{m}$), zbog čega se koriste za izradu otpornika i grijača.
- **vodiče drugog reda** (elektroliti) – ioni su nosioci naboja.

Osnovna svojstva koja karakteriziraju vodiče prvog reda za primjenu vođenja električne struje su:

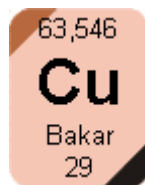
- **električna vodljivost i otpornost**
- **temperaturni koeficijent električne otpornosti** (α)
- **koeficijent toplinske vodljivosti** (λ) – toplina se prenosi kroz vodljive materijale atomima koji vibriraju oko ravnotežnog položaja i slobodnim elektronima.
- **mehanička i tehnološka svojstva** (obrativost)

Metal	El. otpornost ρ ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)	Temp. koeficijent otpornosti α (1/K)	Toplinska vodljivost λ (W/mK)	El. vodljivost κ (10^7 S/m)
Srebro	0.0162	0.0036	453	6.15
Bakar	0.0169	0.0040	385	5.82
Zlato	0.0240	0.0037	312	4.09
Aluminij	0.0262	0.0042	209	3.55
Željezo	0.0971	0.0057	80.2	1.03

Tablica 2.1 – 1 Svojstva metala koji se koriste za izradu vodiča

U tablici su zbog usporedbe i karakteristike željeza iako ne spada u metale velike električne vodljivosti.

2.2 BAKAR



Bakar je crveni metal, poslije srebra najbolji vodič topline i elektriciteta. Dužim stajanjem oksidira, a pod utjecajem atmosferilija (tvari iz atmosfere koje uzrokuju otapanje, raspadanje ili koroziju npr. oborine, vodena para, kisik, ugljični dioksid) s vremenom se prevlači zelenom patinom. U prirodi je rijedak u elementarnom stanju, može ga se naći raspršenoga u stijenama u obliku sitnog zrnja, pločica, grančica ili mahovinasto isprepletenih niti (najčešće kao kemijski čistoga ili sa malo primjesa srebra i bizmuta). Poznato je oko 240 ruda bakra. Najviše ga ima u **sulfidnim rudama** (halkopirit, kovelit, halkozin i bornit), zatim u **oksidnim** (kuprit) i u **karbonatnim rudama** (malahit i azurit). Sulfidne i oksidne rude se u prirodi nalaze najviše sa sulfidom željeza, a rjeđe sa sulfidima drugih metala. Sadržaj bakra u rudama relativno je nizak. Bogate rude sadržavaju samo 3 – 10 % bakra. Zahvaljujući efikasnim metodama obogaćivanja eksploatiraju se i siromašnije rude, te se najveća količina bakra danas dobiva iz ruda koje sadržavaju 0.5 – 2 % bakra. Iz oksidnih ruda bakar se najčešće dobiva hidrometalurškim (mokrim) postupkom pomoću otapala. Iz bogatijih sulfidnih ruda ili iz siromašnih sulfidnih ruda koje su prethodno oplemenjene pomoću flotacije, bakar se izdvaja sukcesivnom oksidacijom i redukcijom u jamastim ili plamenim pećima. Tako se dobiva **bakrenac** ili **bakarni kamenac**, s oko 30 – 40 % bakra, a nakon toga **sirovi bakar** ili **blister**. Sirovi bakar sadrži 97 % bakra, ali nije još za upotrebu jer ima u sebi neke primjese (željezo, arsen, zlato i dr.). Primjese se moraju ukloniti, ili zbog njihove vrijednosti (zlato, srebro), ili zbog štetnog utjecaja (željezo, arsen i dr.). Postupkom taljenja ili češće, pomoću elektrolize dobiva se **elektrolitski bakar** s 99.96 – 99.99 % bakra.

2.2.1 SVOJSTVA BAKRA

OSNOVNA SVOJSTVA BAKRA	
Specifična masa	8.9 kg/dm ³
Atomska težina	63.67
Redni broj	29
Električna vodljivost	56 – 59 Sm/mm ²
Temperaturni koef. istezanja	17·10 ⁻⁶ / K
Talište	1083 °C
Vrelište	2300 °C
Toplinska vodljivost	401 W/mK
Toplina taljenja	211.5 kWs/kg
Temperaturni koef. otpora	43·10 ⁻³ / K

Tablica 2.2.1 Osnovna fizikalna i tehnološka svojstva bakra

S obzirom na prekidnu čvrstoću, bakar se dijeli na: ekstra meki, meki, polutvrđi, tvrdi i ekstra tvrdi.

Mekše vrste bakra se koriste gdje se traži veća podatnost i električna vodljivost, a tvrde gdje je važnija čvrstoća, tvrdoća itd.

2.2.1.1 Tehnološka i mehanička svojstva

Bakar je relativno tvrd metal, dok se njegova tvrdoća može povećati žarenjem, deformacijom ili legiranjem. Bakar je gnječiv u hladnom i u vrućem stanju, te se dobro valja u tanke listove, kuje, preša, istiskuje i izvlači u tanke žice. Loš je za struganje i lijevanje. Dobro se spaja lemljenjem (kositrenim mekim i tvrdim, mjedenim i srebrenim lemovima kao i čistim srebrom) i zavarivanjem (ne

elektrootpornim, već elektrolučnim i plinskim). U rastaljenom stanju bakar upija plinove: O_2 , H_2 , N_2 , CO , CO_2 , SO_2 , vodenu paru itd., koje pri hlađenju otpušta pa ostaje šupljikav.

Dobra tehnološka svojstva bakra iskorištavaju se u proizvodnji poluproizvoda: žica, limova, profila, cijevi, folija, grijača, kotlova i td. U graditeljstvu se primjenjuje za izradu velikih pokrova koji, zbog svojstava bakrene patine, imaju veliku trajnost i specifičan izgled. U metalurgiji ima veliku primjenu kao legirajući metal.

2.2.1.2 Kemijska svojstva

Važno kemijsko svojstvo bakra je njegova dobra otpornost na koroziju. Bakar na zraku oksidira i prekriva se zelenkastim plaštem koji ga štiti od dalje oksidacije pa njegova otpornost na koroziju zadovoljava. Oksidiranje se ubrzava pri višim temperaturama (iznad $400\text{ }^{\circ}\text{C}$). Reagira sa sumporom tvoreći modru galicu $CuSO_4$ koja se ljušti s površine pa se korozija nastavlja (kada se prekriva gumom treba ga pokositriti).

Zbog izuzetno visoke električne i toplinske vodljivosti, otpornosti prema koroziji i dobrih mehaničkih svojstava bakar ima vrlo široku primjenu, naročito u **elektrotehnici**. Najčešće se koriste za izradu vodiča električne struje, tj. za izradu kabela, električnih vodova (osim dalekovoda gdje se koriste aluminij i čelik), namota električnih strojeva, dijelova električnih aparata, transformatora i td.

2.2.2 LEGURE (SLITINE) BAKRA

Upotreba čistog bakra (99.5 do 99.5 %) za vodiče najveće električne vodljivosti, u pravilu je tehnološki nemoguće zbog skupoće, a s druge strane najčešće ne udovoljava ostalim zahtjevima koji se postavljaju na njega (mehanički, kemijska postojanost, toplinska svojstva, ekonomičnost i td.). Kako bi se postigla zadovoljavajuća svojstva, bakar se legira, ali mu se smanjuje električna vodljivost. Pod pojmom **bakrenih legura** podrazumijevaju se legure u čijem sastavu prevladava sadržaj bakra. Bakrene legure se klasificiraju prema:

- načinu dobivanja
- namjeni
- broju glavnih dodanih elemenata
- vrsti glavnih dodanih elemenata

Prema vrsti glavnih dodanih elemenata postoje:

- **legure bez cinka (bronze)** – sadrže više od 60% bakra i dodatne elemente kao npr.: aluminij – Al, kositar – Sn, olovo – Pb, nikal – Ni, magnezij – Mg, silicij – Si, i td.
- **legure s cinkom (mjed ili mesing)** – sadrže osim bakra i cinka i druge elemente kao što su npr.: olovo – Pb, kositar – Sn, nikal – Ni i td.

Visokoprovodljivi elektrolitički bakar, ETP-bakar (99,90% Cu; 0,4% O), upotrebljava se za izradu električnih sabirnica, sklopki i prekidača, tiskarskih valjaka te kao materijal za izradu krovniha pokrova i bakrene galanterije u građevinarstvu. **Visokoprovodljivi bakar bez kisika**, OFHC-bakar (99,92% Cu, bez rezidualnog kisika) najčišći je konstrukcijski metal koji se danas koristi u industriji za vodiče, elektronske cijevi, električne sabirnice, grijače, radijatore, uljna hladila i td. **Arsen bakar** (99,65% Cu; 0,025% P; 0,30% As) se upotrebljava za izradu bojlera, radijatora, izmjenjivače topline, cijevi za kondenzaciju, i td.

2.2.2.1 Bronze

Bronze mogu biti dvojne, trojne i složene legure bakra. Zajednička svojstva svih bronci je povećana mehanička čvrstoća i veća električna otpornost u odnosu na bakar. Za izradu vodova u elektrodistribuciji i za TT vodove koriste se bronce koje sadrže do 97 % bakra, a kojem se dodaju jedan ili više od ovih elemenata: aluminij, kositar, nikal, olovo, silicij i td. Opća **primjena bronci** je za izradu kontakata, kolektorskih pločica, držača četkica, kliznih kontakata, provodnih stezača i td.

Nazivi ovih legura se određuju prema glavnim dodatnim elementima, npr.:

- kositrena bronca
- aluminijska bronca
- naklana bronca
- legura sa silicijem
- legura s olovom
- legura s olovom i kositrom



Slika 2.2.2.1 – 1 Primjeri kositrene bronce

Obično se **kositrena bronca** zove samo "bronca". Kositrena bronca sadrži do 20 % kositra – Sn. Možemo ih podijeliti na gnječive i ljevačke. Gnječive su homogene (jednolike) strukture, a ljevačke heterogene (nejednoliku) strukture. U elektrotehnici se više koriste **gnječive kositrene bronce**. Uz manje kositra (7 %), dodavanjem nešto fosfora (0,1 %) dobiva

se na čvrstoći i elastičnosti.

Aluminijska bronca je legura bakra i aluminija (do 14%). One su otpornije od kositrenih na koroziju, kiseline i soli. Također postoje ljevačke i gnječive. Ljevačke se više upotrebljavaju u strojarstvu.



Slika 2.2.2.1 – 2 Primjeri aluminijske bronce



Bronce s kadmijem i berilijem imaju znatno veću mehaničku čvrstoću i neznatno manju električnu vodljivost od bakra. Žilavost im je tri puta veća nego kod bakra, pa se stoga upotrebljavaju se za izradu vodova za pogonsko napajanje vlakova i tramvaja. Također se koriste za elastične dijelove aparata koji se zagrijevaju ili leme, izradu posuda i elektroda za zavarivanje. Bronce s berilijem upotrebljavaju se za telefonske vodove, dijelove u rotorima elektromotora i za izradu opruga.

Slika 2.2.2.1 – 3 Primjer bronce s kadmijem

2.2.2.2 Mjed ili mesing

Mjed ili mesing je dvokomponentna legura bakra (najmanje 50 %) i cinka (najviše 44 %) ili trokomponentna legura:

- bakra (50 %), cinka (44 %) i olova (4 %)
- bakra, cinka, i 7.5 % nikla, mangana, željeza, aluminija, silicija, kositra
- bakra (više od 80 %), cinka i kositra
- bakra, cinka i nikla (najmanje 10 %)

Mjed je materijal koji ima bolju mehaničku čvrstoću i veću električnu otpornost u odnosu na bakar. Zbog jake otpornosti prema koroziji mjed se koristi u agresivnim atmosferama poput morske, dok je osjetljiv na kiseline i lužine.

Mjedi za kovanje (60% Cu; 39% Zn; 0,30% Pb; 0,07% Fe) koriste se za izradu limova, traka, šipki i sličnih proizvoda. **Mjedi za zavrtnanje** (58% Cu; 40% Zn; dodaci do 2%) koriste se za sitne dijelove instrumenata, zupčanike satova, gravirane skale, zakovice i td. **Mornarička mjed** (Cu 60%; Zn 39%; Sn 1%) otporna je na koroziju, jeftina je, a koristi se u brodogradnji u obliku ploča, traka i šipki. U elektrotehnici mjedene legure su vodljivi i konstrukcijski materijali. Najčešće se koristi **mjed Cu63Zn** (63% Cu; 37% Zn) od kojeg se izrađuju instalacijski dijelovi: grla, utikača, rastalnih osigurača, utikačkih kutija, montažne pločice itd. Žica od meke mjedi primjenjuje se u nekim slučajevima za namatanje električnih strojeva (pomoćna faza jednofaznih motora).



Slika 2.2.2.2 – 1 Primjeri korištenja mjedi

2.3 ALUMINIJ



Aluminij je srebrnasto – bijeli metal koji je 3.3 puta lakši od bakra. Aluminijski spojevi su vrlo zastupljeni u Zemljinoj kori (oko 7.5%), a aluminij se može izdvojiti iz bilo kojeg od njih. Međutim, komercijalno se koriste samo **boksiti** koji sadrže visok postotak (najmanje 50 %) aluminijskog (III) – oksida (Al_2O_3) uz istovremeno nizak sadržaj silicijskog (IV) – oksida (do 3 %, a u nekim slučajevima do 10 %). Ime rude boksit potječe od Les Baux, mjesta u Francuskoj gdje je otkriven. Boksit je smjesa aluminijem bogatih minerala (bemita i diaspora a katkad i hidrargilita), a od primjesa najviše ima silicijskog i željezovih oksida. Da bi se rude dobio Al_2O_3 (glinicu), potrebno ju je očistiti od primjesa. Primjenjuje se više postupaka, a daleko se najviše upotrebljava mokri **postupak po Bayeru** otkriven 1889. godine.

U Bayerovom postupku fino samljevena ruda raščinja se u autoklavu pri temperaturi od 160 – 170°C i tlaku 5-7 atm kroz 6 – 8 sati pomoću 35 – 50%-tne otopine natrijeve lužine. Iz vrućeg filtrata iskristalizira se aluminijev hidroksid cijepljenjem otopine kristalima hidrargilita. Aluminijev hidroksid se žarenjem u rotacijskim pećima, na temperaturi iznad 1200°C, prevodi u glinicu (Al_2O_3) koja se podvrgava elektrolizi. Pri Bayerovom postupku javlja se značajan gubitak aluminija i osobito natrijeve lužine zbog prisutnosti silicija pa je dobro da ga u rudi ima što manje. Daljnje pročišćavanje vrši se pretaljivanjem aluminija u otpornim ili induktivnim električnim pećima tako da se talina aluminija drži nekoliko sati na temperaturi 700°C kako bi primjese isparile ili isplivale na površinu, a pročišćeni aluminij ispušta se na dnu. Za dobivanje aluminija visoke čistoće provodi se naknadna elektrolitička rafinacija.

2.3.1 SVOJSTVA ALUMINIJA

OSNOVNA SVOJSTVA ALUMINIJA	
Specifična masa	2.7 kg/dm ³
Atomska težina	26.98
Redni broj	13
Električna vodljivost	34.8 – 38 Sm/mm ²
Temperaturni koef. istezanja	24·10 ⁻⁶ / K
Talište	657 °C
Vrelište	2270 °C
Toplinska vodljivost	209.3 W/mK
Toplina taljenja	397 kWs/kg
Temperaturni koef. otpora	4.2·10 ⁻³ / K

Tablica 2.3.1 Osnovna fizikalna i tehnološka svojstva aluminija

Aluminij se prema čvrstoći dijeli na: rafinal, meki, polutvrđi, tvrdi i ekstra tvrdi. Najčišći (elementarni) aluminij, gotovo 100% naziva se **rafinal**.

2.3.1.1 Tehnološka i mehanička svojstva

Aluminij je mekan, relativno krt i sjajan metal. Lagan je, stoga se može kovati, valjati u vrlo tanke listiće i izvući u fine niti. Po plastičnosti je treći, a po kovnosti šesti od tehnički važnih metala. Kao tehnološki metal aluminij se prvenstveno koristi legiran s drugim metalima. Obično su to višekomponentne legure u kojima su drugi metali u manjim količinama, a tvore čvrstu otopinu s aluminijem ili su disperzirani u sitnim česticama. Postoje dvije skupine **legura aluminija**: ljevene i kovne. Radi poboljšanja svojstva **ljevenom aluminiju** se dodaje silicij, bakar ili magnezij, pojedinačno ili u kombinaciji. Ove legure imaju vrlo dobra mehanička svojstva i lagane su, pa se koriste u izgradnji strojnih dijelova, zrakoplova i svemirskih letjelica. **Kovne aluminijeve** legure sadrže bakar, magnezij, mangan, a ponekad cink i nikal. Pogodne su za izvlačenje i prešanje.

2.3.1.2 Kemijska svojstva

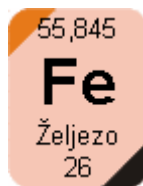
Dobar je vodič topline i električne struje. Iako spada u skupinu neplemenitih metala, vrlo je otporan prema utjecaju korozivnih tvari kao što su voda, dušične kiseline, mnoga organska otapala, te atmosferski utjecaji. Uzrok postojanosti je stvaranje tankog oksidnog sloja na površini metala koji se ne ljušti i štiti metal od daljnje oksidacije. Umjetno pasiviziranje površine vrši se postupkom elektrolitičke oksidacije poznate pod tehničkim nazivom eloksiranje. Aluminij nije otrovan, ali nema niti posebnu biološku funkciju. Već pri sobnoj temperaturi se lako otapa u lužinama pri čemu nastaju aluminati, i u ne oksidirajućim kiselinama kada nastaju soli. Sposobnost otapanja elementa u kiselinama i lužinama naziva se amfoternost.

Zahvaljujući navedenim svojstvima aluminij ima vrlo široku primjenu u građevinarstvu, metalurgiji, strojogradnji i velikom broju drugih djelatnosti. Sam elementarni aluminij ima znatno užu primjenu jer je mek i krt. Elementarni aluminij koristi se npr. za napanje na glatke plohe gdje stvara visoko reflektirajući sloj - gotovo idealno zrcalo, pa se koristi kao nanos na teleskopskim zrcalima i drugim reflektirajućim ploham. U **elektrotehnici** aluminij služi za izradu dalekovodnih i telefonskih vodova, za zaštitne oplata raznih namjenskih i specijalnih kablova te za podnoške električnih žarulja. Velike količine legiranog aluminija visokih mehaničkih svojstava koristi strojogradnja i industrija transportnih sredstava, od automobila do zrakoplova. Za izradu zrakoplova aluminij je danas nezamjenjiv materijal, posebno nakon usvajanja novih tehnika varenja i spajanja aluminijских elemenata. Osim navedenih najvažnijih, stotine današnjih proizvoda sadrže aluminijske elemente u svojoj građi.

Slika 2.3.1 – 1 Primjeri korištenja aluminija



2.4 ŽELJEZO



Za dobivanje željeza danas se isključivo upotrebljavaju **oksidne i karbonatne rude**. Iz oksidnih ruda željezo se dobiva redukcijom ruda koksom, odnosno ugljik (II) – oksidom u visokim pećima. Iz ruda koje su siromašne željezom (npr. limonita), željezo se dobiva tzv. kiselim taljenjem i Kruppovim postupkom. Proizvodi koji nastaju u visokoj peći su:

- **sirovo željezo** – polaganim hlađenjem dobiva se sivo sirovo željezo iz kojeg se izlučio grafit. Naglim hlađenjem dobiva se bijelo sirovo željezo iz kojeg se grafit nije stigao izlučiti. Međutim, sirovo željezo obično se ne hladi nego odmah prerađuje u čelike.
- **troska** – uglavnom je kalcijev alumosilikat, a upotrebljava se za proizvodnju cementa te kao izolacijski materijal.
- **grotleni plin** – nastaje kao proizvod navedenih procesa gorenja, a sastoji se od dušika, ugljičnog dioksida, ugljičnog monoksida, vodika i metana. Koristi se za zagrijavanje zraka koji se upuhuje u peć.

Sirovo je željezo, zbog većeg sadržaja nečistoća i ugljika, jako krhko i nepodesno za obradu ili primjenu. Može se koristiti samo za lijevanje najgrubljih masivnih predmeta (npr. postolja) koji nisu mehanički ili termički opterećeni. Da bi se dobilo kvalitetnije željezo ili čelik sirovo se željezo prerađuje, što uključuje smanjenje sadržaja svih primjesa i podešavanje željenog sadržaja ugljika koji bitno određuje kvalitetu čelika. **Čelikom** se smatra legura željeza s 0.05 – 1.7% ugljika. Pročišćeno sirovo željezo koje sadrži više od 1.7%, a manje od 2.5% ugljika obično zovemo lijevano željezo, a koristi se za izradu masivnijih željeznih odljevaka za razna postolja, nosače, konstrukcijsko i građevinsko željezo i td. Miješanjem sirovog željeza s talinom kvarcnog pijeska i pretaljivanjem te smjese u pećima obloženim Fe_2O_3 u talini se dobiva spužvasto, porozno željezo u kojem prisutni Fe_2O_3 oksidira većinu primjesa. Dobiva se tzv. **profilno željezo** jer se direktno iz peći, pod tlakom koji istiskuje silikatnu masu s otopljenim primjesama, izvlače profilni proizvodi željeza (cijevi, tračnice, šipke i td.). Postoji više postupaka **prerade željeza u čelike**, a najčešća su:

- **neposredno propuhivanjem kisikom** ili zrakom obogaćen kisikom kroz rastaljeno željezo u konverterima. Najviše se koriste Bessemerov i Thomasov postupak. Razlikuju se u tome što se Thomasovim postupkom iz sirova željeza može ukloniti i fosfor.
- **posredno oksidacijom** koja se provodi u Siemens - Martinovim pećima. Kod ovog postupka oksidaciju vrši kisik iz plinova iznad taline.
- **LD-postupkom s čistim kisikom** (99,9%) u kojem se kisik ne provodi kroz talinu, nego provodi kroz vodom hlađenu kapljastu cijev koja seže do jednog metra iznad taline. Danas se ovaj postupak sve više primjenjuje.
- **elektrolučnim postupak** u kojem se sirovo željezo tali električnim lukom. Ovo je moderniji postupak dobivanja legiranih čelika u kojima je udio drugih metala veći od 5%.



Slika 2.4 – 1 Postupci obrade željeza

2.4.1 SVOJSTVA ŽELJEZA

OSNOVNA SVOJSTVA ŽELJEZA	
Specifična masa	7.874 kg/dm ³
Atomska težina	55.845
Redni broj	26
Električna vodljivost	8 – 10 Sm/mm ²
Temperaturni koef. istezanja	11.1·10 ⁻⁶ / K
Talište	1538 °C
Vrelište	2862 °C
Toplinska vodljivost	80.2 W/mK
Toplina taljenja	247 kWs/kg
Temperaturni koef. otpora	5.7·10 ⁻³ / K

Tablica 2.4.1 Osnovna fizikalna i tehnološka svojstva željeza

Željezo ima veliku prekidnu čvrstoću, što je prednost kod npr. TT vodiča.

2.4.1.1 Tehnološka i mehanička svojstva

Željezo je sivobijeli metal koji se može lako kovati, variti u vrućem stanju i ispolirati do visokog sjaja. Čisto željezo se može magnetizirati, ali ne može zadržati magnetizam. **Primjena željeza** je prvenstveno u obliku čelika, a manje kao sirovog ili lijevanog željeza. To je najvažniji tehnološki i konstrukcijski materijal, a do danas je poznato više od tisuću vrsta čelika. Odlikuju se velikom izotropnom čvrstoćom, tvrdoćom, žilavošću, mogućnošću lijevanja i mehaničke obrade te velikom elastičnošću.

2.4.1.2 Kemijska svojstva

Željezo je kemijski vrlo reaktivno i kao neplemeniti metal otapa se u ne oksidirajućim kiselinama. Na zraku je vrlo nestabilno i relativno brzo **oksidira** (hrđa). U oksidirajućim kiselinama (koncentriranoj sumpornoj i dušičnoj kiselini) površina željeza se ne otapa, nego pasivizira stvaranjem zaštitnog sloja.

2.4.1.3 Čelik

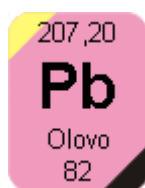
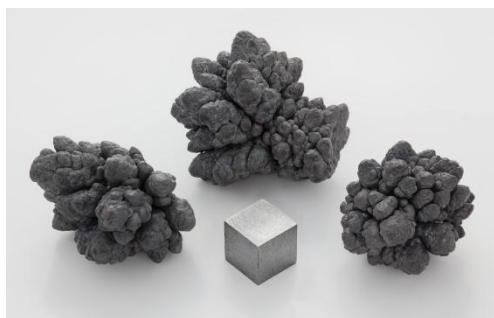
Prema namjeni čelike možemo podijeliti na konstrukcijske, alatne i specijalne čelike, dok prema sastavu mogu biti ugljični i legirani. Čelik se legira s brojnim metalima. To su najčešće nikal, krom, mangan, vanadij, volfram, molibden i kobalt, ali mogu biti i bakar, aluminij i silicij. Mangan čeliku povećava tvrdoću, čvrstoću i otpornost na habanje; nikal povećava žilavost; molibden povećava tvrdoću i otpornost na koroziju, a volfram vatrostalnost. **Nehrđajući čelici** sadrže primarno krom (najmanje 12%) te manje dodatke nikla.

Prema **načinu prerade** dijele se na sirove čelike, lijevane čelike, valjane čelike, kovne čelike, vučene čelike, i td. Prema mikrostrukтури mogu biti feritni, perlitni, martenzitni, ledeburitni i austenitni. Željena se mikrostruktura postiže sadržajem ugljika i procesom direktne ili naknadne termičke obrade.



Slika 2.4 -2 Primjeri korištenja željeza u industriji

2.5 OLOVO



Olovo je težak, srebrno-plavkast, sjajan metal koji na zraku brzo posivi stvaranjem zaštitnog oksidno-karbonatnog sloja. Vrlo je mekan pa se može deformirati rukama i rezati nožem. Za dobivanje olova upotrebljavaju se primarne i sekundarne sirovine. Kao primarne sirovine u glavnini se koriste sulfidne rude koje sadrže galenit. Iz **galenitnih ruda** dobiva se 95% današnje proizvodnje olova.

Kao sekundarne sirovine koriste se istrošeni olovni akumulatori i različiti industrijski otpaci kao što su otpaci valjanog olova od kojeg su bile građene kemijske aparature te otpaci olovni legura. Olovo se iz ruda uglavnom dobiva djelomičnim ili potpunim žarenjem galenita sa zrakom, zatim redukcijom dobivene oksidne mase i konačno rafinacijom sirovog olova. Bez obzira na način dobivanja, **sirovo olovo** ima koncentraciju 97-99%, a ostalo su razne primjese nemetala i metala (najčešće su bakar, kositar, bizmut, srebro, arsen i sumpor). Navedene primjese se uklanjaju pirometalurškim ili elektrolitskim (Bettsovom) postupkom. Prvi način upotrebljava se češće jer se njime pojedine primjese mogu odvojiti selektivno i dobiva se čišće olovo. Tim se postupkom najprije uklanja bakar, nemetali i primjese željeza, a zatim arsen, antirnon i kositar, a na kraju plemeniti metali (srebro i zlato), cink i bizmut.

2.5.1 SVOJSTVA OLOVA

OSNOVNA SVOJSTVA OLOVA	
Specifična masa	11.34 kg/dm ³
Atomska težina	207.2
Redni broj	82
Električna vodljivost	4.8 Sm/mm ²
Temperaturni koef. istezanja	29·10 ⁻⁶ / K
Talište	328 °C
Vrelište	1749 °C
Toplinska vodljivost	35.3 W/mK
Toplina taljenja	39.175 kW/kg
Temperaturni koef. otpora	3.9·10 ⁻³ / K

Tablica 2.5.1 Osnovna fizikalna i tehnološka svojstva olova

Da bi se poboljšala mehanička svojstva, olovo se legira. Glavni su dodaci olova kositar i antimon, a ponekad i bakar, bizmut, kadmij i srebro.

2.5.1.1 Tehnološka i mehanička svojstva

Zbog male tvrdoće i velike rastezljivosti lako se savija, valja u limove i izvlači u žice. Ima veliku gustoću i nisko talište. U odnosu na druge metale relativno je **loš vodič električne struje i topline**. Najviše se olova koristi za proizvodnju olovni akumulatora, za pripravu tetraetil-olova, izradu olovni cijevi i lima, za kanalizacijske instalacije u domaćinstvu. Vrlo dobro zaustavlja ionizirajuća zračenja (rengenske i gama-zrake), pa se od olova izrađuju zaštitne radiološke obloge, blokovi, cigle, pregače, rukavice i td. Također velike količine olova se troše za izradu municije.

2.5.1.2 Kemijska svojstva

U destiliranoj vodi i u vodi bez kisika olovo se ne otapa. Ako je u vodi prisutan kisik, kao u prirodnim vodama, olovo se otapa zbog elektrokemijskih procesa (**korozija olova**). Ako voda sadrži hidrogen-karbonate i sulfate, što je redovita pojava u prirodnim vodama, na površini olova nastaje sloj teško

topljivog baznog olovnog karbonata i sulfata koji je čvrsto vezan na površinu i štiti olovo od daljnje korozije. Zbog toga se olovo upotrebljavalo za izradu vodovodnih cijevi još za rimskog doba.

Danas se u tu svrhu ne koristi osim u slučaju odvodnih vodoinstalacija. Olovo se ne otapa u klorovodičnoj, fluorovodičnoj i sumpornoj kiselini (do koncentracije 80%) zbog teško topljivog zaštitnog sloja. Stoga se u **kemijskog industriji** upotrebljava za prevlačenje reakcijskih posuda ili za izradu čitavih dijelova aparatura, za oblaganje komora u proizvodnji sumporne kiseline i spremnika za nagrizajuće kemijske tvari. Međutim, u vrućoj i koncentriranoj sumpornoj kiselini olovo se otapa, kao i u razrijeđenoj dušičnoj kiselini, a u octenoj, mravljoj i vinskoj kiselini otapa se samo u prisutnosti kisika. Na višim temperaturama olovo se spaja s halogenim elementima i drugim nemetalima.

Olovo i njegove soli su otrovni. Za akutno trovanje potrebne su velike doze. Otrovnost djelovanje olova temelji se na njegovom selektivnom zadržavanju u živčanim stanicama gdje utječe na bilancu energije, na prijenos živčanog impulsa i na strujanje iona natrija, kalija i kalcija. Također utječe na funkcioniranje jetre. Simptomi kroničnog trovanja olovom su slabost, opstipacija (nemogućnost ispražnjivanja crijeva), jaki grčevi u želudcu (olovni kolici), anemija, psihičke promjene i paraliza. Najveća dozvoljena koncentracija olova u industrijskim prostorijama je 0.15 mg/m^3 .

2.5.1.3 Legure olova

Tvrdo olovo legura je s 1 – 12% antimona (Sb). Ove legure imaju dobra mehanička svojstva i otporne su na koroziju. Upotrebljavaju se za izradu plaštova energetskih kablova, olovnih cijevi i akumulatorskih ploča (legiran s 1 – 5% Sb), za zaštitu od radioaktivnog zračenja (2 – 9% Sb), za tiskarske legure (16 – 25% Sb), i td.

Legure olova sa kositrom sadržaja 40 – 60%, koriste se kao materijali za meko lemljenje te za presvlačenje željeznih površina olovom za zaštitu od korozije. **Ternarni eutektik**, koji sadrži 84% Pb, 12% Sb i 4% Sn, upotrebljava se kao materijal za lemljenje, za lijevanje pod tlakom te kao ležajne i tiskarske legure.

Legure olova za tiskarski slog imaju tipično od 75 – 93% olova te dodatke 3 – 8% kositra i 4 – 16% antimona.

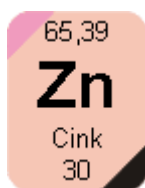
Legure olova s dodatkom arsena 0.3 – 0.5%, koriste se za izradu meke sačme, a s dodatkom 2% arsena za tvrdnu sačmu.



Slika 2.5 – 1 Primjeri korištenja olova



2.6 CINK



Cink komercijalne čistoće je metal plavkasto-bijele boje koja potječe od finog površinskog sloja alkalnog karbonata, dok je potpuno čist cink srebrno-bijele boje. Ima gustu heksagonsku kristalnu rešetku. Kao sirovine za metalurško dobivanje cinka najčešće se koriste **rude bogate sfaleritom i smitsonitom** te industrijski cinkovi otpaci (cinkovi pepeli). Cinkove rude obično imaju mali postotak cinka (2 – 12%), prije prerade se koncentriraju. Obogaćivanje rude vrši se redukcijско-oksidacijskim žarenjem Walzovim postupkom (oksidne rude i cinkovi pepeli) ili flotacijom. Flotacija je postupak odjeljivanja hidrofbne čvrste tvari (netopljive u vodi) od hidrofilnih (topljivih u vodi) pomoću mjehurića zraka – kod sulfidne rude. Iz obogaćenih ruda odnosno koncentrata (koji sadrži 45 – 55% Zn) cink se može dobiti suhim, pirometalurškim postupkom ili mokrim, hidrometalurškim postupkom (elektrolizom) gdje se dobije cink čistoće 99.99%.

2.6.1 SVOJSTVA CINKA

OSNOVNA SVOJSTVA CINKA	
Specifična masa	7.14 kg/dm ³
Atomska težina	65.39
Redni broj	30
Električna vodljivost	16.7 Sm/mm ²
Temperaturni koef. istezanja	29·10 ⁻⁶ / K
Talište	419.53 °C
Vrelište	907 °C
Toplinska vodljivost	120 W/mK
Toplina taljenja	112 kWs/kg
Temperaturni koef. otpora	4·10 ⁻³ / K

Tablica 2.6.1 Osnovna fizikalna i tehnološka svojstva cinka

Da bi se poboljšala mehanička svojstva, olovo se legira. Glavni su dodaci olova kositar i antimon, a ponekad i bakar, bizmut, kadmij i srebro.

2.6.1.1 Tehnološka i mehanička svojstva

Dosta je tvrd i pri udaru daje lijep metalan zvuk. Pri sobnoj temperaturi je dosta krhak i lomljiv. Između 100 i 150°C omekša i postaje rastezljiviji pa se lako kuje, valja u tanke listiće (tanke samo 0.05 mm) i izvlači u žicu. Iznad 200°C postaje ponovo krhki i može se smrviti u prah.

Upotrebljava se za izradu dijelova motornih vozila, strojeva, kućanskih aparata, a **u elektrotehnici** za izradu čašica koje služe kao anoda u suhim baterijama (Leclancheovi članci). Velike se količine cinka troše za zaštitu metala od korozije pocinčavanjem (građevinsko željezo, krovni plaševi, oluci, vodovodne cijevi itd.) ili anodnu zaštitu (brodovi). U metalurgiji se **koristi za izlučivanje drugih metala** iz otopine i kao **sastojak legura** bakra, aluminiija i magnezija.

2.6.1.2 Kemijska svojstva

Cink je vrlo neplemenit metal. Iako bi prema svom položaju u elektrokemijskom naponskom nizu trebao reagirati s vodom, do reakcije ne dolazi jer se na njegovoj površini stvara zaštitni sloj teško topljivog alkalnog karbonata. Zbog toga je cink **vrlo otporan** prema atmosferskim utjecajima, vodi i neutralnim ili slabo lužnatim otopinama. Potpuno čist cink se ne otapa ni u razrijeđenim kiselinama, ali ako su u cinku ili otopini prisutne i najmanje količine plemenitijih metala, otapa se uz razvijanje

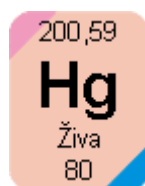
vodika. To svojstvo koristi se za laboratorijska za dobivanje vodika. Otapa se i u jakim lužinama. Iz ovog se zaključuje da otpornost cinka na koroziju zavisi od čistoće metala i od sastava agresivne sredine. Zagrijan na zraku na temperaturu 500°C, cinkov prah izgara zasljepljujućim plamenom karakteristične blijedozelene boje pri čemu nastaje bijeli prah cinkova oksida. Lako reagira sa sumporom, a smjesa cinkova praha sa sumpornim cvijetom zapaljena gori kao barut. Zbog velikog afiniteta prema kisiku, cink burno reagira s metalnim oksidima. Izlučuje većinu teških metala iz njihovih otopina pri čemu sam prelazi u otopinu.

U kemijskoj industriji koristi se za izradu bijelog pigmenta, za čišćenje lužina u elektrolizi i kao reduksijska sredstvo. Postoji još velik broj oblika upotrebe cinka kao što su: za izradu igračaka, u pirotehnici, za laboratorijsku proizvodnju vodika, za ambalažu i td.



Slika 2.6 – 1 Primjeri korištenja cinka

2.7 ŽIVA



Elementarna živa je srebrnastobijel metal, jedini koji se pri sobnoj temperaturi nalazi u tekućem stanju. Za dobivanje žive koristi se **cinabarit** koji se žari na zraku da bi se dobio oksid. Ruda se najprije koncentrira s 25 – 50% žive, a zatim se u peći za prženje koncentrat zagrijava uz pristup zraka. Kako se žarenje sulfida vrši na temperaturi višoj od vrelišta žive, elementarna živa izlučuje se u obliku pare. Pare se kondenziraju u tekuću fazu u cjevastim kondenzatorima hladene vodom, a tekuća živa skuplja se u željeznim, vodom napunjenim bačvama. Kod ukapljivanja se sva živina para ne kondenzira u tekući metal, već dio prelazi u prah (tzv. stupu) koji sadrži 80% žive, a ostalo su živine soli, leteća prašina, čađa i katran. Da bi se iz stupe izdvojila živa, preša se, pri čemu živa istječe u sabirne posude. Na ovaj način destilacijom ili iz stupe dobije se veoma čista živa (sadrži 95 – 98% Hg), a rafinacijom može se dobiti živa čistoće 99.9%.

Živine pare jako su otrovne i udisanjem mogu dovesti do trovanja koja se u početku očituju u lakom krvarenju zubnog mesa, kasnije u slabosti pamćenja, glavoboljama, smetnjama u probavi i na kraju teškim oštećenjima živčanog sustava.

Živa se u prirodi javlja kao smjesa sedam stabilnih izotopa ^{196}Hg (0,146%), ^{198}Hg (9,97%), ^{199}Hg (16,87%), ^{200}Hg (23,10%), ^{201}Hg (13,18%), ^{202}Hg (29,86%) i ^{204}Hg (6,85%), i dvadesetak radioaktivnih, uglavnom kratkoživućih, izotopa (osim ^{194}Hg s $t_{1/2}=520\text{g}$. i ^{203}Hg s $t_{1/2} = 46,6$ dana).

2.7.1 SVOJSTVA ŽIVE

OSNOVNA SVOJSTVA ŽIVE	
Specifična masa	13.534 kg/dm ³
Atomska težina	200.59
Redni broj	80
Električna vodljivost	1.0438 Sm/mm ²
Temperaturni koef. istezanja	61·10 ⁻⁶ / K
Talište	- 38.8290 °C
Vrelište	356.73 °C
Toplinska vodljivost	8.3 W/mK
Toplina taljenja	11.416 kWs/kg
Temperaturni koef. otpora	0.99·10 ⁻³ / K

Tablica 2.7.1 Osnovna fizikalna i tehnološka svojstva žive

Živa pri sobnoj temperaturi je u tekućem stanju i isparava vrlo polagano.

2.7.1.1 Tehnološka i mehanička svojstva

Tekuća živa vrlo je fluidna i ima veliku površinsku napetost pa se lako formira u kuglaste kapi koje ne moće stjenke posude ili podloge pa na površini stvara konveksni rub. U čvrstom stanju ima romboedarsku kristalnu strukturu. Toplinska i električna vodljivost žive nisu velike u odnosu na standardne vodiče, ali lako stvara električni kontakt pa se koristi u raznim električnim uređajima (živini prekidači). Prolazom električne struje kroz razrijeđene živine pare **nastaje svjetlost** bogata ljubičastim i ultraljubičastim spektralnim linijama pa se upotrebljava za izradu kvarcnih svjetiljki i živinih žarulja za rasvjetu. **Živine svjetiljke** koriste izboj u parama pod visokim tlakom (u kvarcnom žišku stvara se plazma) koji generira isti spektar, ali intenzivnijih linija. Ultraljubičasto zračenje pretvara se u vidljivu svjetlost posredstvom fluorescentnog nanosa na staklenom balonu cijevi. Živine pare niskog tlaka na isti način generiraju zračenje u standardnim fluorescentnim cijevima.

2.7.1.2 Kemijska svojstva

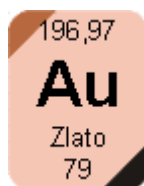
Pri sobnoj temperaturi na zraku čista se živa ne mijenja, a onečišćena se prevlači oksidnom kožicom. Zagrijavanjem na zraku ili u prisutnosti kisika živa kod 357 °C stvara oksid, HgO. Lako se spaja s halogenim elementima i sumporom. Otapa se samo u oksidirajućim kiselinama kao što su razrijeđena i koncentrirana dušična i vruća koncentrirana sumporna kiselina. Ne otapa se u klorovodičnoj kiselini i u lužinama. Tekuća živa otapa brojne metale (osim željeza i platine) stvarajući legure koje se nazivaju **amalgami**. Ovisno o sadržaju metala, amalgami mogu biti tekući (sadrže malo metala) i čvrsti. Posebno su važni natrijev i kalijev amalgam koji se koriste pri elektrolizi alkalijskih halogenida te srebrov amalgam koji se dosta (ali sve manje) koristi u stomatologiji za izradu plombi.

Živa se upotrebljava kao elektroda u raznim elektrolitičkim postupcima i kao katalizator raznih procesa, a u poljoprivredi kao herbicid i pesticid. Zbog velike gustoće, stabilnosti na zraku i jednolikog prostornog termičkog širenja, živa se upotrebljava za punjenje manometara, barometara i termometara. Organometalni živini spojevi, poznati kao merkuriali (npr. Merkurofen, Mertoxol, Meroxyl, Merkabolid i dr.) upotrebljavaju se kao antiseptička i dezinfekcijska sredstva.



Slika 2.7 – 1 Primjeri korištenja žive

2.8 ZLATO



Zlato je plemenit metal sjajne žute boje i ima plošno centriranu kubičnu strukturu. Najstariji postupak dobivanja zlata je ispiranje zlatonosnog kamenja i pijeska pri čemu se zlatne ljuščiće zbog svoje velike specifične težine brže istalože od lakših popratnih tvari. Kod suvremenih postupaka zlato se iz primarnih i sekundarnih nalazišta može dobiti **amalgamizacijom** ili, kao i srebro, cijanidnim postupkom. Kod ovog postupka prethodno smrvljena ruda temeljito se obradi vodom i živom pri čemu se velik dio zlata amalgamira živom uz istovremeno nastajanje gruboznatog zlatonosnog mulja. Iz nastalog zlatnog amalgama živa se oddestilira zagrijavanjem i regenerira kondenziranjem u hladioniku, a preostalo sirovo zlato tali se u grafitnim loncima. U **cijanidnom postupku** ruda se prvo usitni do finoće mulja, a zatim se zgusne u dekantatorima do sadržaja 50 – 60% vode i obradi 0.1 – 0.25%-tnom otopinom kalijeva ili natrijeva cijanida uz snažno miješanje i provjetravanje komprimiranim zrakom. Manje količine zlata dobivaju se i iz **anodnog mulja** koji zaostane nakon elektrolitske rafinacije bakra i srebra. Pri tome se anodni mulj rafinira elektrolitskim postupkom. Kao elektrolit služi otopina tetrakloroauratne (III) – kiseline, za anode se koriste blokovi sirovog zlata, a za katode fini zlatni lim (legura Au – Ag). U tijeku elektrolize na katodi se izlučuje zlato čistoće 99.98 %.

2.8.1 SVOJSTVA ZLATA

OSNOVNA SVOJSTVA ZLATA	
Specifična masa	19.3 kg/dm ³
Atomska težina	196.9665
Redni broj	79
Električna vodljivost	43.478 Sm/mm ²
Temperaturni koef. istezanja	14·10 ⁻⁶ / K
Talište	1064.18 °C
Vrelište	2970 °C
Toplinska vodljivost	318 W/mK
Toplina taljenja	63.716 kWs/kg
Temperaturni koef. otpora	4·10 ⁻³ / K

Tablica 2.8.1 Osnovna fizikalna i tehnološka svojstva zlata

Zlato je dobar je vodič topline i elektriciteta.

2.8.1.1 Tehnološka i mehanička svojstva

Zlato je veoma mekano i podatno, a uz to vrlo žilavo pa se može izvlačiti u najfinije žice ili listiće izvanredno male debljine (0.00001 mm) koji propuštaju modro zelenu svjetlost. Za upotrebu **čisto zlato** je premekano pa se **legira** sa srebrom i bakrom. Količina zlata u tim legurama iskazuje se u **karatima**, a čisto zlato ima 24 karata. Drugi način iskazivanja čistoće zlata je u promilima (tisućinkama) mase zlata (čisto zlato je 1000). Ove legure zlata upotrebljavaju se za izradu ukrasa, nakita i novca te u zubarskoj protetici. Zlato se još upotrebljava za bojenje stakla i porculana (zlatno rubinsko staklo), kao sastojak industrijskih lemila i za lemljenje legura. Za **najkvalitetnije električne vodove i kontakte** električnih instrumenata i specijalnih uređaja također se koristi zlato, bilo kao element ili kao nanos na manje plemenitom metalu ili leguri.

2.8.1.2 Kemijska svojstva

Na zraku je apsolutno stabilno i s kisikom se ne spaja ni na kojoj temperaturi. Otapa se samo u jakim oksidansima, tj. u zlatotopci i u tvarima koje daju komplekse, kao npr. otopina kalijevog cijanida. U prirodi se javlja samo jedan stabilni izotop ^{197}Au , a postoji i šesnaest prirodnih radio aktivnih izotopa. Radioaktivni izotop ^{198}Au , s vremenom poluraspada 2.67 dana, koristi se u medicinskoj radioterapiji za tretiranje kancero-genih tumora.

2.9 SREBRO



Srebro je bijel, sjajan, plemenit metal. Danas se glavnina srebra (oko 80%) dobiva pri eksploataciji i metalurškoj preradi olovo – cinkovih i bakrenih ruda, a ostatak iz samorodnog srebra (odnosno njegovih ruda) te iz sekundarnih sirovina. Nakon prerade olovne rude, dobiveno sirovo olovo u kojem ima srebra, prerađuje se tzv. **Parkesovim postupkom** u kojem se rastaljenom sirovom olovu dodaje 1 – 2% cinka i zagrijava malo iznad temperature taljenja cinka ($419.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) uz miješanje. Pri tom se srebro iz olova ekstrahira i prelazi u sloj cinka stvarajući spoj Ag_2Zn_3 koji ispliva na površinu rastaljenog olova u obliku tzv. srebrne pjene. Nakon uklanjanja viška rastaljenog olova i cinka srebrna pjena, koja predstavlja koncentrat srebra, dalje se prerađuje oksidacijskim taljenjem. Pri tom se olovo, kao manje plemenit metal, prvo oksidira u PbO i s površine taline neprestano uklanja. Nakon završene oksidacije, koja se prepoznaje po pojavi sjajnog srebrnog ogledala, ostaje srebro u kojem su otopljeni i drugi plemeniti metali pa se mora pročišćavati elektrolitičkim postupkom. Iz anodnog mulja koji zaostane nakon elektrolitičke rafinacije bakra, srebro se dobiva pročišćavanjem mulja **elektrolitskim postupkom**. Srebro se iz srebrovih ruda dobiva tzv. **cijanidnim postupkom**. U ovom postupku, ruda se usitni do finoće mulja, zatim se desetak dana kroz suspenziju rude u razrijeđenoj vodenoj otopini natrijevog cijanida (0.1 – 0.2%), propuhuje zrak. Pri tome se elementarno srebro ili srebrov sulfid (ili klorid) otapaju i prelaze u otopinu kao cijanidni kompleks. **Sekundarne sirovine** koje se koriste za dobivanje srebra su: otpaci fotografskog materijala, demonetizirani srebrni novac, stari nakit, ukrasni predmeti i posuđe, otpaci legura za lemljenje i dijelovi konstrukcija sa srebrnim lemom, otpadni elektronski uređaji, galvanske prevlake srebra, otopine od galvanizacije srebrom i td. Izbor postupka regeneracije srebra ovisi o udjelu (količini) i vrsti drugih materijala u sirovini i količini srebra. No bez obzira na postupak dobivanja, sirovo srebro uvijek se rafinira elektrolitskim postupkom do čistoće 99.99% Ag.



Slika 2. 9 – 1 Primjeri korištenja srebra

2.9.1 SVOJSTVA SREBRA

OSNOVNA SVOJSTVA SREBRA	
Specifična masa	10.49 kg/dm ³
Atomska težina	107.8682
Redni broj	47
Električna vodljivost	60.6 Sm/mm ²
Temperaturni koef. istezanja	18·10 ⁻⁶ / K
Talište	961.78 °C
Vrelište	2162 °C
Toplinska vodljivost	429 W/mK
Toplina taljenja	104.57 kWs/kg
Temperaturni koef. otpora	3.8·10 ⁻³ / K

Tablica 2.9.1 Osnovna fizikalna i tehnološka svojstva srebra

Srebro i njegove legure dosta se koriste u **elektrotehnici i elektronici** za izradu dobro vodljivih, na koroziju otpornih kontakata te vodljivih nanosa za izradu tiskanih strujnih krugova koji su nezamjenjivi u elektronici.

2.9.1.1 Tehnološka i mehanička svojstva

Srebro je plemenit metal koji se lako može kovati i rastezati u listiće i izvlačiti u žicu (poslije zlata, najlakše se oblikuje i obrađuje plastičnim deformacijama). Od svih metala ima **najvišu električnu i toplinsku vodljivost**, visoku refleksivnost (osobito u infracrvenom i vidljivom dijelu spektra) i veliku otpornost prema koroziji zbog čega se srebro upotrebljava u elektrotehnici i elektronici kao materijal za izradu električnih kontakata i vodiča. Za kontakte koristi se srebro legirano kadmijem i volframom koji daju termičku stabilnost na povišenim temperaturama. Čisto srebro pokazuje sklonost ka rekristalizaciji pri niskim temperaturama, na što znatno utječu primjese. Tako npr., bakar i aluminij povisuju temperaturu rekristalizacije, a željezo ima najveći utjecaj na njezino sniženje.

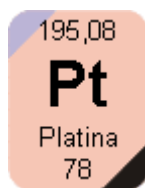
Elementarno srebro upotrebljava se za posrebrivanje manje plemenitih metala ili legura i stakla (za izradu ogledala) i raznih legura sa zlatom i bakrom. Legure srebra upotrebljavaju se za izradu nakita, kovanog novca (kovanica), a u obliku tzv. tvrdih lemova koriste se za lemljenje ugljičnih i legiranih čelika, bakra, nikla, titanija i legura plemenitih metala.

2.9.1.2 Kemijska svojstva

Srebro je kemijski relativno inertno. Pri sobnoj temperaturi na zraku ne oksidira se, ali nakon duljeg vremena potamni od tragova sumporovodika iz zraka. Rastaljeno srebro je luminiscentno i upija znatne količine kisika. Pri hlađenju taline topljivost kisika opada pa se on izdvaja u obliku mjehurića stvarajući male kratere na površini metala. Njegova velika otpornost prema koroziji objašnjava se, u prvom redu, njegovom visokom elektropozitivnošću, a manje stvaranjem zaštitnog sloja na površini metala. Visoka elektropozitivnost srebra omogućila je njegovu primjenu u proizvodnji kemijskih izvora struje visoke specifične energije (srebro – cinkovi i srebro – kadmijevi akumulatori i primarni izvori struje srebrov oksid – cink). Zbog prilično visokog standardnog potencijala srebro se ne otapa u neoksidirajućim kiselinama. Otapa se u dušičnoj i vrućoj koncentriranoj sumpornoj kiselini, a njegovo otapanje u zlatotopci brzo se zaustavlja jer se na površini metala stvara zaštitni sloj srebrovog (I) – klorida. Metalno srebro nije otrovno pa se već dugo vremena (više od 2500 godina) upotrebljava u medicini za pripremu lijekova, u kirurgiji, u zubnoj protetici i konzervativnom liječenju zubi (amalgami srebra). Međutim, njegove topljive soli su otrovne. Metalno srebro, odnosno ioni Ag⁺, imaju baktericidno djelovanje pa se upotrebljava za dezinfekciju i sterilizaciju vode za piće i izradu posuđa za jelo.

Srebro i smjesa srebrovog oksida i cinka koristi se za izradu izuzetno **efikasnih baterija** (obzirom na malu masu i volumen i velik električni kapacitet). Nedostatak im je visoka cijena i kratak vijek, ali su u nekim primjenama nezamjenjive. Velike količine srebra, odnosno njegovih spojeva (posebno AgNO₃ i drugih soli), troše se za izradu fotografskog materijala gdje su do sada nezamjenjivi.

2.10 PLATINA



Platina je sjajan metal sivo-bijele boje i ima plošno centriranu kubičnu kristalnu rešetku. Budući da se platina uvijek nalazi uz ostale platinske metale (Ru, Rh, Pd, Os i Ir) vrlo sličnih kemijskih svojstava, potrebno ju je izdvojiti. Od ostalih platinskih metala izdvaja se najprije otapanjem polazne sirovine u vrućoj zlatotopci tako da se najprije taloži zlato, zatim paladij i na kraju amonijev heksakloroplatinat (IV) čijom termičkom razgradnjom nastaje elementarna platina.

2.10.1 SVOJSTVA PLATINE

OSNOVNA SVOJSTVA PLATINE	
Specifična masa	21.45 kg/dm ³
Atomska težina	195.084
Redni broj	78
Električna vodljivost	9.09 Sm/mm ²
Temperaturni koef. istezanja	9·10 ⁻⁶ / K
Talište	1768.3 °C
Vrelište	3825°C
Toplinska vodljivost	71.6 W/mK
Toplina taljenja	113.64 kWs/kg
Temperaturni koef. otpora	3.1·10 ⁻³ / K

Tablica 2.10.1 Osnovna fizikalna i tehnološka svojstva platine

Platina se koristi za izradu termo – parova, **termootpornika** i elektroda, za izradu raznog laboratorijskog pribora, električnih kontakata, permanentnih magneta (Pt - Co legura) i nakita.

2.10.1.1 Tehnološka i mehanička svojstva

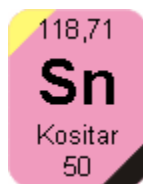
Lako se kuje i izvlači u vrlo tanke žice i listiće. Platina i njene legure koriste se u staklarskoj industriji za dobivanje vrlo čistog stakla. Velike se količine platine koriste u zubarskoj tehnici i za izradu raznih medicinskih pomagala i alata te za laboratorijski pribor (lončići, zdjelice, pincete). Iz nje se izrađuje nakit i služi kao dekorativna prevlaka na predmetima od neplemenitih metala.

2.10.1.1 Kemijska svojstva

Otporna je na djelovanje zraka i vode, a tek zagrijavanjem do temperature oko 450 °C na površini platine nastaje tanki sloj oksida PtO₂. Daljnjim zagrijavanjem polako gubi masu zbog stvaranja hlapljivog platina (VI) – oksida (PtO₃). **Ne otapa se** u kiselinama, lužinama, vodenim otopinama soli i organskim tvarima, ali se **otapa** u zlatotopci i rastaljenim hidroksidima, sulfidima i cijanidima alkalijskih metala. Pri povišenoj temperaturi je otporna na klorovodik, a pri temperaturi oko 500 °C reagira s klorom. Platina je postojana prema sumpornim plinovima, živi, rastaljenim sulfatima, kloridima, karbonatima i rastaljenom staklu. Spužvasta platina snažno apsorbira plinove, naročito kisik, vodik i ugljični dioksid (CO₂) na čemu se i zasniva njezina katalitička aktivnost. Vrlo je sklona stvaranju kompleksnih spojeva i legura s drugim platinskim metalima (Au, Mo, W, Co, Ni i Cu).

Upotrebljava se kao **katalizator** u brojnim reakcijama kao što su npr. reakcije hidrogenacije i dehidrogenacije, izomerizacije, dehidracije, ciklizacije, oksidacije i dobivanja sumporne kiseline kontaktnim postupkom. **Proizvodi** koji se dobivaju katalitičkim djelovanjem platine su brojni, a najvažniji su već spomenute dušična i sumporna kiselina, vodikov peroksid, alkaloidi, razni antibiotici i vitamini, i td. Upotrebljava se i kao katalizator u reakcijama koje služe za povećanje oktanskog broja benzina i različitih drugih goriva. Osim kao katalizator izgaranja, platina se koristi i za uklanjanje otrovnih sastojaka nepotpunog izgaranja u automobilskim ispušnim sustavima u obliku katalitičkih konvertora.

2.11 KOSITAR



Elementarni **kositar** je srebrno-bijel, veoma sjajan metal. Kositar se može dobiti preradom ruda kao primarnih sirovina ili iz upotrijebljenih kositrenih proizvoda kao sekundarnih sirovina (iz kojih se dobiva oko četvrtina sveukupne proizvodnje kositra). Iz **kasiterita** elementarni kositar dobiva se prethodnim usitnjavanjem rude i ispiranjem vodom kako bi se teški kasiterit odvojio od laganije jalovine. Katkad se ruda može koncentrirati flotacijom i magnetskom separacijom (jer je kasiterit nemagnetičan) do sadržaja 30 – 60% Sn. Dobiveni koncentrat žari se da bi se prisutni elementi preveli u okside pri čemu se najveći dio primjesa sumpora, arsena i antimona izdvoji u obliku plinovitih oksida. Nastala žarena masa otapa se 20 – 28%-tnom klorovodičnom kiselinom da bi se uklonile druge metalne nečistoće (Fe, Cu, Bi, Ca, Al). Iz otopine obrađen i koncentrat (koji sadrži 50 – 72% kositra) reducira se ugljikom pri visokoj temperaturi (900 – 1300°C). Za daljnje čišćenje dobiveni **sirovi kositar** se zagrije malo iznad točke taljenja na kosoj podlozi. Rastaljeni kositar otječe po nagnutom dnu podloge, a teže taljive legure kositra sa zaostalim metalima zaostanu na podlozi. Dobiveni sirovi kositar sadrži do 3% Fe, 2% Pb, 0.1% Bi, 0.4% As, 0.1% S, 0.5% Cu i 0.3% Sb pa se dalje pročišćava elektrolizom nakon koje se dobije 99.90 – 99.98%-tni kositar.

Postojan je u dvije stabilne alotropske modifikacije; alfa-kositar (**sivi kositar**) dijamantne strukture koji pri temperaturi 13,2°C prelazi u beta-kositar (**bijeli kositar**) tetragonske strukture. Iznad 161°C beta-kositar prelazi u nestabilnu gama-modifikaciju romboedarske strukture. Prijelaz uobičajene, bijele modifikacije kositra u sivu teče vrlo sporo pri temperaturi 10°C, ali se hlađenjem jako ubrza. Prijelaz se odvija uz znatno smanjenje gustoće (sa 7.28 na 5.75 kg/dm³), a dovoljan je i dodir da se sivi kositar raspadne u sitan prah. Ta se pojava naziva kositrena kuga.

2.11.1 SVOJSTVA KOSITRA

OSNOVNA SVOJSTVA KOSITRA	
Specifična masa	6.99 kg/dm ³
Atomska težina	118.710
Redni broj	50
Električna vodljivost	8.33 Sm/mm ²
Temperaturni koef. istezanja	22·10 ⁻⁶ / K
Talište	231.93 °C
Vrelište	2602 °C
Toplinska vodljivost	66.8 W/mK
Toplina taljenja	0.0592 kW/kg
Temperaturni koef. otpora	4.5·10 ⁻³ / K

Tablica 2.11.1 Osnovna fizikalna i tehnološka svojstva kositra

Određene se količine kositra troše za izradu ambalažnih folija (staniola) i npr. za izradu ukrasa božićnih drvca. No, najveća je **primjena kositra** u proizvodnji bronca - legura bakra i kositra, te drugih specifičnih legura poput Britania-metal, Woodove legure i legura za lemljenje.

2.11.1.1 Tehnološka i mehanička svojstva

Kositar je mekan i plastičan te izvanredno kovan tako da se može valjati u vrlo tanke folije koji se na tržištu nalaze pod nazivom "**staniol**". Dobro se polira do visokog sjaja, a ima visoku refleksivnost. Pri savijanju kositra čuje se karakterističan škripav zvuk koji potječe od međusobnog trljanja kristalića.

Kositar se upotrebljava kao zaštitna prevlaka na brojnim metalima, osobito željezu, odnosno čeliku koji se koristi kao ambalažni materijal za namirnice (bijeli lim za konzerve u prehrambenoj industriji).

Nanošenje kositrene prevlake vrši se elektroplatiniranjem ili jednostavnim uronjavanjem (umakanjem) lima u rastaljeni kositar. Kod elektrolitičkog procesa površina lima treba biti kemijski obrađena. Debljina kositrenog sloja je oko 0.8 – 1.2 mm. Elektrolitički proces je kontinuiran i provodi se u industrijskim automatiziranim postrojenjima. Drugi način prevlačenja provodi se u kadama s rastaljenim kositrom uranjanjem predmeta u talinu kositra. Na površini taline nalazi se ulje koje sprečava oksidaciju i prebrzo hlađenje kod vađenja predmeta.

2.11.1.2 Kemijska svojstva

Pri sobnoj temperaturi postojan je na zraku jer na površini stvara čvrst, tanak sloj oksida, a zagrijavanjem izgara u oksid (SnO_2) dajući intenzivno bijelo svjetlo. Postojan je i u vodi. U razrijeđenim kiselinama otapa se vrlo sporo, a u koncentriranim kiselinama (HNO_3 , HCl) i vrućim lužinama brže. Rastaljen lako otapa brojne metale dajući legure.

2.11.1.3 Legure kositra

Legure za meko lemljenje (Sn - Pb) poznate su još od rimskog doba. Odlikuju se niskim talištem, malom tvrdoćom, relativno malom čvrstoćom na kidanje, a dobro kvase površinu drugih metala (Fe, Cu, Ni, Pb i Zn). Uz kositar sadrže 20 do 97.5% olova, ponekad s dodacima antimona ili srebra, tako da talište legure raste s porastom sadržaja olova. Upotrebljavaju se kao lemnj materijal u elektronici, elektrotehnici i strojogradnji.

Legure kositra, bakra i nikla (Sn-Cu-Ni) poznate su kao spinodalni materijali koji imaju posebno svojstvo ojačavanja s vremenom starenja. Starenje se može provesti na umjetan način čime legure dobiju visoku čvrstoću na vlak i žilavost, antikorozivne su i pokazuju relaksaciju nakon naprezanja. Zamjenjuju neke bronce, a koriste se kao elektrotehnički materijali.

Britannia metal (bijeli metal) legura je kositra, bakra i antimona. Upotrebljava se u automobilske industriji i brodogradnji te kao metal za tiskarski slog i pisaće strojeve.



Slika 2.11 – 1 Primjeri korištenja kositra

2.12 NIKAL



Nikal je srebrnasto-bijel, sjajan, tvrd, plastičan, žilav i teško taljiv metal. Sulfidne rude bakra i nikla vrlo su sličnog sastava. Postupak koncentriranja identičan je kao i kod dobivanja bakra do dobivanja nikalnog kamena koji sadrži 48% Ni, 27% Cu, 21% S, < 1% Fe, a ostatak je kobalt i plemeniti metali. Vrlo sporim hlađenjem nikalnog kamena razdvajaju se bakrovi od niklovih sulfida. Daljnja obrada niklovog sulfida (sastava približno Ni_3S_2) odvija se **Mondovim karbonilnim postupkom** redukcije koksom (pri čemu se dobije **sirovi nikal**) ili elektrolizom sulfida.

Dobiveni prah se zagrijava u tornjevima do temperature 80°C. Kroz prah se propušta ugljični monoksid (CO) i pri tom nastaje lako hlapljivi niklov tetrakarbonil ($\text{Ni}(\text{CO})_4$) koji se uvodi u drugi toranj s kuglicama čistog nikla zagrijanim do 180°C. Tu se $\text{Ni}(\text{CO})_4$ raspada, a nikal se u obliku finog praha izlučuje na postojećim kuglicama. Oslobođeni CO vraća se ponovo u proces. Nikal dobiven ovim postupkom vrlo je čist, koncentracije 99.95%. U elektrolitičkom postupku prethodno dobiveni rastaljeni niklov sulfid se izlije u blokove koji služe kao anode. Elektrolizom se oksidiraju nikal i sumpor (prisutni plemeniti metali se ne oksidiraju već padaju na dno kao anodni mulj), a na katodi se izlučuje elementarni nikal. U anodnom mulju nalaze se plemeniti metali kao zlato, srebro, platina, iridij, rodij, paladij, rutenij i kobalt. Ovi se metali mogu izdvojiti u elementarnom stanju naknadnim procesima rafinacije koji su opisani kod tih elemenata.

2.12.1 SVOJSTVA NIKLA

OSNOVNA SVOJSTVA NIKLA	
Specifična masa	8.908 kg/dm ³
Atomska težina	58.6934
Redni broj	28
Električna vodljivost	14.43 Sm/mm ²
Temperaturni koef. istezanja	$13.4 \cdot 10^{-6} / \text{K}$
Talište	1455 °C
Vrelište	2730 °C
Toplinska vodljivost	90.9 W/mK
Toplina taljenja	297.82 kWs/kg
Temperaturni koef. otpora	$6 \cdot 10^{-3} / \text{K}$

Tablica 2.12.1 Osnovna fizikalna i tehnološka svojstva nikla

U elektrotehnici se koristi nikal što veće čistoće 99.5 %. Koristi se kao komponenta u velikom broju magnetskih i vodljivih legura. Također se koristi za elektrolitičko presvlačenje predmeta od željeza i mesinga. Primjena je i u izradi otpornih grijača.

2.12.1.1 Tehnološka i mehanička svojstva

Nikal se može polirati do visokog sjaja i obrađivati svim postupcima plastične deformacije u tanke folije, cijevi i trake. Neprerađeni, sirovi nikal kao komercijalni proizvod pojavljuje se na tržištu u obliku zrnaca, elektrolitičkog nikla, feronikla, finog praha, ingota i prešanih briketa. Čistoća mu je oko 99%, a glavne primjese su bakar (0.25%) i ugljik (0.15%). U hladnom stanju lako se mehanički obrađuje. Tako se od nikla se mogu izraditi složeni oblici, različitih dimenzija, sposobni da podnesu velika naprezanja.

2.12.1.2 Kemijska svojstva

Pri sobnoj temperaturi slabo je feromagnetičan i to svojstvo zadržava do 340 °C. Prilično je otporan prema koroziji u raznim sredinama. Pri sobnoj temperaturi otporan je na djelovanje atmosferskih plinova, vode, halogenih elemenata i sumpora (na zraku tamni vrlo polako), ali zagrijan reagira kako s halogenim elementima, sumporom i fosforom, tako i s arsenom, selenijem i drugim. S kisikom daje niklov(II)-oksid, a zagrijan do crvenog žara s vodenom parom daje niklov(I)-oksid uz oslobađanje vodika. Praškasti je nikal piroforan i zapali se zagrijavanjem na zraku. Lako upija veće količine plinova (kao CO, H₂). Vrlo je otporan prema lužinama sve do temperature od 500°C. U neoksidativnim kiselinama otapa se vrlo sporo, dok ga razrijeđene oksidirajuće kiseline otapaju vrlo brzo. Koncentrirana dušična kiselina pasivizira površinu, ali dugotrajnijim djelovanjem ipak dolazi do postupnog otapanja. U reakcijama nikla s kiselinama stvaraju se soli nikla(II) koje su zelene boje kada su hidratizirane, a isto tako i njihove otopine.

Zbog velike **otpornosti na koroziju** nikal se upotrebljava za izradu opreme za prehrambenu i kemijsku industriju, konstrukcijskih dijelova u brodogradnji, metalnog kovanog novca, posuda te za prekrivanje površina mnogih metala elektrolitičkim niklovanjem (aluminija, magnezija i željeza, odnosno čelika). Upotrebljava se u proizvodnji alkalnih željezo-nikalnih i nikal-kadmijevih akumulatora, a značajna mu je primjena kao katalizatora u kemijskoj industriji u reakcijama hidrogenacije. Među najpoznatijim nikalnim katalizatorima je Raney nikal, skeletni katalizator.

2.12.1.3 Legure nikla

Nikal se najviše **upotrebljava kao legirajući metal** pri proizvodnji nehrđajućih i vatrootpornih čelika, te za dobivanje mnogobrojnih binarnih i višekomponentnih legura, koje se odlikuju antikorozivnim, vatrootpornim, električnim, termoelektričnim i magnetskim svojstvima.

Feronikal je legura željeza s dodatkom 24 - 48% nikla koja se koristi poglavito u proizvodnji **nehrđajućih čelika**. Za potrebe proizvodnje navedenih i drugih čelika s visokim sadržajem nikla troši se gotovo polovica svjetske proizvodnje nikla. U nehrđajućim čelicima nikal se dodaje kao feronikal tako da navedeni čelici sadrže 3.5 do 22% nikla. Redovito se dodaje i 16 - 26% kroma. U strukturi čelika nikal stabilizira austenitnu strukturu i poboljšava kovnost čelika. Uz krom doprinosi otpornosti na koroziju pri povišenim temperaturama. Dodavanjem nikla do koncentracije 9% progresivno se povećava čvrstoća, tvrdoća i žilavost čelika. Također se priređuje legura nikla samo s kromom (80% Ni i 20% Cr) pod nazivom Nikrom legura.

Najvažnije legure u kojima nikal sudjeluje s dominantnim ili relativno visokim udjelom:

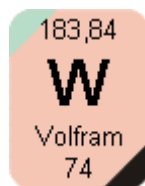
- **Duranikal 301** (93.9% Ni, 4.5% Al, 0.5% Ti, 0.15% C, 0.15% Fe, 0.05% Cu) legura je nikla s aluminijem.
- **Monel legure** (oko 65% Ni, oko 32% Cu, 1,35% Fe, 0.12% C) visoke su čvrstoće i antikorozivne na povišenim temperaturama. Koriste se u procesnoj industriji, brodogradnji i u proizvodnji kućanskih uređaja i opreme.
- **Magnetske legure** – Permalloy (78.5% Ni, 21.5% Fe); Hipernik (50% Ni, 50% Fe) i Perminvar (45% Ni, 30% Fe, 25% Co), Al-Ni-Co (ALNICO) legure (14% Ni, 24% Co, 9% Al, 3% Cu i 50% Fe), (22-24% Ni, 11-14% Al, a ostalo je Fe) i slični sastavi tipični su predstavnici magnetskih legura.
- **Konstantan** (45% Ni, 55% Cu) legura je velikog električnog otpora koji se gotovo ne mijenja s temperaturom pa se koristi u elektrotehnici za žičane otpornike i termopar elemente.
- **Nicrom legure** s osnovnim sastavom od 80% Ni i 20% Cr s malim dodacima silicija koriste se za izradu otpornih žica raznih grijaćih tijela i pribora za domaćinstvo (bijeli metal).
- **Calorit** (65% Ni, 8% Mn, 12% Cr, 15% Fe) također se koriste za izradu grijaćih tijela.
- **Cromel** (35 – 60% Ni, 16 – 19% Cr, a ostalo je Fe) također ima veliki električni otpor i ne korodira pa se upotrebljava za izradu otpornika i termoelemenata.
- **Elinvar** (34% Ni, 57% Fe, 4% Cr, 2% W) ima veoma mali koeficijent rastezanja pa se upotrebljava za izradu opruga mehaničkih satova i za precizne instrumente.
- **Invar** (36% Ni i 64% Fe) ima također mali temperaturni koeficijent rastezanja pa se upotrebljava u radio-tehnici, mjernoj tehnici za izradu termostata i sl.
- **Hastelloy** (45% Ni, 22% Cr i Fe, 9% Mo s malim dodacima Co i W) legure su izuzetno otporne na djelovanje sumporne, klorovodične i drugih kiselina pa se primjenjuju u kemijskoj procesnoj tehnici koja koristi navedene kiseline.
- **Incoloy** (oko 35% Ni, oko 20% Cr, oko 45% Fe, 0.75% Cu, 0.10% C) visoko su vatrootporne legure koje se koriste za izradu posuda za taljenje i dijelova visokotemperaturnih peći.
- **Metalno-keramički kompoziti** (MCC) sadrže 30 – 70% Ni, a ostatak su karbidi titanija, volframa i kroma raspršeni u obliku sitnih kristala ili viskera u kristalnoj rešetci nikla. Bitno povećavaju čvrstoću, žilavost i vatrootpornost nikla. Upotrebljavaju se za izradu dijelova izloženih velikim dinamičkim naprezanjima pri visokim temperaturama (npr. u plinskim turbinama i reaktorima), kao konstrukcijski materijali u kemijskoj industriji, za izradu rotacijskih dijelova crpki itd.
- **Platin** (48% Ni i 52% Fe) legura je koja ima koeficijent termičkog širenja jednak staklu pa se i koristi za spojeve metala sa staklom i kao zamjena za platinu u elektroindustriji.

Istraživanja materijala za američku vojnu industriju su dovela do otkrića izuzetne legure nikla i titanija, pod nazivom nitinol, koja ima svojstvo pamćenja prethodnog oblika (koji je imala ispod određene kritične temperature). Predviđena je za izradu specijalnih obujmica i učvršćivača koji bi se pothlađeni lako montirali, a postigavši ponovno svoju radnu temperaturu (iznad kritičnu) skupili bi se i učvrstili predviđeni(e) element(e).



Slika 2.12 – 1 Primjeri korištenja nikla

2.13 VOLFRAM



Volfram je tvrd, sjajan, srebrno-bijeli metal. Čisti metal volfram može se dobiti redukcijom volframovog (VI) – oksida (WO_3) vodikom. Za dobivanje WO_3 koriste se volframove rude **ferberit** ili **šelit** koje se najprije raščine natrijevim karbonatom uz prisutnost zraka. Nastali **natrijev volframat** otopi se u vodi i zakiseli pri čemu se istaloži netopljiva ortovolframatna kiselina (H_2WO_4) koja se zagrijava da bi se dobio čisti WO_3 . Redukcija oksida vodikom odvija se pri temperaturi 1200 °C, a nastaje elementarni volfram u obliku metalnog praha. Budući da se dosta volframa upotrebljava u metalurgiji kao **ferovolfram** koji se legira s čelicima (velik broj različitih alatnih čelika), volframove rude se direktno prerađuju u ferovolframat. Pri tom se ruda ferberit reducira s aluminijem, a šelit i volframit se reduciraju koksom u električnim pećima uz dodatak odgovarajućih količina željezovog (III) – oksida.

2.13.1 SVOJSTVA VOLFRAMA

OSNOVNA SVOJSTVA VOLFRAMA	
Specifična masa	19.25 kg/dm ³
Atomska težina	183.84
Redni broj	74
Električna vodljivost	18.18 Sm/mm ²
Temperaturni koef. istezanja	4.5·10 ⁻⁶ / K
Talište	3422 °C
Vrelište	5930 °C
Toplinska vodljivost	173 W/mK
Toplina taljenja	192 kWs/kg
Temperaturni koef. otpora	4.8·10 ⁻³ / K

Tablica 2.13.1 Osnovna fizikalna i tehnološka svojstva volframa

Važna je **upotreba volframa** za žarne niti električnih žarulja i katoda elektronskih cijevi.

2.13.1.1 Tehnološka i mehanička svojstva

Volfram je tvrd metal s najvišim talištem (3422 °C), najnižim tlakom vlastitih para i najvećom čvrstoćom na rastezanje (sve do temperature 1650 °C) od svih metala. Javlja se u dvije alotropske modifikacije: **alfa-volfram** prostorno centrirane kubične strukture i **beta-volfram** plošno centrirane kubične strukture. Vrlo čist metal, iako tvrd, dobro se obrađuje klasičnim metodama, ali ako sadrži imalo primjesa, postaje vrlo krhak. On se stoga bolje i češće obrađuje metodama metalurgije praha.

Žarne niti se proizvode ili iz štapića volframa ciklusima: kovanje - zagrijavanje - hlađenje, dok ne postane rastezljiv metal da se može izvlačiti u tanke niti promjera oko 0.01 mm. Druga metoda je propuštanje niti napravljenih od smjese praha volframa, 1 – 4% ThO₂ i veziva kroz peći zagrijane na temperaturu 2200 – 2400°C. U tom prolazu praškasta smjesa se sinterira, a ThO₂ pospješuje proces sinteriranja i kontrolira rast zrna, a time i mikrokristalnu morfologiju. Volfram za žarne niti mora imati izdužene mikrokristale. Ovako dobivene volframove niti upotrebljavaju se za proizvodnju žarnih niti u elektronskim i katodnim cijevima te žaruljama.

2.13.1.2 Kemijska svojstva

Pri sobnoj temperaturi na zraku je postojan, a zagrijan do crvenog žara izgara dajući volframov (VI) – oksid. Otporan je na djelovanje većine kiselina tako da ga fluorovodična kiselina i zlatotopka nagrizaju vrlo polagano, ali se brzo otapa u smjesi dušične i fluorovodične kiseline. Lako i brzo otapa se u talini NaOH + NaNO₃, a taljenjem s lužinama daje volframate.

Prirodni volfram je smjesa od četiri stabilna izotopa 180W, 182W, 183W i 184W, a poznato je još dvanaest prirodnih radioaktivnih izotopa.

2.13.1.3 Legure volframa

Iz volframa se izrađuje **ferovolfram**, legura koja se upotrebljava u metalurgiji za dobivanje čvrstih volframovih čelika koji se odlikuju izuzetnom antikorozijsnošću na visokim temperaturama. Koriste se za izradu oplata visokotemperaturnih peći, električnih grijača i brojnih raketnih elemenata, posebno mlaznica u svemirskoj tehnologiji. Poznati čelici za brzorezne alate, Haselloy i Stellite, legirani su volframom. **Volframov karbid**, W₂C, jedna je od najtvrdih tvari i glavnih proizvoda na bazi volframa, a koristi se za izradu brzoreznih alata ili kao nanos na alatima iz tvrdog sinter-metala te za alate koji se upotrebljavaju u naftnoj industriji i rudarstvu - za najkritičnije dijelove (vrhove bušilica i rudarskih drobilica). Karbid ima tvrdoću 9.5 na Mohsovoj skali od 10 (za dijamant) i talište pri 2860 °C.

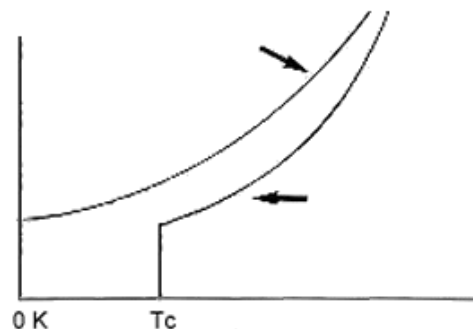
Volfram se legira i s drugim metalima kao što su srebro, bakar i nikal. Ove se legure koriste za električne kontakte, štitove za ionizirajuća zračenja, izradu teških strojnih elemenata (žiroskopskih rotora, zrakoplovnih protuutega i sl.). Legure s kobaltom i kromom također se koriste za izradu raznih alata i raznih ekstruzijskih elemenata.



Slika 2.13 – 1 Primjeri korištenja volframa

2.14. SUPRAVODLJIVI MATERIJALI

Supravodljivost je fenomen iščezavanja električnog otpora materijala uslijed hlađenja materijala do određene temperature. Temperaturu pri kojoj materijal postaje supravodljiv nazivamo kritičnom temperaturom i označavamo s T_c . Ovu pojavu prvi je uočio Kamerlingh – Onnes 1911. godine mjereći električni otpor žive za koju je $T_c = 4.2 \text{ K}$.



Slika 2. 14 – 1 Ovisnost električnog otpora kod vodiča i supravodiča

Supravodljivost ovisi o tri parametra: kritične temperature (T_c), kritičnog magnetskog polja (H_c) i kritičnoj gustoći struje (J_c). Ukoliko su svi parametri ispod kritičnih vrijednosti materijal će biti u supravodljivom stanju u suprotnom dolazi do razaranja supravodljivosti.

Postoji više kriterija za klasificiranje supravodiča:

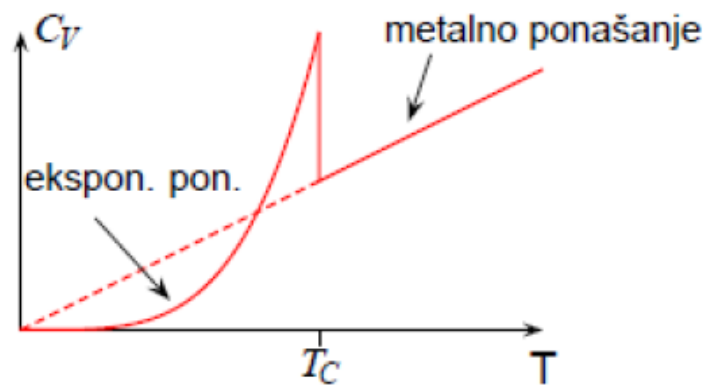
- Prema fizičkim svojstvima: tip I i tip II
- Teoriji koja ih objašnjava: konvencionalni (ukoliko za njih vrijedi BCS teorija ili njena preinaka) i nekonvencionalni
- Prema kritičnoj temperaturi: visokotemperaturni ($T_c > 77 \text{ K}$) i niskotemperaturni
- Prema materijalu: kemijski elementi, slitine, keramike i organski supravodiči

1A																	0								
1	1																	2							
	H																	He							
	IIA																	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA			
2	3	4																	5	6	7	8	9	10	
	Li	Be																	B	C	N	O	F	Ne	
3	11	12																	13	14	15	16	17	18	
	Na	Mg	IIIB	IVB	VB	supravodljivi elementi.bmp										VIB	VIIA	IB	IIIB	Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36							
	K	Ca	Sc	Ti	Y	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr							
5	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54							
	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe							
6	55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86							
	Cs	Ba	*La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn							
7	87	88	89	104	105	106	107	108	109	110	111	112													
	Fr	Ra	+Ac	Rf	Ha	106	107	108	109	110	111	112													
																			SUPERCONDUCTORS.ORG						

Slika 2.14 – 2 Poznati supravodljivi elementi

2.14.1 ENERGETSKI PROCIJEP

Kod normalnih materijala elektronski doprinos toplinskom kapacitetu je proporcionalan temperaturi. Temperaturna ovisnost o toplinskom kapacitetu supravodiča pokazuje drugačija svojstva. Na temperaturi supravodljivog prijelaza toplinski kapacitet naglo raste a daljim snižavanjem temperature eksponencijalno pada prema nuli.

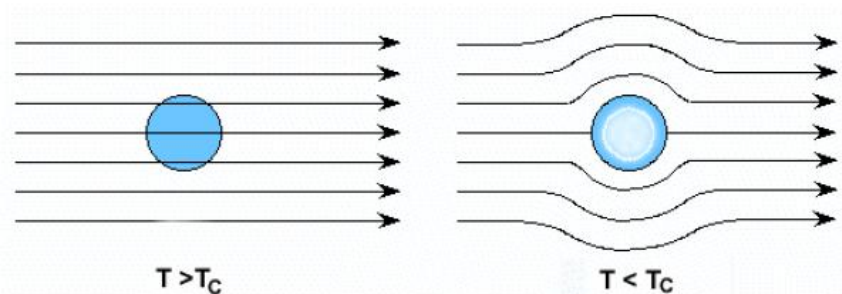


Slika 2.14.1 – 1 Ovisnost toplinskog kapaciteta o temperaturi u supravodiču

Iz krivulje ovisnosti toplinskog kapaciteta se vidi da elektroni u supravodiču mogu pobuditi jedino dovođenjem dovoljne energije, odnosno pobuđena stanja supravodiča odvojena su od osnovnog stanja energijskim procijepom. Hipoteza o postojanju energijskog procijepa u supravodičima potvrđena je eksperimentalno mjerenjem apsorpcije u dalekom infracrvenom dijelu spektra. Apsorbiranje upadnog fotona od strane elektrona će se dogoditi tek onda kada elektron s dodatkom njegove energije može prijeći preko energijskog procijepa. Što za frekvenciju praga apsorpcije od $\omega = 10^{12}$ Hz daje za širinu energijskog procijepa 10^{-3} eV. Takav uzak procijep elektroni će prelaziti već i pri malim temperaturama.

2.14.2 MEISSNEROV EFEKT

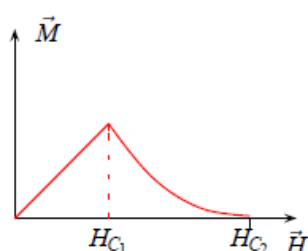
Ponašanje supravodljivog uzorka u vanjskom magnetskom polju su ispitivali Meissner i Ochsenfeld 1933. godine. Otkrili su da uzorak u supravodljivom stanju istiskuje magnetske silnice iz unutrašnjosti, dakle magnetska indukcija u uzorku jednaka je nuli.



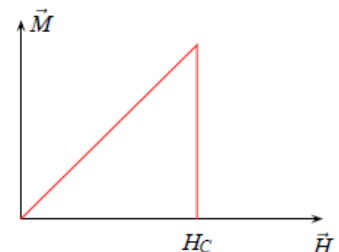
Slika 2.14.2 – 1 Magnetske silnice u supravodiču ispod i iznad kritične temperature

Magnetizacija u unutrašnjosti uzorka djeluje suprotno od smjera vanjskog polja što karakterizira dijamagnete. Dijamagnetski efekt je toliko jak u supravodičima da poništava djelovanje vanjskog polja pa supravodiče nazivamo idealnim dijamagnetima.

Proporcionalnost između vanjskog polja i magnetizacije u supravodiču postoji do kritičnog magnetskog polja H_c jer tada supravodič prelazi u normalno stanje. Supravodiče sa takvom otpornošću o vanjskom polju nazivamo **supravodičima prve vrste**.



Slika 2.14.2 – 2 Supravodič prve vrste



Supravodiče druge vrste karakteriziraju dva kritična polja: donje kritično polje H_{c1} i gornje kritično polje H_{c2} . Ispod donjeg kritičnog polja uzorak se nalazi u supravodljivom stanju, između donjeg i gornjeg u miješanom, a iznad gornjeg kritičnog polja u normalnom stanju.

Slika 2.14.2 – 3 Supravodič druge vrste

2.14.3 BCS TEORIJA

BCS teorija je dobila naziv prema početnim slovima američkih fizičara koji su je razradili – Bardeen, Cooper i Schrieffer. Na dinamičku interakciju dvaju elektrona koji se gibaju vodičem utječe kulonsko odbijanje i prisutnost pozitivnih iona. Uzmimo dva elektrona koji se gibaju vodičem. Prvi elektron prema Coulombovu zakonu privlači pozitivne ione koji se zbog svoje mase sporije gibaju u odnosu na elektrone. Na taj način dolazi do povećanja koncentracije pozitivnih naboja duž staze kojom je prošao prvi elektron. Taj poremećaj ostaje još neko vrijeme. Područje povećane ionske koncentracije privlači drugi elektron i on se giba prema trajektoriji prvog elektrona. Na taj način u vodičima se inducira i dodatno elektronsko privlačenje izazvano premještanjem pozitivnih iona.

Duž trajektorije elektrona se mijenja stupanj pobuđenosti kristalne rešetke. Harmonički oscilatori kojima opisujemo titranje prelaze pod utjecajem prolaska elektrona na nova kvantna stanja a svaki takav prijelaz je popraćen promjenom broja fonona. Kako elektroni u vodiču mogu stvarati i apsorbirati fonone, točnijom kvantnomehaničkom analizom se pokazuje da privlačenje elektrona je uzrokovano izmjenom fonona. Efektivno privlačenje elektrona postoji kada fononski inducirano privlačenje prevlada kulonsko odbijanje.

Promjena energije elektrona zbog interakcije s fononom je mala jer su tipične energije elektrona puno veće od energije fonona. Iz Paulijeva principa slijedi da će međudjelovati samo elektroni čije su energije približno jednake Fermijevoj energiji E_F . Najveća vjerojatnost sparivanja elektrona je kada su im valni vektori i spinovi suprotni. Takva dva elektrona nazivamo Cooperovim parom. Cooperove parove karakteriziraju kvantna stanja $+k$ i $-k$, rezultatni valni vektor je nula kao i rezultatni spin. Posljedica toga je da za njih vrijedi Bose – Einsteinova raspodjela, odnosno, za takve čestice ne vrijedi Paulijev princip pa se svi mogu nalaziti u istom kvantnom stanju.

Povisivanjem energije za iznos koji je jednak energiji energijskog procijepa dolazi do cijepanja Cooperovog para na dva individualna elektrona. Jakost veze u Cooperovom paru određuje omjer T/T_c . Što je manji taj omjer, širi je energijski procijep te su elektroni jače vezani u Cooperovom paru. Energijski procijep se sužava kako se T približava T_c tj. kada ide u nulu.

2.14.4 VISOKOTEMPERATUNI SUPRAVODIČI

Visokotemperaturnim supravodičima smatramo supravodiče čija je temperatura supravodljivog prijelaza iznad 30 K. Prvi visokotemperaturni supravodič otkrili su Karl Müller i Johannes Bednorz 1986. godine. Izraz visokotemperaturni supravodič dugo se koristio kao sinonim za kuprate sve do otkrića supravodiča sa spojevima željeza (2008. godina). Najistraživaniji visokotemperaturni supravodiči danas su barij bakar oksid (YBCO) i bizmut stroncij bakar oksid (BSCCO).

U kontekstu visokotemperaturne supravodljivosti „visoka temperatura“ zadovoljava sljedeće uvijete:

- To je temperatura iznad 30 K koja je povijesno uzeta kao gornja granica koju je teoretski predviđala BCS teorija
- Omjer T_c/T_F je veći nego u konvencijalnim supravodičima
- Temperatura iznad točke ključanja tekućeg dušika (77 K)

Visokotemperaturni materijali imaju veću tehnološku primjenu zbog više temperature prijelaza i veće otpornosti supravodljivosti na magnetska polja. Zbog svoje otpornosti na magnetska polja koriste se u izradi magneta unatoč svojoj krhkoj keramičkoj prirodi. Eksperimentalna i teoretska istraživanja svojstava ovakvih materijala provode se više od dvadeset godina i unatoč otkrića mnogih svojstava ni danas ne postoji općeprihvaćena teorija koja u potpunosti objašnjava sva popratna svojstva tog fenomena.

2.14.5 KUPRATI

Kupratnim supravodičima općenito smatramo kvazi – dvodimenzijalne spojeve čija svojstva određuju elektroni koji se gibaju po slabo vezanim ravninama bakar oksida. Prostor između slojeva bakar oksida najčešće popunjavaju Y, Ba, Sr, Bi, La, Nd ili drugi elementi koji stabiliziraju spoj i imaju ulogu donora. Ravnine ne moraju biti kristalografski ekvivalentne, pa osnovna ćelija može imati jednu, dvije ili više ravnina.

2.14.6 PRIMJENA SUPRAVODIČA

Moguća primjena supravodljivih vodiča su:

- prijenos električne energije bez gubitaka
- izgradnja jakih magneta (MRI, akceleratori, fuzijski reaktori i detektori)
- transport (lebdeći promet)
- izrada električnih strojeva (smanjenje dimenzija strojeva istih snaga)
- komunikacijske i memorijske tehnologije
- mjerna tehnika i td.

2.15. PITANJA ZA PROVJERU ZNANJA

1. Kako možemo sve podijeliti vodljive materijale?
2. Koja su osnovna svojstva vodiča prve vrste?
3. Što je bakar?
4. Ukratko pojasnite kako se dobiva bakar.
5. Koja su tehnološka i mehanička svojstva bakra?
6. Koja su kemijska svojstva bakra?
7. Gdje se sve koristi bakar?
8. Kako se dobivaju legure bakra?
9. Gdje se koristi visokoprovodljivi elektrolitički bakar?
10. Što je bronca?
11. Koja je primjena bronce?
12. Koje su sve legure bronce?
13. Kako se dobiva kositrena bronca?
14. Što je mjed?
15. Gdje se sve koristi mjed?
16. Što je aluminij?
17. Ukratko pojasnite kako se dobiva aluminij.
18. Koja su tehnološka i mehanička svojstva aluminija?
19. Koja su kemijska svojstva aluminija?
20. Gdje se sve koristi aluminij?
21. Što je željezo?
22. Ukratko pojasnite kako se dobiva željezo.
23. Koja su tehnološka i mehanička svojstva željezo?
24. Koja su kemijska svojstva željezo?
25. Gdje se sve koristi željezo?
26. Koje su sve vrste čelika?
27. Što je olovo?
28. Ukratko pojasnite kako se dobiva olovo.
29. Koja su tehnološka i mehanička svojstva olova?
30. Koja su kemijska svojstva olova?
31. Gdje se sve koristi olovo?
32. Koje su sve legure olova?
33. Što je cink?
34. Ukratko pojasnite kako se dobiva cink.
35. Koja su tehnološka i mehanička svojstva cinka?
36. Koja su kemijska svojstva cinka?
37. Gdje se sve koristi cink?
38. Što je živa?
39. Ukratko pojasnite kako se dobiva živa.
40. Koja su tehnološka i mehanička svojstva žive?
41. Koja su kemijska svojstva žive?
42. Gdje se sve koristi živa?
43. Što je zlato?
44. Ukratko pojasnite kako se dobiva zlato.
45. Koja su tehnološka i mehanička svojstva zlata?
46. Koja su kemijska svojstva zlata?
47. Gdje se sve koristi zlato?
48. Što je srebro?
49. Ukratko pojasnite kako se dobiva srebro.
50. Koja su tehnološka i mehanička svojstva srebra?
51. Koja su kemijska svojstva srebra?
52. Gdje se sve koristi srebro?

53. Što je platina?
54. Ukratko pojasnite kako se dobiva platina.
55. Koja su tehnološka i mehanička svojstva platine?
56. Koja su kemijska svojstva platine?
57. Gdje se sve koristi platina?
58. Što je kositar?
59. Ukratko pojasnite kako se dobiva kositar.
60. Koja su tehnološka i mehanička svojstva kositra?
61. Koja su kemijska svojstva kositra?
62. Gdje se sve koristi kositar?
63. Koje su sve legure kositra?
64. Što je nikal?
65. Ukratko pojasnite kako se dobiva nikal.
66. Koja su tehnološka i mehanička svojstva nikla?
67. Koja su kemijska svojstva nikla?
68. Gdje se sve koristi nikal?
69. Koje su sve legure nikla?
70. Što je volfram?
71. Ukratko pojasnite kako se dobiva volfram.
72. Koja su tehnološka i mehanička svojstva volframa?
73. Koja su kemijska svojstva volframa?
74. Gdje se sve koristi volfram?
75. Koje su sve legure volframa?
76. Što su supravodljivi materijali?
77. Koji su parametri supravodljivosti?
78. Navedite neke materijale koji se ponašaju kao supravodljivi materijali pri normalnom tlaku.
79. Navedite neke materijale koji se ponašaju kao supravodljivi materijali pri visokom tlaku.
80. Kako nastaju supravodiči prve vrste?
81. Kako nastaju supravodiči druge vrste?
82. Definirajte što su visokotemperaturni supravodiči.
83. Koje su moguće primjene supravodiča?

3. VODOVI

Prijenos električne energije se izvodi pomoću vodova. Električni vod čini vodič ili skup vodiča koji su međusobno izolirani, izolirani i od drugih konstrukcijskih dijelova, a također i prema zemlji. Električni vod može biti načinjen od golih vodiča (bez međusobne izolacije), a koriste se za izgradnju nadzemnih ili zračnih vodova. Stoga vodove možemo podijeliti prema:

- **konstrukciji** – nadzemni (goli ili izolirani), izolirani, kabeli
- **namjeni** – za prijenos snage, informacije
- **električnim karakteristikama** – homogeni i nehomogeni vodovi

3.1. VODOVI PREMA KONSTRUKCIJI

3.1.1 NADZEMNI VODOVI

Nadzemni vodovi pomoću konstrukcijskih dijelova (stupova, izolatora i nosača) prenose električnu energiju nad zemljom. Osnovni dijelovi nadzemnog voda su:

- temelji i stup,
- fazni i zaštitni vodiči,
- izolatori,
- uzemljivač,
- spojni, ovjesni i zaštitni pribor.

U ove vodove ubrajamo:

- **kontaktni vodovi za električnu vuču** – velika čvrstoća, tvrdoća, otpornost na habanje i na koroziju
- **vodovi distributivnih mreža** – niskonaponske (do 1 kV), visokonaponske (iznad 1 kV)
- **vodovi za dalekovode (alučel)** – uže s jezgrom od čelične žice oko koje se uplete aluminijska žica – čelik nosi a aluminij vodi

3.1.2 IZOLIRANI VODOVI

Najčešće se koriste u električnim instalacijama i za priključke nepokretnih trošila. Izrađuju se kao jednožilni i višezilni. Osnovni dijelovi izoliranih vodova su:

- **vodič** – najčešće se izrađuje od bakra ili aluminija
- **izolacija i plašt** – izrađuju se od polivinil klorida (PVC), poliuretana (PUR) i drugih termoplasta
- **ispuna** – najčešće je gumena ili termoplastična masa

Nemaju svi električni vodovi sve navedene komponente.

Radni napon im je do 500 V, dok strujno opterećenje vodova ovisi o konstrukciji, namjeni i načinu polaganja voda. Pri tome su vodovi podijeljeni u tri grupe:

1. **grupa**: vodovi položeni u cijevi, uključivši i zaštitne vodiče, npr. P, P/F i td.
2. **grupa**: instalacijski vodovi koji nisu položeni u cijevi te višezilni priključni savitljivi vodovi npr. PP, PP/R i td.
3. **grupa**: jednožilni vodovi položeni slobodno u zraku i jednožilni spojni vodovi u razvodnom ormaru.

Boje izolacije vodova kojom se definira namjena voda u strujnom krugu:

- zeleno-žuta (uzemljenje)
- svijetloplava (neutralni vod ili fazni)
- crna i smeđa (faza)

Označavanje izoliranih vodova izvodi se slovima i brojevima:

- Prvo slovo označava izolaciju i plašt (P – plastika, G – guma, O – olovo, T – tekstil, Si – silikonska guma i td.)
- Kosa crta i slovo iza nje označava konstrukciju (/ J – pojačana izolacija, / L – laka izvedba izolacije, / R – razdvojeni vodovi, / F – otporan na toplinu, / A – otporan na atmosferske utjecaje, ZG / S – vod za zavarivanje i td.)
- Brojevi označavaju broj žila i presjek vodova

Neki primjeri označavanja izoliranih vodova:

- **GG/L 2x0,75** → laki gumom izolirani, sa gumenim plaštom, savitljiv vod, dvožilni sa presjekom svakog vodiča 0,75 mm²
- **GT 3x1,5** → savitljivi priključni vod s gumenom izolacijom i tekstilnim plaštom, trožilni, presjek svakog vodiča 1,5mm²
- **PP/J 7x2,5** → višezilni instalacijski vod s pojačanom izolacijom termoplastičnim plaštom, 7 žila, svaka presjeka 2,5mm²
- **PP/R 3x2,5; 380V** → instalacijski vod s razmaknutim vodičima, izolacija i plašt od PVC-a, vodiča, svaki 2,5 mm², radni napon 380 V

3.1.2.1 H05V - K

Konstrukcija: nepokositrena finožičana bakrena uzica klase 5 izolirana PVC smjesom u nekoj od standardnih boja.

Primjena: zaštitne instalacije u električnim uređajima i ožičenje u rasvjetnim tijelima.



Presjek [mm ²]	Konstr. vodiča [n x mm]	Deblj. izolacije [mm]	Vanjski promjer [mm]
0,5	15 x 0,20	0,6	2,4
0,75	22 x 0,20	0,6	2,6
1,0	30 x 0,20	0,6	2,7

Tablica 3.1.2.1 – 1 Karakteristike H05V – K izolacijskog voda

3.1.2.2 P/F

Konstrukcija: nepokositrena finožičana bakrena uzica klase 5 izolirana PVC smjesom u nekoj od standardnih boja. Izrađuje se presjeka od 0.5 do 240 mm².

Primjena: u suhim prostorijama na mjestima gdje je potrebna naročita savitljivost. Za instalacije u zgradama, polažu se u instalacijske cijevi.



Presjek [mm ²]	Konstr. vodiča [n x mm]	Deblj. izolacije [mm]	Vanjski promjer [mm]
1,5	28 x 0,25	0,7	3,1
2,5	46 x 0,25	0,8	3,7
4	41 x 0,30	0,8	4,2
10	30 x 0,20	0,6	2,7

Tablica 3.1.2.2 – 1 Karakteristike P/F izolacijskog voda

3.1.2.3 PP/J

Konstrukcija: nepokositrena finožičana bakrena uzica klase 5 izolirana PVC smjesom standardne boje. Dvije ili više žila použenih zajedno, izolirano je PVC plaštem bijele ili crne boje. Izrađuje se sa 2 do 5 žila presjeka 0.75 do 2.5 mm², sa ili bez zaštitnog vodiča (zeleno-žute boje).

Primjena: za priključak prenosivih trošila pod težim uvjetima rada, npr, perilice rublja i posuđa, usisivači, grijalice i druge tehničke naprave.



Presjek [mm ²]	Konstr. vodiča (žile) [n x mm]	Deblj. izolacije žile / plašta [mm]	Vanjski promjer [mm]
3 x 1,5	28 x 0,25	0,7 / 0,8	8,0
3 x 2,5	46 x 0,25	0,8 / 1,1	10,4
5 x 1,5	28 x 0,25	0,7 / 1,1	10,8
5 x 2,5	46 x 0,25	0,8 / 1,2	12,6

Tablica 3.1.2.3 – 1 Karakteristike PP/J izolacijskog voda

3.1.2.4 PP/R

Konstrukcija: dvije ili tri žile od bakrenog vodiča izolirane su PVC masom standardne boje i postavljene paralelno te zaštićene PVC plaštem crne boje i to tako da između žila postoji staza koja služi za privremeno učvršćivanje voda na zid čavlicima. Izrađuje se dvožilni i trožilni sa i bez zaštitnog vodiča, presjeka 1.5; 2.5 i 4 mm².

Primjena: za instalacije u suhim prostorijama, za trajno polaganje u žbuku ili pod žbuku.



Presjek [mm ²]	Konstr. vodiča (žile) [n x mm]	Deblj. izolacije žile / plašta [mm]	Vanjski promjer [mm]
2 x 1,5	1 x 1,36	0,6 / 0,6	4,1 x 11,9
2 x 2,5	1 x 1,75	0,7 / 0,7	4,9 x 13,6
3 x 1,5	1 x 1,36	0,6 / 0,6	4,1 x 15,8
3 x 2,5	1 x 1,75	0,7 / 0,7	4,9 x 18,3

Tablica 3.1.2.4 – 1 Karakteristike PP/R izolacijskog voda

3.1.2.5 PP, PP-Y

Konstrukcija: dvije ili tri žile od bakrenog vodiča izolirane su PVC masom standardne boje, zajedno su použene i obuhvaćene ispunom, a preko ispune je PVC plašt sive boje. Izrađuje se sa 2, 3, 4 i 5 žila presjeka 1.5 do 35 mm². Žile presjeka 16 do 35 mm² izvedene su kao užice od 7 vodiča. Vod sa zaštitnim vodičem ima oznaku PP-Y.

Primjena: za instalacije u suhim i vlažnim prostorijama, za trajno polaganje ispod ili iznad žbuke, bez naročite mehaničke zaštite. Iznad žbuke se postavlja na odstoje obujmice, galerije, podne kanale i sl.



Presjek [mm ²]	Konstr. vodiča (žile) [n x mm]	Deblj. izolacije žile / plašta [mm]	Vanjski promjer [mm]
3 x 1,5	1 x 1,38	0,6 / 1,4	9,1
3 x 2,5	1 x 1,78	0,7 / 1,4	10,2
5 x 1,5	1 x 1,38	0,6 / 1,4	10,7
5 x 2,5	1 x 1,78	0,7 / 1,4	12,2

Tablica 3.1.2.5 – 1 Karakteristike PP PP-Y izolacijskog voda

3.1.2.6 PUR / PUR

Konstrukcija: vod se sastoji od nepokositrene meke finožičane bakrene uzice klase 5, izolirane slojem PUR mase standardne boje. Više žila je použeno i obuhvaćeno slojem gumene ispune a preko nje je plašt od PUR mase. Izrađuje se s brojem žila od 1 do 41 i presjeka 0.75 do 70 mm² Ako ima 6 i više žila, jedna je žuto-zelena a ostale crne, označene brojevima. Plašt je narandžaste boje.

Primjena: za priključivanje alata, strojeva i motora u industrijskim uvjetima. Naročito je pogodan za primjenu u ekstremnim vremenskim i klimatskim uvjetima zbog dobrih kemijskih i termičkih svojstava (temperature od - 40 do 80 °C) što uz veliku otpornost na pritisak i habanje omogućuje dugotrajnu životnu dob.



3.1.3 KABELI

Kabeli su zaštićeni vodovi od vanjskih utjecaja, a omogućuju provođenje energije ili signala od izvora do odredišta ili trošila. Mogu se polagati u zemlju, kabelsku kanalizaciju, na metalne konstrukcije, u vodu, u zraku, na brodove, u agresivnim sredstvima, uz posebnu zaštitu i u gorivim sredinama. Osnovni dijelovi kabela su:

- **vodič** – najčešće se izrađuje od bakra ili aluminija.
- **izolacija** – koriste se elastomeri, termoplastika, impregnirani papir, a za visoke napone ulje ili plin pod tlakom.
- **plašt** – zaštita od kemijskih utjecaja
- **armatura** – mehanička zaštita od oštećenja ili vlage (PVC ili obični polietilen)

Svaki kabel ne mora imati sve konstrukcijske dijelove, što ovisi o njegovoj namjeni i uvjetima rada. Prema izvedbi mogu biti jednožilni ili višezilni kabeli.

Označavanje kabela je dosta slično označavanju izoliranih vodova:

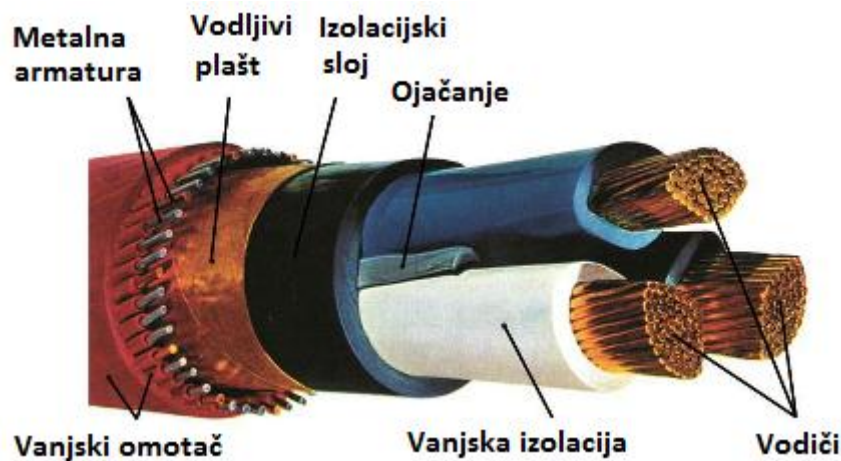
- Prva grupa slova – označava izolaciju i plašt
- Dvoznamenkasti broj – označava konstrukcijska svojstva i to: 00 – bez mehaničke zaštite, 40 – s koncentričnim nultim (zaštitnim) vodom, 41 – armatura od dviju čeličnih traka (čelični omotač), 44 – armatura od pocinčanih čeličnih žica, 45 – armatura s plosnatim čeličnim žicama
- Druga grupa slova – označava materijal i oblik vodiča: A – aluminij, S – sektorski presjek, bakar i okrugli presjek se ne obilježavaju
- Na kraju brojčane oznake – označavaju broj žila kabela i presjek svake žile, te nazivni napon

Nedostaci kabela u odnosu na nadzemne vodove su:

- najčešće daleko veće cijene u odnosu na cijenu dalekovoda,
- u slučaju kvara koji može nastupiti negdje na kabelu, teže je locirati mjesto kvara, a potrebno je i daleko više vremena za uklanjanje kvara.



Slika 3.1.3 – 1 Presjek jednožilnog kabela



Slika 3.1.3 – 2 Presjek trožilnog kabela

3.1.3.1 Koaksijalni kabel

Koaksijalni kabel je izvedba električnog kabela kod koje je jedan vodič smješten unutar drugog šupljeg vodiča tako da oba imaju zajedničku os. Koaksijalni je kabel u današnje vrijeme medij prijenosa u većini najpoznatijih LAN-ova. On se sastoji od uglavnom od bakrenog vodiča okruženog izolacijom. Vanjski omotač od bakra ili aluminija djeluje kao vodič i kao električna zaštita.

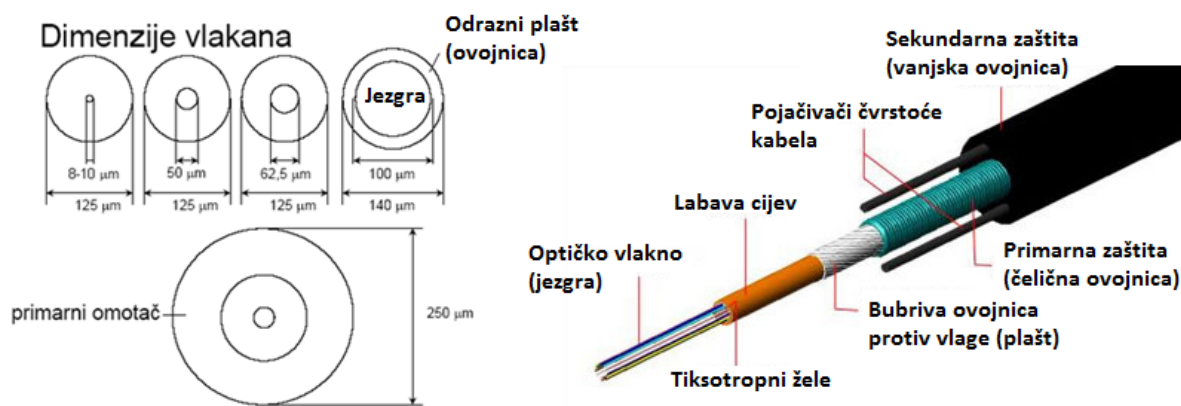
Slika 3.1.3.1 Presjek koaksijalnog kabela



3.1.3.2 Optički kabel

Optički kabel koji sadrži jedan ili više optičkih vlakana, a koristi se za prijenos svjetlosti. Različite vrste kabela se koristi za različite namjene, primjerice međugradske komunikacija, odnosno pružanje high-speed prijenos podataka između različitih dijelova zgrade. Posljednjih godina jedan od najvećih napredaka u razvoju LAN-ova uzrokovao je korištenje optičkih vlakana. Taj novi tip prijenosa ima niz prednosti pred paričnog i koaksijalnog kabela. Osim povećane brzine prijenosa podataka u odnosu na ranije korištene medije, optički kabel (fiber - optic cabling) imuni su na elektromagnetsku interferenciju (smetnje), te pružaju mogućnost slanja podataka na udaljenost od nekoliko kilometara bez značajnih gubitaka snage.

Optički se kabel sastoji od čistog stakla, razvučenog u vrlo tanko vlakno koje čini jezgru optičkog kabela. Vlakno je okruženo košuljicom (ovojnicom) slojem stakla s nižim indeksom loma nego što je indeks loma jezgre.



Slika 3.1.3.2 Presjek optičkog kabela

3.2. VODOVI PREMA NAMJENI

3.2.1 VODOVI ZA PRIJENOS SNAGE

Vodovi za prijenos snage su energetske vodovi. Izrađuju se samo od bakra i aluminija (kao puni ili pleteni), a izvode se kao jednožilni i višezilni vodovi. Po konstrukciji mogu biti goli ili izolirani, nadzemni i kabeli. Pri izboru vodova za prijenos snage potrebno je uzeti u obzir:

- **jakost struje** – bitna u određivanju presjeka vodova i kod izbora materijala prema vodljivosti
- **električni napon** – uvjetuje izbor izolatora, razmak među vodičima i zaštitne mjere
- **utjecaj okoline** – zrak, voda, zemlja, agresivne sredine
- **radni uvjeti** – iskorištavanje, naprezanje, deformacija, mehanička svojstva
- **troškovi izrade**

3.2.1 VODOVI ZA PRIJENOS INFORMACIJA

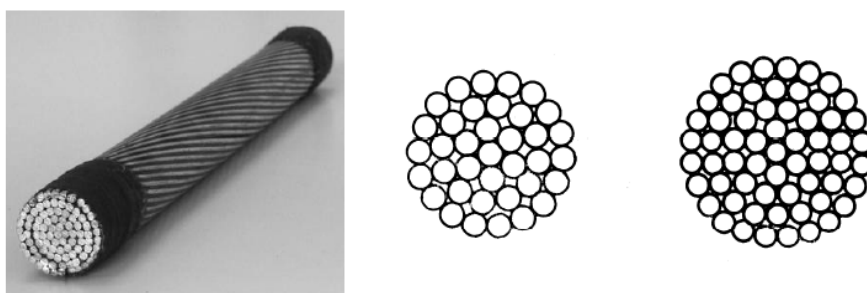
Vodovi za prijenos informacija (telekomunikacijski, signalni i td.) služe za prijenos neelektričnih veličina analognim ili digitalnim putem. Pri analognom načinu, veličina električnog signala neprekidno slijedi promjene veličine, koja predstavlja informaciju (govor, temperaturu i td.). Pri digitalnom načinu prijenosa informacije se pretvaraju u diskontinuirani niz različitih električnih vrijednosti signala, pri čemu je za svaku vrstu informacije određen kôd koji predstavlja tu vrijednost signala. Prijenos se može ostvariti žičnim i bežičnim putem. Vodovi po konstrukciji mogu biti goli ili izolirani, nadzemni, instalacijski, podzemni, podvodni i kabeli. **Specifični vodovi za prijenos informacija** smatraju se koaksijalni vodovi i valovodi.

3.3. VODOVI PREMA ELEKTROTEHNIČKIM KARAKTERISTIKAMA

3.3.1 HOMOGENI VODOVI

Vodovi su većinom homogeni (istih karakteristika), odnosno ako su sve žice višezičanog vodiča od istog materijala npr. bakar, aluminij, čelik i td.

Slika 3.3.1 – 1 Prikaz i struktura homogenog voda



3.3.2 NEHOMOGENI VODOVI

Nehomogenosti kod vodova su posljedice postojanja pojedinih faktora pri izradi vodova npr. promjena poprečnog presjeka voda, promjena električnih osobina dielektrika u vodu, promjena pravca osi voda i td.

3.4. TISKANI VODOVI

Povezivanje elektroničkih komponenata izvodi se na **tiskanim pločicama**. Najčešće korišteni materijal za tiskane pločice je FR-4 poznatiji kao **vitroplast** koji se sastoji od niza slojeva (7-9) staklenih tkanina impregniranih sa epoxy smolom na koji je kaširana (nalijepljena) bakrena folija sa jedne (jednostrana pločica) ili obje strane (dvostrana pločica). Dijelovi bakrene folije koji nakon tehnološke obrade ostanu sačuvani na tiskanoj pločici i služe za povezivanje elektroničkih komponenata nazivaju se **tiskani vodovi**. Tiskane vodove čine lemnna mjesta na koja se montiraju i spajaju izvodi elektroničkih komponenata i linije ili površine (poligoni) koji povezuju dva ili više lemnih mjesta. Širina tiskanih vodova ovisi o struji koja će protjecati kroz pojedini tiskani vod.

Širina voda (mm)	Dozvoljena struja (A)
0.381	1.0
0.762	2.3
1.27	3.5
2.54	6.0

Tablica 3.4 – 1 Dozvoljeno opterećenje tiskanih vodova

Jednostavnije sheme mogu se nacrtati na papiru pomoću pribora za crtanje, ali danas se uglavnom koriste programi za projektiranje tiskanih pločica računalom (P-CAD, Protel, Ultiboard, Eagle, PADS i td.). Nakon projektiranja izrađuju se predlošci za nanošenje zaštitnih maski. Tehnološke operacije u izradi tiskane pločice su čišćenje bakrene površine, nanošenje zaštitnog sloja (maske) i jetkanje.

3.4.1 ČIŠĆENJE BAKRENE POVRŠINE

Bakar korodira u dodiru sa zrakom, stoga je potrebno prije nanošenja maske za tiskane vodove ukloniti oksidacijski sloj i prljavštinu (masnoću prstiju i sl.) sa bakrene površine tiskane pločice. To se može učiniti brušenjem profesionalnim strojem za četkanje bakrene površine tiskanih pločica, vibracionom brusilicom ili najjednostavnije finom čeličnom vunom koja ne sadrži nikakve kemijske dodatke. Ako se bakrena površina čisti čeličnom vunom pločica se po brusi najprije paralelno sa jednom stranicom tiskane pločice, a zatim se pločica zakrene za 90° i ponovi postupak. Nakon brušenja bakrenu površinu je potrebno protrljati po čistom papiru i ne više dodirivati prstima.

3.4.2 NANOŠENJE ZAŠTITNOG SLOJA

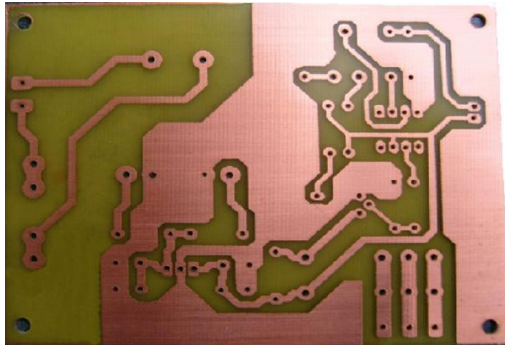
Ovisno o željenoj kvaliteti gotove tiskane pločice, količini i troškovima izrade, postoje razne tehnike nanošenja zaštitnog sloja (maske) na bakrenu površinu (foliju) gdje želimo sačuvati dijelove bakra kao tiskane vodove. Sredstva, tehnike ili postupci kojima možemo nanijeti zaštitnu masku su:

- **vodootporni flomaster**
- **ljepljiva traka**
- **letraset postupak**
- **transfer postupak**
- **sitotisak**
- **fotopostupak**

3.4.2.1 Vodootporni flomaster

Prema shemi tiskanih vodova izmjere se koordinate središta svakog pojedinog lemnog mjesta i običnom olovkom ucrtaju točke na bakrenu površinu prema izmjerenim koordinatama. Jednostavniji način ucrtavanja točaka središta lemnih mjesta je taj da shemu tiskanih vodova na papiru koristimo

kao predložak koji se postavi na bakrenu površinu pločice, a zatim se crtačom iglom pritisne u središte svakog lemnog mjesta na predlošku. Kada se predložak makne sa pločice, na bakrenoj površini će biti vidljive utisnute točke koje predstavljaju središta lemnih mjesta. Na mjestima tih točaka voodtopornim flomasterom se nacrtaju kružnice (dovoljno velikog promjera kako bi na kasnije gotovoj pločici ostalo dovoljno bakrene površine na kojoj se oko probušenog provrta može ostvariti kvalitetan spoj lemljenjem), a zatim se kružnice povezuju linijama iste širine i zakrivljenosti kao tiskani vodovi prikazani na shemi tiskanih vodova. Linije će biti pravilnije ako se koriste ravnalo i odgovarajuće šablone, ali pri tome treba paziti da budu okrenuti naopako kako kod njihovog odmicanja ne bi došlo do razvlačenja (razmackivanja) nacrtane linije. Kada se prvi nanoseni sloj



voodtopornog flomastera osuši potrebno je lagano nanijeti još jedan sloj. Ovo je vrlo jednostavan amaterski način zaštite bakrene folije kod nagrizanja tiskanih pločica manje preciznosti i složenosti, a kvaliteta zaštite ovisi o kvaliteti voodtopornog flomastera i osobi koja nanosi masku.

Slika 3.4.2.1 – 1 Primjer izgleda tiskane pločice crtane voodtopornim flomasterom

3.4.2.2 Ljepiva traka

Kod zaštite bakrene folije ljepljivom trakom prvo je potrebno prema shemi tiskanih vodova običnom olovkom ili tankim flomasterom na očišćenu bakrenu površinu nacrtati bridove tiskanih vodova. Zatim se ljepljiva traka prelijepi preko bakrene folije pločice pazeći pri tome da između ljepljive trake i bakrene folije ostane što manje mjehurića zraka. Ljepljiva traka mora biti dovoljno prozirna kako bi se kroz nju mogli vidjeti bridovi tiskanih vodova nacrtani olovkom. Pomoću skalpela neoštećenog vrha potrebno je uz pomoć ravnala povući crte po linijama vidljivim ispod ljepljive trake. Nakon što se ljepljiva traka razreže po svim linijama potrebno je odlijepiti ljepljivu traku na mjestima pločice koja je potrebno izjetkati, odnosno traka mora ostati na dijelovima bakrene folije na kojima trebaju ostati tiskani vodovi. Oblik tiskanih vodova kod ovog postupka zbog jednostavnosti rezanja trake skalpelom obično nema naglašena lemnja mjesta, nego vodovi uglavnom imaju oblik užih ili širih pravokutnih poligona. Ovaj postupak vrlo je kvalitetan što se tiče zaštite bakrene folije, gotove pločice zbog oblika tiskanih vodova nemaju potrebnu estetsku vrijednost, a koristi se za zaštitu bakrene folije kod tiskanih pločica manje složenosti.

3.4.2.3 Letraset postupak

Letraset je naziv za gotove simbole različitog oblika priljubljenih na prozirne listove plastike ili papira kao podlogu sa koje se mogu preslikati (prenijeti) na neku drugu željenu površinu. Letraset simboli koji se koriste za postavljanje zaštitne maske za nagrizanja bakrene folije izrađuju se u obliku lemnih mjesta raznih veličina (kružići i pravokutnici zaobljenih uglova) i linija različitih širina za tiskane vodove. Ovdje treba napomenuti da je na listu sa letraset simbolima razmak između dva susjedna simbola lemnih mjesta i razmak između redova lemnih mjesta standardiziran, tj. odgovara razmaku pinova za pojedina kućišta elektroničkih komponenata što je izrazito korisno za jednostavno postavljanje simbola lemnih mjesta za integrirane krugove. Sam postupak nanošenja zaštitne maske letraset tehnikom započinje na isti način kao što je opisano kod nanošenja maske voodtopornim flomasterom, odnosno crtačom iglom se preko predloška utisnu središta lemnih mjesta na bakrenu foliju pločice. Na označene točke na bakrenoj površini potrebno je prenijeti simbole lemnih mjesta odgovarajuće veličine, tj. površina simbola lemnog mjesta mora biti dovoljno velika kako bi na gotovoj pločici nakon bušenja provrta na pojedinom lemnom mjestu ostalo dovoljno bakrene površine na kojoj se može ostvariti kvalitetan spoj. Odabirom premalih lemnih mjesta prilikom lemljenja može doći do odvajanja bakrene folije lemnog mjesta od podloge čime pločica postaje neupotrebljiva, a odabirom prevelikih lemnih mjesta prilikom lemljenja se troši previše lemne legure.

Prenošenje simbola izvodi se tako da se podloga simbola okrene simbolom prema pločici, simbol se pozicionira na označeno mjesto i sa tupom teflonskom ili običnom olovkom protrlja preko simbola.



Tok prenošenja simbola na željenu podlogu vidi se po promjeni boje na podlozi sa letraset simbolima. Nakon što su postavljeni svi simboli lemnih mjesta postavljaju se linije odgovarajuće širine. Linije je najbolje razrezati između redova, a zatim prema udaljenosti između dva pojedina lemnja mjesta ili točke loma voda izrezati dijelove linija na potrebnu dužinu i na opisani način prenijeti na bakrenu foliju pločice. Ovom tehnikom moguće je postići tiskane vodove vrlo dobre kvalitete i estetike.

3.4.2.4 Transfer postupak

Pomoću laserskog pisača ili fotokopirnog uređaja potrebno je ispisati ili fotokopirati zrcalnu shemu tiskanih vodova na termo foliju debljine 0.1 mm ili vrlo glatki, "masni" papir. Na grijaču ploču ili fiksirano, obrnuto okrenuto glačalo zagrijano na 140 °C (pamuk) postavlja se očišćena pločica sa bakrenom folijom okrenutom prema gore. Na nju se stavlja pripremljen predložak (termo folija) tako da se sloj zapečenog tonera (laserskim pisačem ili fotokopirnim uređajem) okrene prema bakrenoj foliji. Zatim se preko folije prelazi gumenim valjkom slabim pritiskom 1 do 2 minute u oba dva poprečna smjera. Pri tome treba paziti da se termo folija ne pomakne naročito prilikom prvog prijelaza valjkom. Nakon toga pločica se metalnom pincetom makne sa grijače površine i ostavi hladiti. Kada se pločica ohladi potrebno je polako i pažljivo skinuti termo foliju sa pločice, a postupak je potpuno uspio ako se toner sa termo folije u potpunosti prenio na bakrenu foliju. Eventualni nepotpuni dijelovi otiska mogu se korigirati voodootpornim flomasterom.

3.4.2.5 Sitotisak

Sitotisak je općenito jedan od najstarijih tiskarskih postupaka kojim se u tehnologiji izrade tiskanih pločica mogu izrađivati maske za nagrizanje bakrene folije, maske za metalizaciju, signature i lemno otporne, elektro izolacijske maske. Sito se izrađuje kao pravokutni okvir (najbolje od aluminija jer su drveni i plastični podložni izvijanju, a čelični koroziji) na koji je napeta i zalijepljena svila od poliesterskog vlakna, sa mogućnošću podizanja i fiksnog pozicioniranja nad podlogom. Za postupak sitotiska prvo se na očišćenu i odmašćenu svilu nanosi foto-aktivna emulzija ili foto-aktivni film koji se onda suše toplim zrakom. Zatim se na sito postavlja pozitiv predložak tiskanih vodova (folija ili film) i osvjetljava UV (ultra ljubičastim) svjetlom. Nakon osvjetljavanja slijedi ispiranje sita u toploj vodi (20 °C) pri čemu će se isprati neosvijetljeni (zaštićeni) dijelovi, a osvjetljeni dijelovi na svili su se polimerizirali i zbog toga su u vodi netopljivi. Tako smo dobili šablonu koju je potrebno još osušiti toplim zrakom. Na tako pripremljeno sito, sa gornje strane svile nanosi se boja i sito se pozicionira paralelno iznad podloge sa očišćenom pločicom, ali na određenoj udaljenosti bez kontakta sa pločicom. Zatim se protiskivačem (rastirač, rakel, rakel, tvrda guma oštih bridova) protiskuje boja kroz sito na pločicu. Boja prolazi kroz mjesta na situ koja su prilikom osvjetljavanja bila zaštićena i nakon toga isprana u vodi. Maska dobivena na pločici suši se toplim zrakom (80 °C) ili infracrvenim grijačem. Ako se sitotiskom izrađuje lemno otporna, elektro izolacijska maska potrebno je provesti

sušenje (pečenje) na temperaturi 140 °C u trajanju od 1 sat. Dobra strana sitotiska je što jednom pripremljena šablona na situ može poslužiti za velike serije otisaka (> 100), a loša strana je nedovoljna preciznost kod pločica viših klasa gdje male metričke pogreške uslijed istezanja svile protiskivačem više dolaze do izražaja.



Slika 3.4.2.5 – 1 Stol za sitotisak

3.4.2.6 Fotopostupak

Postupak započinje nanošenjem krutog (folija) ili tekućeg fotoosjetljivog filma na čistu bakrenu foliju pločice uz prigušeno svjetlo. Kruti film se postavlja laminiranjem pri temperaturi od 120 °C uz pritisak 2 do 3 bara, uređajem koji se zove laminator. Tekući film nanosi se pomoću spreja nakon čega je potrebno njegovo sušenje u potpunom mraku. Postupak sušenja će se skratiti ako se izvodi u pećnici na toplom zraku maksimalne temperature 70 °C. Na foto-oslojenu pločicu pozicionira se pozitiv predložak (film ili folija) i zatim se vrši osvjetljavanje pločice UV svjetlom nekoliko sekundi. Kroz prozirne dijelove predloška UV svjetlo prodire na fotoosjetljivi film, a ispod crnih mjesta predloška fotoosjetljivi film ostaje neosvijetljen. Osvjetljena pločica stavlja se u razvijač za što se koristi 1%-tna otopina natrij karbonata (Na_2CO_3) ili otopina natrijeve lužine koja se dobiva tako da se 7 grama natrij hidroksida (NaOH) otopi u 1 litri hladne vode. Trajanje razvijanja kod svježeg razvijača iznosi 0.5 do 1 minute ili maksimalno 2 min za deblje slojeve fotoosjetljivog filma. Nakon razvijanja pločica se ispere u vodi pri čemu će sloj filma ostati na dijelovima koji su prilikom osvjetljavanja bili zaštićeni crnim površinama predloška. Fotopostupak predstavlja najprecizniji način izrade zaštitne maske kod nagrizanja tiskane pločice, a osim za izradu maski za nagrizanje koristi se izradu maski za metalizaciju i lemno otpornih, elektro izolacijskih maski.

3.4.3 JETKANJE PLOČICE

Nakon što je nekim od opisanih postupaka nanesena zaštitna maska vrši se jetkanje ili nagrizanje nezaštićenih dijelova bakrene folije. Jetkanje se izvodi kemijskim postupcima, a najpogodnija otopina za jetkanje u 1l otopine sadrži:

- 770 ml vode
- 200 ml solne kiseline (HCl) koncentracije 30%
- 30 ml vodikovog superoksida (H_2O_2) koncentracije 30%

Otopina se priprema tako da se prvo u vodu ulije solna kiselina, a zatim superoksid. Postupak jetkanja traje nekoliko minuta, a može se ubrzati strujanjem otopine u posudi što se izvodi upuhivanjem zraka u otopinu pomoću električne pumpe za zrak ili laganim ljuljanjem posude (kadice) u kojoj se vrši jetkanje. Kada bakrena folija nestane sa svih nezaštićenih dijelova, jetkanje je završeno, a pločice se ispere u vodi i osuši.

OPREZ!

Solna kiselina i vodikov superoksid su opasne, nagrizajuće i agresivne tekućine, te je prilikom rukovanja njima potreban najveći oprez i obavezna upotreba zaštitnih sredstava (zaštitne naočale ili vizir, zaštitne rukavice, zaštitna pregača).

3.5. VODIČI

Vodiči kao osnovne komponente električnog voda imaju zadatak voditi električnu struju i jedini su aktivni dio voda. Uslijed vlastite težine vodiči su mehanički opterećeni na vlak (rastezanje), a zbog činjenice da se protjecanjem struje kroz vodič stvaraju Jule-ovi gubitci to ih čini termički napregnutima. Ako vodič ima i neku drugu funkciju ili ako se prilikom vođenja struje javljaju još neki specifični iskoristivi efekti onda se govori o vodičkoj komponenti u širem smislu (kontakti, otpornici, poluvodičke aktivne komponente, itd.).

Vodiči mogu biti izrađeni u obliku žica ili užadi, pri čemu se za prijenos većih snaga koriste isključivo vodiči u obliku užadi. Za izradu električnih vodiča nadzemnih vodova uzimaju se razni materijali, od kojih se traži dobra električna vodljivost, velika mehanička čvrstoća, dobra mogućnost obrade, otpornost od korozije i starenja te prihvatljiva cijena. Sva navedena svojstva ne mogu se naći u samo jednom materijalu (tzv. **homogeni vodiči**), pa se često primjenjuju tzv. **kombinirani vodiči** koji se sastoje iz najmanje dva različita materijala.

Presjek vodiča i materijal od kojeg je izrađen definiraju maksimalno dozvoljenu struju koja smije trajno protjecati vodom u pogonu. Veće struje od nazivnih su dopuštene ali u kraćem vremenu, ovisno o iznosu struje. Materijali od kojih mogu biti izgrađeni vodiči su:

- **Bakar** (Cu) – ima najbolja električna svojstva.
- **Aluminij** (Al) – danas prevladava kao materijal za izradu vodiča za nadzemne vodove. U električnim svojstvima zaostaje za bakrom, ali ima manju specifičnu težinu i jeftiniji je, zbog čega je praktički istisnuo bakar u gradnji nadzemnih vodova. Osjetljiv je na mehanička oštećenja i relativno lako korodira.
- **Čelik** (Fe) – ima vrlo loša električna, ali dobra mehanička svojstva. Čelični vodiči se često primjenjuju kao zaštitna užad i kod kombiniranih vodiča. Od korozije se štiti pocinčavanjem.
- **Alučel** (Al/Fe) – je kombinirani vodič s jezgrom od čelične žice ili užeta i omotačem od žica aluminija. Čelik preuzima mehaničko opterećenje, a aluminij ulogu električnog vodiča. Najčešći omjer presjeka aluminija i čelika je 6:1, ali može biti i manji ukoliko se traži veća mehanička čvrstoća koju daje čelik.

Osnovni elementi načinjeni od vodiča sa svrhom isključivanja i spajanja strujnih krugova su:

- **kontakti, tipkala, preklopnici i prekidači** – njihova glavna funkcija je sigurnosno uključivanje i isključivanje strujnog kruga ili drugih elemenata
- **konektori** – su razni oblici vrhova vodova koji služe za spajanje (konektiranje) na druge vodove, elemente ili uređaje. Dije se na ženske (utičnice) i muške (utikače)
- **osigurači** – su sklopni aparati koji taljenjem jednog ili više topljivih vodiča prekidaju strujni krug u kojem se nalaze.

3.6. PITANJA ZA PROVJERU ZNANJA

1. Definirajte što su električni vodovi.
2. Kako sve možemo podijeliti električne vodove?
3. Čemu služe nadzemni vodovi?
4. Koji su osnovni dijelovi nadzemnog voda?
5. Gdje se sve koriste nadzemni vodovi?
6. Čemu služe izolirani vodovi?
7. Koji su osnovni dijelovi izoliranog voda?
8. Koje su sve boje izolacije vodova i što one označavaju?
9. Kakve je konstrukcije P/F vod i koja mu je primjena?
10. Kakve je konstrukcije PP/R vod i koja mu je primjena?
11. Kakve je konstrukcije P/F vod i koja mu je primjena?
12. Kakve je konstrukcije PP vod i koja mu je primjena?
13. Definirajte što su kabeli.
14. Koji su osnovni dijelovi kabela?
15. Kako se označava kabel?
16. Definirate što je koaksijalni kabel.
17. Definirajte što je optički kabel.
18. Gdje se sve koristi optički kabel?
19. Što su energetske vodovi i od kojih materijala se izvode?
20. Čemu služe vodovi za prijenos informacija?
21. Što znači da je vod homogen ili nehomogen?
22. Definirajte što su tiskani vodovi.
23. Koji su sve postupci nanošenja zaštitnog sloja na bakrenu pločicu?
24. Pojasnite postupak sa vodootpornim flomasterom.
25. Pojasnite fotopostupak.
26. Kako se izvodi jetkanje bakrene pločice?
27. Koji je osnovni zadatak vodiča?
28. Koji se sve materijali koriste za izradu vodiča i zašto?
29. Navedite sve osnovne elemente načinjene od vodiča za isključivanje i spajanje strujnih krugova.

4. PRIMJENA VODLJIVIH MATERIJALA

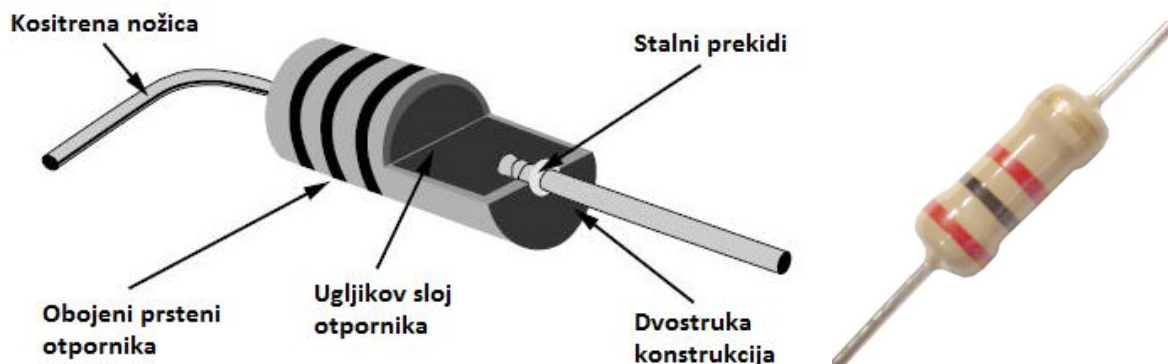
4.1. VRSTE OTPORNIKA

Otpornici su pasivne elektroničke komponente koje pružaju otpor protjecanju električne struje. Drugim riječima, apsorbiraju dio električne energije koju pretvaraju u toplinu. Možemo ih pronaći u gotovo svim elektroničkim sklopovima gdje se koriste za stvaranje željenog strujno-naponskog odnosa, ograničenje struje, smanjenje napona i sl.

4.1.1 OTPORNICI STALNE OTPORNOSTI

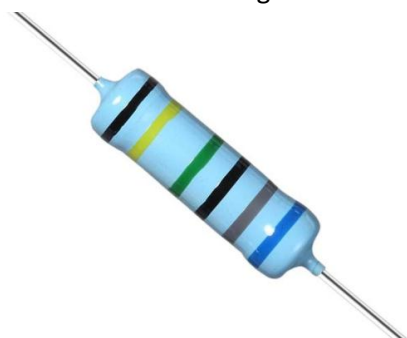
Danas postoji nekoliko tehnologija izrade otpornika stalne otpornosti, a najčešći su ugljenoslojni, metal-film, folijski, žičani i film otpornici.

Ugljenoslojni otpornici su izrađeni od keramičke jezgre na koju je nanesen tanki sloj čistog ugljika koji funkcionira kao otporni materijal. Željena vrijednost otpora može se dobiti odabirom debljine nanesenog sloja ugljika ili narezivanjem ugljikovog sloja u obliku spirale, čime se povećava dužina sloja ugljika između dva kontakta otpornika. Preciznim narezivanjem spirale mogu se dobiti točnije vrijednosti otpora. Tipične vrijednosti ovog tipa otpornika su do 10 M Ω , a tolerancije su 2%, 5% i 10%. Njihova snaga uobičajeno ne prelazi 2 W. Temperaturni koeficijent im je blago negativan. Najčešće se upotrebljavaju u visokonaponskim sklopovima i sklopovima izloženim povišenim temperaturama. Zbog šuma kojeg mogu unijeti u signal, izbjegava se njihovo korištenje u audio tehnici. Tijelo otpornika je u pravilu oker boje. Umjesto ugljenoslojnih otpornika sve se češće koriste metal-film otpornici zbog općenito boljih karakteristika i podjednake cijene.



Slika 4.1.1 – 1 Presjek i prikaz ugljenoslojnog otpornika

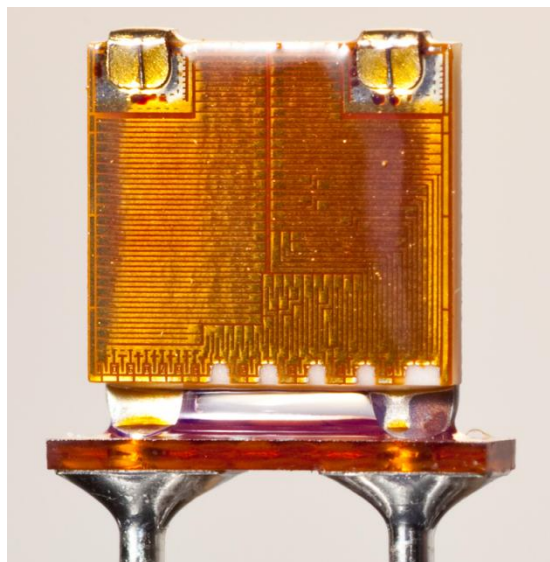
Metal-film otpornici su danas najčešće korišteni otpornici. Izrađeni su po sličnom principu kao i ugljenoslojni. Na keramičku jezgru nanosi se tanak sloj metalnog filma, najčešće legure nikal-kroma (NiCr). Ponekad se koristi antimon ili zlato sa platinom i tantalovim nitridom. Otpor je direktno ovisan o debljini metalnog filma. Deblji sloj filma rezultira manjim otporom. Željena vrijednost otpora se može dobiti narezivanjem spiralnog utora u metalnom sloju. Tipične vrijednosti otpora su do oko 20 M Ω . Zbog veće stabilnosti otpornog sloja moguća je veća točnost izrade, pa im je tolerancija između 0.05% i 2%, no najčešće je 1%. Uobičajeno, snaga ne prelazi 2 W, a u iznimnim situacijama 10 W. Mogu podnijeti i nešto veće temperature od ugljenoslojnih. Koriste se u praktički svim elektroničkim sklopovima, a moguće ih je prepoznati po plavoj boji tijela.



Slika 4.1.1 – 2 Prikaz metal-film otpornika

Folijski otpornici imaju najbolja svojstva, najmanji šum i najdugovječniji su od svih ovdje spomenutih. Na keramički nosač nanesen je nekoliko mikrometara tanak film otporne legure, najčešće nikal-kroma s primjesama. Željena vrijednost otpora postiže se svjetlosnim graviranjem otpornog uzorka. Tolerancija može iznositi svega 0.005%. U procesu izrade moguće je postići vrlo visoku preciznost, a zbog njihove dugovječnosti koriste se u sklopovima gdje je potrebna visoka preciznost, stabilnost i dugovječnost npr. u audio tehnici, elektroničkim vagama, zrakoplovstvu i td.

Slika 4.1.1 – 3 Prikaz folijskog otpornika



Žičani otpornici su izrađeni od izolacijskog tijela (najčešće keramike) na koje je namotana otporna žica. Koristi se neka od legura nikal-kroma ili željezo-kroma, a koje su poznate i pod nazivima Khantal, Cekas, Konstantan i sl. Tijelo sa namotanom žicom se zatim zaštićuje zalijevanjem u cementno ili keramičko kućište. Zbog boljeg hlađenja, ovakve otpornike možemo naći ugrađene u rebrasto metalno kućište, ili pak potpuno nezaštićene. Zbog same tehnologije izrade (namotane

žice), mogu imati veliki parazitski induktivitet. Kako bi se to izbjeglo, žica se namata bifilarno, čime se poništava parazitski induktivitet, ali raste parazitski kapacitet. Kako bi se postigao željeni otpor, na tijelo se namata određena količina otporne žice, jer je dužina žice proporcionalna otporu. Najčešće su malih otpora, do najviše reda 10 kΩ, jer bi za veće otpore žica trebala biti ili vrlo tanka ili velike dužine. Ovakvi se otpornici najčešće izrađuju kao otpornici veće snage, od 1 W do 1 kW, a koriste se u sklopovima gdje se zbog disipirane snage ne mogu koristiti druge vrste otpornika. Tolerancije su najčešće 5%.

Slika 4.1.1 – 4 Prikaz žičanih otpornika



Film otpornici su uglavnom izrađeni kao SMD (eng. Surface Mount Device) komponente. Zbog sveopće primjene SMD komponenti, ovo su danas najčešće korišteni otpornici. Dvije su osnovne varijante: otpornici sa tankim i otpornici sa debelim filmom. Iako naziv sugerira na razliku samo u debljini filma, ustvari se radi o dvije posve različite tehnologije izrade. **Otpornici sa tankim filmom** su najsličniji metal-film otpornicima. Na keramičku bazu se nanosi sloj nikal-krom legure čija otpornost ovisi o debljini sloja. Također, laserom se urezuje utor kako bi se dobila željena vrijednost otpora. Ovakvi otpornici imaju malu toleranciju (između 0.1% i 2%), nizak šum i mali temperaturni koeficijent. Vrijednost otpora uobičajeno ne prelazi 20 MΩ. Koriste se u VF sklopovima i tamo gdje se traži niska tolerancija komponenata, kao npr. u mjernim uređajima.

Otpornici sa debelim filmom se daleko češće koriste i nalaze se u gotovo svim modernim uređajima. Na podlogu od keramike se nanosi otporni sloj koji se izrađuje od oksida rutenija, iridija ili renija. Debljina sloja je reda veličine 100 mikrometara, što ih čini i do 1000 puta debljim nego otpornike sa tankim slojem. Željena vrijednost otpora se dobiva uzastopnim nanošenjem otpornog sloja.

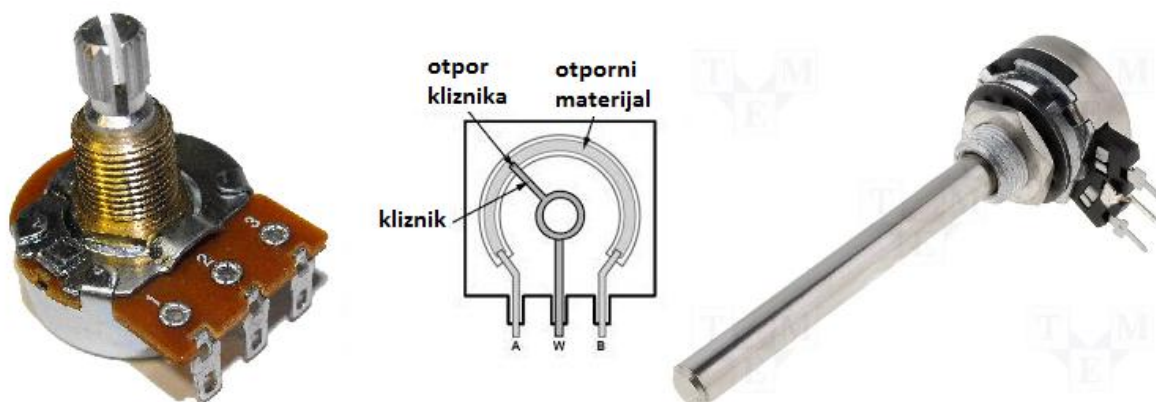
Ovaj proces izrade je jeftiniji, a otpornici podnose veće snage. Uobičajene tolerancije su 1% i 5%, a vrijednost otpora je do 100 M Ω .



Slika 4.1.1 – 5 Prikaz film otpornika

4.1.2 OTPORNICI PROMJENJIVE OTPORNOSTI

Promjenjivim otpornicima, odnosno potenciometrima, otpor se može ručno mijenjati zakretanjem osovine (kod okretajnih), odnosno pomicanjem klizača (kod kliznih). Sastoje se od tri priključnice; dvije su spojene na svaki kraj otpornog elementa, a treća je tzv. klizač, čijim se pomicanjem mijenja otpor između klizača i druge dvije priključnice. **Potenciometar** možemo promatrati i kao serijski spoj dvaju otpornika. Prvi otpornik predstavlja otpor između klizača i jedne priključnice, a drugi otpor između klizača i druge priključnice. Najčešće se koriste u sklopovima kao djelitelji napona, primjerice za podešavanje glasnoće zvuka u audio uređajima. Otporni materijal može biti žica, a otpor se mijenja pomicanjem klizača po namotajima žice. Ovakvi su potenciometri najčešće konstruirani kako bi podnijeli veće snage. Kod manjih snaga, kao otporni materijal koristi se ugljen, metalni film, vodljiva plastika ili keramika (kompozitni materijal izrađen od keramike i metala). Promjena otpora može biti linearna i logaritamska. Linearna znači da se otpor mijenja linearno u odnosu na pomicanje klizača, dok se kod logaritamskog potenciometra mijenja po logaritamskoj funkciji.



Slika 4.1.2 – 1 Presjek i prikaz potenciometra

Kod **jednookretajnih potenciometara** osovina se može zakrenuti za približno 270°, odnosno oko 3/4 kruga. Ovakvi su se otpornici često koristili za regulaciju glasnoće u starijim audio uređajima.

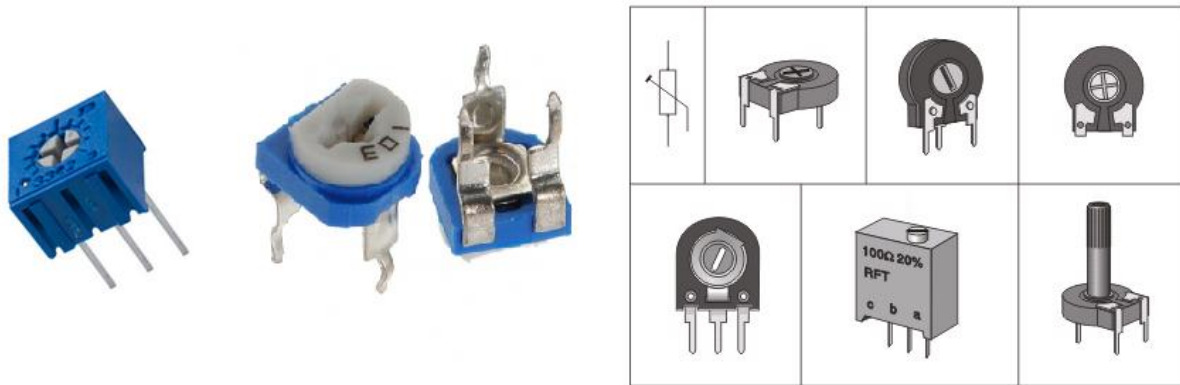
Višekretajnim potenciometrima, osovina se može zakrenuti za puni krug (360°) 5, 10 ili 20 puta. Koriste se u sklopovima gdje je potrebno precizno podešavanje, primjerice u mjernim uređajima. Mogu biti izvedeni kao jednostruki ili dvostruki, te motorizirani. Kod dvostrukih se zapravo radi o dva nezavisna potenciometra spojena na istu osovinu. Česti su u audio uređajima za regulaciju stereo signala. Motorizirani imaju dodan elektromotor, te se mogu zakretati ručno ili pomoću motora.

Kod **kliznih potenciometara** promjena otpora se ne vrši zakretanjem osovine, već pomicanjem klizača u ravnini. Često ih možemo vidjeti na audio miksetama. Električne karakteristike su im jednake kao kod okretajnih, a razlika je samo u fizičkom dizajnu.



Slika 4.1.2 – 2 Prikaz kliznih potenciometra

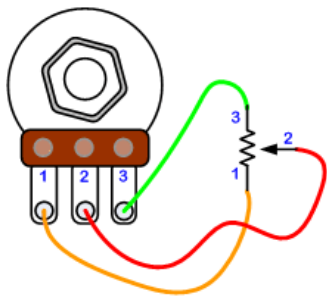
Trimer je potencijometar koji nije namijenjen čestom podešavanju, već samo jednom, npr. kod ugađanja uređaja. Trimer nema osovinu za montažu gumba, nego utor za odvijač kojim se podešava, te je najčešće fizički manji.



Slika 4.1.2 - 3 Razne izvedbe i prikazi trimera

Tablica 4.1 – 1 Vrste i simboli otpornika

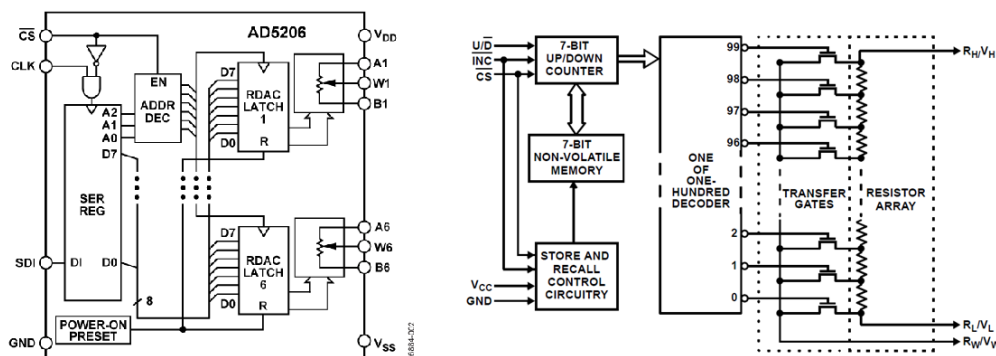
Reostat označava promjenjivi otpornik koji ima samo dvije priključnice; jedna je spojena na klizač, a druga na otporni element. Potencijometar možemo spojiti kao reostat tako da kratko spojimo klizač i jednu priključnicu.



Slika 4.1.2 – 4 Prikaz spajanja reostata

Izgled otpornika	Tip otpornika	Simbol
A	Fiksni otpornik	
B	Žičani otpornnik	
C	Promjenjivi žičani otpornik	
D	Potencijometar	
E	Reostat	

Digitalni potencijometar je potencijometar kojim se upravlja putem digitalnog signala, npr. mikrokontrolerom putem 1-wire ili I2C standarda. I2C sabirnica je sinkrona serijska sabirnica namijenjena povezivanju raznih digit. i upravljačkih analognih sustava. Sva komunikacija obavlja se preko dvije linije: SDA (serial Data) kojom se prenose podaci i SCL (serial clock) kojim se prenosi takt. Ustvari se radi o serijski spojenim fiksnim otpornicima između kojih se prespaja klizač. Otpor se mijenja spajanjem klizača između različitih otpornika. Promjena otpora nije kontinuirana kao kod klasičnih potencijometara, već skokovita, npr. 64, 128 ili 256 položaja. Koriste se kod digitalno upravljanih sklopova, npr. kod digitalnog podešavanja glasnoće, regulacije osvjetljenja i kontrasta na alfanumeričkim LCD ekranima i sl. Slika 4.1.2 – 5 Primjeri digitalnih potencijometara



4.1.3 OTPORNICI S POSEBNIM SVOJSTVIMA

Otpornici s posebnim svojstvima su:

- otpornici **ovisni o temperaturi** (termistori – NTC, PTC otpornici)
- otpornici **ovisni o naponu** (varistori – VDR otpornici)
- otpornici **ovisni o magnetskom polju** (Hallowe pločice)
- otpornici **ovisni o svjetlu** (fotootpornici ili LDR)

4.1.3.1 Otpornici ovisni o temperaturi

Kod metala i nekih drugih tvari otpor raste s porastom temperature. Međutim ima niz tvari (ugljen, poluvodiči) koje se ponašaju obratno. One lošije vode u "hladnom" stanju nego u "toplom" stanju, odnosno otpor im se smanjuje pri povišenju temperature. Zato ih zovemo toplim vodičima ili otpornicima s negativnim temperaturnim koeficijentom - **NTC otpornicima**. Često je u uporabi i naziv **termistor**.

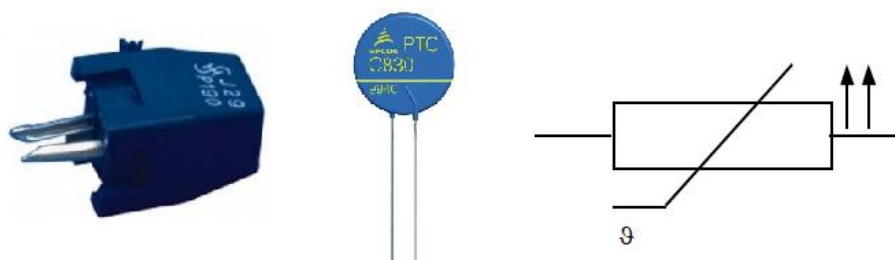


Slika 4.1.3.1 – 1 Primjeri i simbol NTC otpornika

Otpor ovisi o upotrijebljenom materijalu, načinu izvedbe i temperaturnim promjenama. Promjenu otpora može izazvati promjena temperature okoliša. S druge strane vlastito zagrijavanje (samozagrijavanje) odnosno hlađenje, kao posljedica različitih električnih opterećenja također uzrokuje promjenu otpora. Ovaj je efekt posebno važan. Kada se narine dovoljno visoki napon proizvede se u otporniku toliko topline da mu poraste temperatura. To vodi smanjenju otpora, povećanju struje i novom rastu temperature. Nakon nekog vremena, od djelića sekunde do minute ovisno o izvedbi, uspostavi se ravnotežno stanje. Opisani efekt samozagrijavanja termistora ima niz primjena. Primjerice, ako se NTC serijski spoji s nekom drugim uređajem, ograničit će početnu vrijednost struje. Zagrijavanjem struja bez naglog skoka postupno raste do njene završne vrijednosti. Primjenjuje se još i kao temperaturno osjetilo (senzor) u mjerenju temperature ili za kompenzaciju temperaturnih ovisnosti drugih naprava, za stabilizaciju radne točke u tranzistorskim spojevima, te u regulacijskim uređajima za uključivanje i isključivanje pri određenim temperaturama.

NTC termistori se koriste za mjerenje nižih temperatura -100 do 300 °C. Tipični radni otpor je u kiloohmskom rasponu, premda se otpor može kretati od nekoliko Mega Ohma do nekoliko Ohma. Izrađuju se od materijala: srebrni sulfid, bakreni oksid, cinkov oksid.

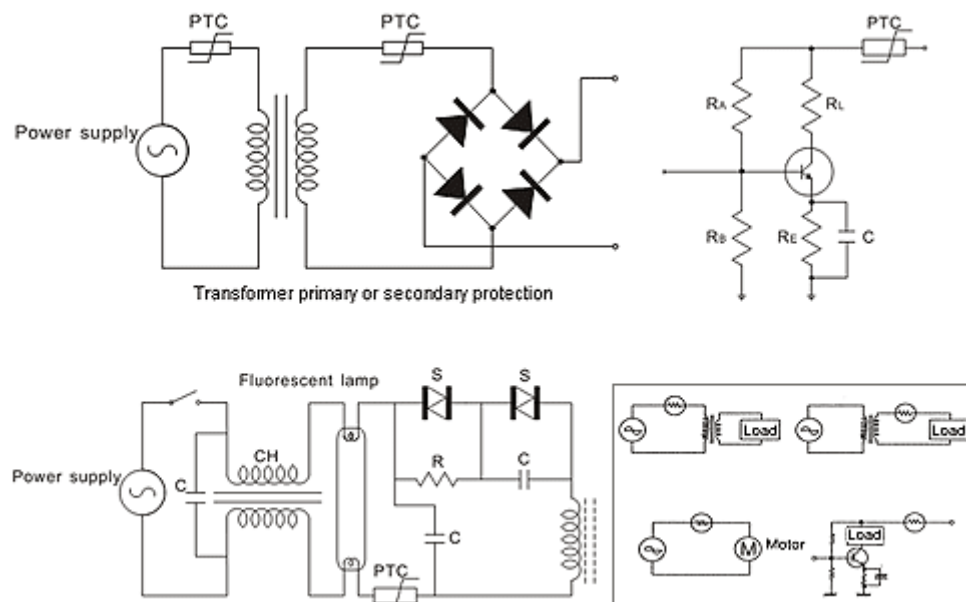
Osim metala ima još tvari kod kojih je otpor u "hladnom" manji nego u "toplom" stanju. To su hladni vodiči. Otpor im raste s porastom temperature. Otpornici takvih karakteristika imaju pozitivni temperaturni koeficijent, pa ih nazivamo **PTC otpornicima**.



Slika 4.1.3.1 – 2 Primjeri i simbol PTC otpornika

Kao i kod NTC otpornika uzrok promjene otpora može biti promjena temperature okoline ili vlastito zagrijavanje/hlađenje kao posljedica različitih električnih opterećenja. Otpor im ispod određene temperature umjereno ovisi o temperaturi, a jako se povećava iznad te temperature. Povećanje može biti vrlo naglo i do 15% po °C, a ukupno povećanje otpora u intervalu od nekoliko desetaka °C dostiže po nekoliko redova veličine. Izrađuje se od feroelektrične keramike npr. TiO_3 .

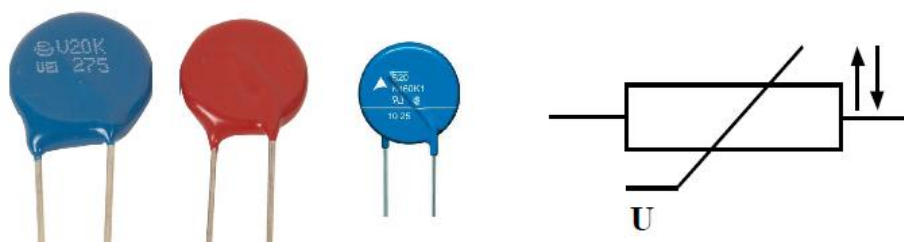
Koriste se u ograničenom opsegu temperatura, jer im iznad granične temperature temperaturni koeficijent opet postaje negativan. Osim toga jako su frekvencijski ovisni iznad 5MHz zbog velikog kapaciteta C koji je posljedica njihove unutarnje strukture. Ugrađuju se kao zaštitni uređaji kod transformatora, punjača baterija, prekidača, switching napajanja, adaptera, instrumenata, zavojnica, kontrolnih panela, klima uređaja, hladnjaka, automobilske elektronike i td. Štite uređaje od pregrijavanja, a primjenjuju se i u krugovima za regulaciju temperature za grijanje. PTC otpornik se serijski spoji s krugom za napajanje i postavi na poziciju gdje je moguće zagrijavanje iznad dozvoljenog. U slučaju pregrijavanja trenutno se poveća njegov otpor. Zaštita od prekomjernog porasta struje, odnosno pregrijavanja, automatski se osigurava vlastitim zagrijavanjem PTC otpornika. Kada struja postane prevelika PTC otpornik je ograniči na sigurnu vrijednost. Može se uporabiti kao temperaturno osjetilo i kao osjetilo razine tekućine.



Slika 4.1.3.1 – 3 Primjeri korištenja PTC otpornika

4.1.3.2 Otpornici ovisni o naponu

Varistori su naponski ovisni otpornici (**VDR** - Voltage Dependent Resistor) kojima se otpor mijenja inverzno s narinutim naponom. Opadanje otpora s povećavanjem napona je vrlo oštro izraženo.



Slika 4.1.3.2 – 1 Primjeri i simbol VDR otpornika

Sastoje se od mnoštva sitnih zrnaca s ispravljačkim djelovanjem na spojnim točkama. Kada porast napona prijeđe graničnu vrijednost, struja na kontaktima VDR-a zbog pada otpora naglo poraste. Zrnca (granule) mogu se shvatiti kao komplicirana mreža veoma malih otpora. Broj serijski spojenih otpora određuje mjeru napona, a broj paralelnih spojeva definira maksimalnu struju.

Izrađuju se od silicijeva karbida ili cinkova oksida. U normalnom radnom području varistora promjena struje je vrlo izražena već za male promjene napona, pa se varistor može primijeniti u svrhu stabilizacije napona.

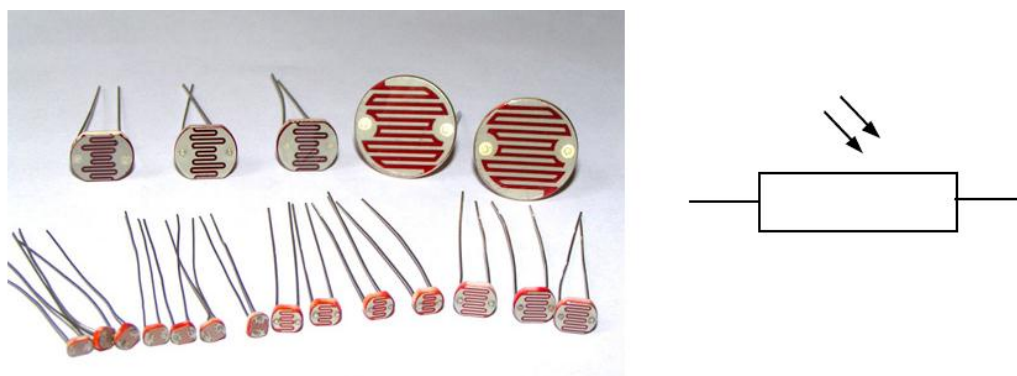
Tipični primjer uporabe varistora je za potiskivanje naponskih udara, odnosno zaštitu od prenapona. Takve se prilike mogu stvoriti uključivanjem induktivnih trošila, udarom groma ili drugim vrstama elektrostatičkih pražnjenja. Varistor se vezuje kao zaštitni uređaj paralelno trošilu. U normalnim uvjetima kroz njega teče zanemariva struja. Kada se dogodi naponski udar struja varistora naglo poraste i time spriječi porast napona. Varistor apsorbira energiju uklapanja uređaja. Javlja se i kao element za prekonaponsku zaštitu različitih poluvodičkih sklopova. Varistor je koristan i za gašenje električnih iskara.

4.1.3.3 Otpornici ovisni o magnetskom polju

Magnetski otpornici su oni koji mijenjaju otpor s promjenom magnetskog polja, odnosno gustoće magnetskog toka, u kojem se nalaze. Djelovanje polja na elektrone i potiskivanje na stranu, što produljuje njihovu putanju, raste otpor (dulji put – dulji vodič – veći otpor). Još se nazivaju **Hallovim pločicama**. Primjenjuju se kao bezkontaktne sklopke, za mjerenje magnetskog polja.

4.1.3.4 Otpornici ovisni o svjetlu

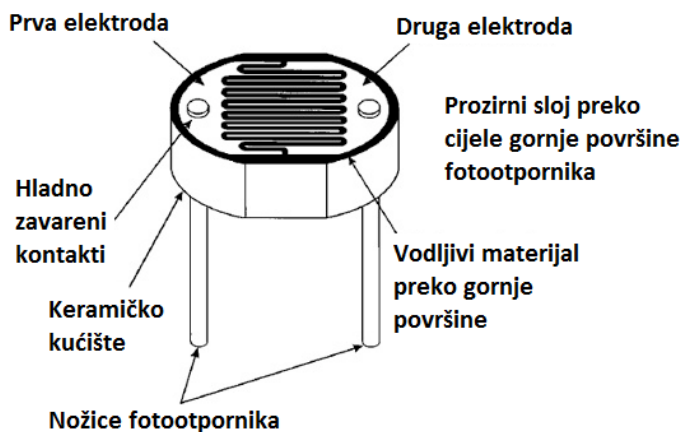
Fotootpornici su otpornici ovisni o svjetlu (**LDR** - Light Dependent Resistor). Otpor im se smanjuje pri porastu rasvjetljenosti i obratno.



Slika 4.1.3.4 – 1 Primjeri i simbol LDR otpornika

Promjenu otpora uzrokuje unutarnji fotoelektrični efekt. Energiju koju isijava svjetlosni izvor apsorbira poluvodički materijal fotootpornika, pri čemu se oslobađaju slobodni nositelji naboja. Krajnji rezultat je povećanje vodljivosti (smanjenje otpornosti), pa je u uporabi i naziv **fotovodiči**. Izrađuju se od poluvodljivih materijala: kadmijev sulfat, olovni sulfid, GaAs.

Koriste se kao svjetlosne prepreke, elementi za upravljanje plamenom, mjerenje osvijetljenosti, vatrodojavu, u krugovima za regulaciju svjetla kao sklopka za zatamnjivanje, kao strujni prekidači i dr. Čest su element složenih modernih elektroničkih krugova. Primjerice u krugovima za A/D pretvorbu analogni električni signal se vremenski uzorkuje i kodira u digitalnom obliku. Pri tom LDR radi kao vremenski prekidač upravljan laserskim impulsima, pa se tako prati i uzorkuje analogni naponski signal. VDR-ovi se postavljaju i u "sample & hold" (uzorkuj i zadrži) sklopovima. Zahvaljujući svojstvima fotootpornika mogu se realizirati i uređaji koji generiraju kratkotrajne impulse velike snage.



Slika 4.1.3.4 – 2 Prikaz fotootpornika

4.2. MATERIJALI ZA OTPORNIKE

Otpornost je svojstvo materijala da se opire prolasku struje. To su u pravilu vodljivi materijali s dovoljno velikim specifičnim otporom, moraju biti otporni na koroziju, moraju imati malen kontaktni potencijal, otpor im se ne smije mijenjati tijekom vremena i moraju izdržati potrebnu pogonsku temperaturu. Ova svojstva uglavnom zadovoljavaju slitine nekih metala čiji je specifični otpor 0.2 do $1.6 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$. Vrlo često se primjenjuju i nemetalni otpornici na bazi poluvodiča ugljena ili silicijeva karbida.

Najznačajniji otporni materijali	
Prema radnoj temperaturi i specifičnom otporu	Prema području primjene
Slitine bakra specifičnog otpora $0.5 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ i pogonske temperature do 400°C	Materijali za regulacijske i tehničke otpornike
Slitine na bazi kroma, nikla i željeza specifičnog otpora $0.7 - 1.6 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ i pogonske temperature $800 - 1300^\circ\text{C}$	Materijali za precizne otpornike
Nemetalni otpornici specifičnog otpora od nekoliko desetaka do nekoliko tisuća $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ i pogonske temperature $1400 - 2000^\circ\text{C}$	Materijali za grijaće otpornike
	Materijali za slojne i žarne otpornike

4.2.1 MATERIJALI ZA REGULACIJSKE I TEHNIČKE OTPORNIKE

Opće karakteristike ovakvih otpornika su:

- moraju izdržati pogonsku temperaturu do 200°C
- moraju biti otporni na starenje
- otpor im se ne smije vremenski mijenjati
- ne moraju biti previše precizni (tolerancija – odstupanje je od 5, 10 i više % od nazivne vrijednosti)
- moraju biti niske cijene

Najviše se izrađuju od **legure** bakra i nikla, te bakra, nikla i cinka, srebra (rijeđe) ili manganina kod žičanih otpornika. Nikal sa cinkom daje leguri srebrnastu boju; bakar pridonosi gnječivosti, cink ljevljivosti a nikal žilavosti i otpornosti prema koroziji. Nekim strukturama dodaje se malo olova radi bolje rezljivosti. Najpoznatija legura **konstantan** je sastavljena od bakra sa 40 – 55% nikla, ali nije pogodna za precizne otpornike zbog velikog kontaktnog potencijala prema bakru. Nije ga potrebno dodatno izolirati jer mu površina oksidira pa nam to služi kao izolacija. Od legure konstantana se izrađuju žice i vrpce. Također u ovu skupinu spadaju i **keramički materijali** od kojih se izrađuju slojni otpornici.

4.2.2 MATERIJALI ZA PRECIZNE OTPORNIKE

Temperaturni koeficijent ovakvih otpornika mora biti što manji da im otpor što manje ovisi o temperaturi. Također se otpor s vremenom ne smije mijenjati. Unutrašnja naprezanja zbog kojih bi se otpor mogao promijeniti uklanjaju se žarenjem. Kontaktni potencijal prema bakru mora biti što manji. Ovim zahtjevima udovoljava malen broj materijala. Najpoznatiji je **manganin** (trostruka manganova bronca) koji se izrađuje u obliku žice ili vrpce i to sa izolacijom od laka ili svile. Također se u novije vrijeme koristi **izabelin** i **novokonstantan**.

4.2.3 MATERIJALI ZA GRIJAĆE OTPORNIKE

Grijaći otpornici moraju brzo, s malim utroškom energije postići visoke temperature. Zato moraju imati dobru toplinsku vodljivost i mali specifični toplinski kapacitet, veliki specifični otpor, visoko talište, malen koeficijent istezanja i postojanost prema koroziji. Materijal za ove otpornike mora imati dobra mehanička i tehnološka svojstva zbog čega se najčešće koriste **malolegirani metali** (s

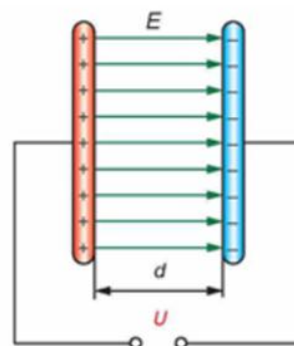
malim postotkom legiranja). Najpoznatiji su materijali u čiji su osnovi aluminij, krom, željezo i nikal, dok su trgovački nazivi **alukrom** i **kronifer**.

4.2.4 MATERIJALI ZA SLOJNE I ŽIČANE OTPORNIKE

Uloga ovakvih otpornika je ograničiti struju u strujnom krugu. Zato moraju imati veliki toplinski kapacitet i malu toplinsku vodljivost, veliki toplinski kapacitet, postojanost prema koroziji, mali koeficijent istezanja i malen temperaturni koeficijent. Imaju velike električne otpore i zbog toga ograničenu primjenu. Od materijala upotrebljava se ugljen, krom, tantal i njihove legure i oksidi. Za izradu žičanih otpornika vrlo točnog otpora koriste se slitine bakra, nikla i mangana – konstantan.

4.3. MATERIJALI I VRSTE KONDENZATORA

Kondenzatori su elektroničke komponente gdje u svojem unutarnjem električnom polju (E) može značajno akumulirati energiju. **Električni kapacitet** je sposobnost vodiča da na sebe primi određenu količinu naboja. Energija se akumulira u izolacijskom sloju (dielektriku) između dvije metalne površine kada na njih dovedemo naboj suprotnog polariteta. Na takav način će se pojaviti razlika potencijala između metalnih površina kondenzatora.



Slika 4.3 – 1 Ilustracija kondenzatora

Razvojem tehnologije u proizvodnji materijala omogućilo je cijeli niz umjetnih materijala koji se mogu koristiti za izgradnju kondenzatora od kojih se zahtijevaju određene funkcije i vrijednosti. Danas kondenzatori su dostupni u rasponu od nekoliko pF do μF u istom kućištu i vrlo sličnih karakteristika. Također tehnologija u projektiranju integriranih elektroničkih sklopova (IC) omogućila je realizaciju kondenzatora u CMOS (engl. Complementary Metal Oxide Semiconductor) tehnologiji.

Prema vrsti možemo ih podijeliti na:

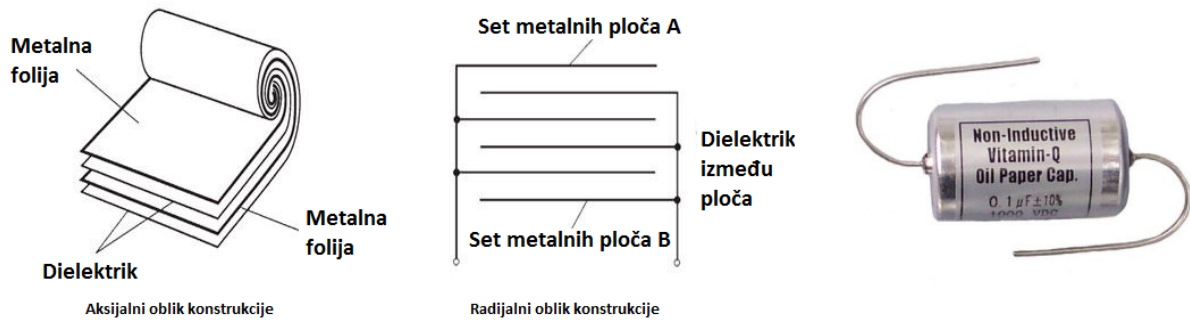
- **kondenzatori stalnog kapaciteta**
 - s folijama (papirne, metal-papirne, plastične)
 - keramički
 - od tinjca
 - od stakla
 - elektrolitski (+ i -, s Al/Ta oksidom)
- **kondenzatori promjenjivog kapaciteta**
 - zakretni (promjenjivi, namještanje u toku rada)
 - za fino podešavanje (polupromjenjivi ili trimeri)

4.3.1 KONDENZATORI STALNOG KAPACITETA

Papirni kondenzatori koriste papir kao dielektrik. Papir se uvijek impregnira sintetičkim tekućinama, mineralnim uljem, voskom i sl., kako bi se smanjila higroskopnost papira. Takav impregnirani papir još se naziva **kondenzatorski papir**. Kondenzatorski papir ima veću dielektričnu čvrstoću, ali i veći koeficijent dielektričnih gubitaka. Papirni kondenzatori uglavnom se izrađuju u plosnatom obliku namatanjem papirnih traka između kojih su obložene metalne (aluminijske) folije. **U elektrotehnici** se papirnati kondenzatori manje koriste jer su ih zamijenili kondenzatori s plastičnom folijom. Međutim, još uvijek se koriste u telefoniji (npr. u aluminijskom kućištu), u energetskej elektronici, za korekciju faktora snage i td.

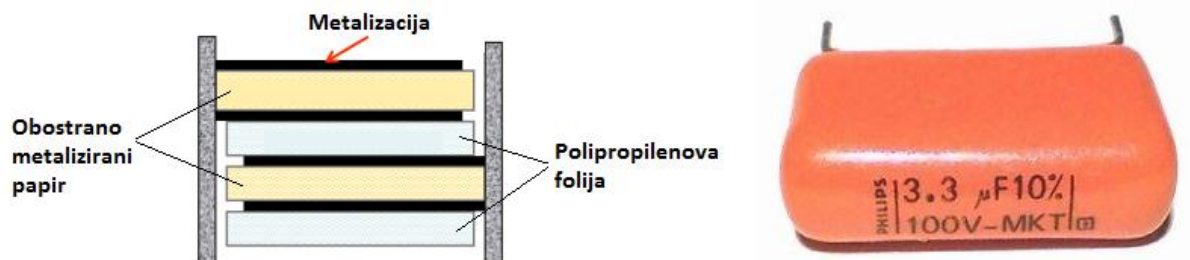
Nedostaci papirnih kondenzatora je postojanje mjehurića zraka u papiru i velike dimenzije samih kondenzatora. Pojava zraka donekle se može izbjeći **kondenzatorom s metaliziranim papirom**, čije je jedna strana papira metalizirana. Prednosti kondenzatora s metaliziranim papirom luže u njihovoj

samoregeneraciji u slučaju probojnih napona ili kratkih spojeva te manjim dimenzijama. Koriste se za uređaje velike stabilnosti i malih gubitaka, za kompenzaciju jalove snage, uz kontakte za sprječavanje iskrenja, za otklanjanje radio smetnji i td.



Slika 4.3.1 – 1 Primjeri konstrukcije papirnih kondenzatora

Kondenzatori s plastičnim i metalnim folijama imaju puno veću otpornost izolacije i u isto vrijeme značajno manji gubitak tangens kuta. Kao dielektrik koristi se nemetalizirane i metalizirane folije od različitih materijala, kao što su stirofleks (još se naziva polistiren), poliester, polikarbonat, polipropilen, i td. Struktura je slična papirnim kondenzatorima. Nedostatak kondenzatora s plastičnim i metaliziranim folijama leži u tome što su malih kapaciteta.



Slika 4.3.1 – 2 Primjer konstrukcije i kućišta kondenzatora s plastičnim i metalnim folijama

Keramički kondenzatori za dielektrik uzimaju keramiku u obliku ploče, cijevi ili lonca. Na površinu se keramike nanose tanki srebrni slojevi koji predstavljaju ploče kondenzatora. Na slojeve srebra spoje se izvodi. Tako nastali kondenzatori premazuju se bojom, a izrađuju se u vrijednostima od nekoliko desetaka pF do nekoliko tisuća pF, pri naponima od 750V. Odlikuju se povoljnim dielektričnim svojstvima i visokim izolacijskim otporom. Zbog negativnog temperaturnog koeficijenta ovi kondenzatori se upotrebljavaju za temperaturnu kompenzaciju u sklopovima, najčešće u titrajnim krugovima. Od keramike se izrađuju i provodni kondenzatori koji služe za provođenje metalnog vodiča kroz otvor u metalnoj ploči. Takva upotreba kondenzatora osigurava stabilan kapacitet između dotičnog vodiča i metalne ploče koja je najčešće dio uzemljenog dijela kućišta. Zbog velike dielektrične konstante mogu se izraditi kondenzatori malih dimenzija u obliku pločica, cijevi i štapića.



Slika 4.3.1 – 3 Primjeri izvedbe keramičkog kondenzatora

Kondenzatori od tinjca koriste tinjac kao dielektrik koji znatno povećava kapacitet kondenzatora. Izrađuju se tako da se listići tinjca najprije presvuku srebrnim praškom pomiješanim s odgovarajućim uljem. Tako obojeni listići se zatim zagrijevaju približno 1 sat do temperature od 600°C na kojoj se pasta pretvara u metalnu oblogu. Debljina listića tinjca je do 20 μm pa je i kapacitet kod kondenzatora malih dimenzija vrlo velik. Cijeli se kondenzator zatim zalije u bakelit da bi bio zaštićen od vlage i starenja. Ovi kondenzatori su vrlo stabilni i imaju vrlo mali temperaturni koeficijent kapaciteta pa se upotrebljavaju u preciznim mjernim uređajima, u VF telefoniji te odašiljačima.



Slika 4.3.1 – 4 Primjeri izvedbe kondenzatora od tinjca

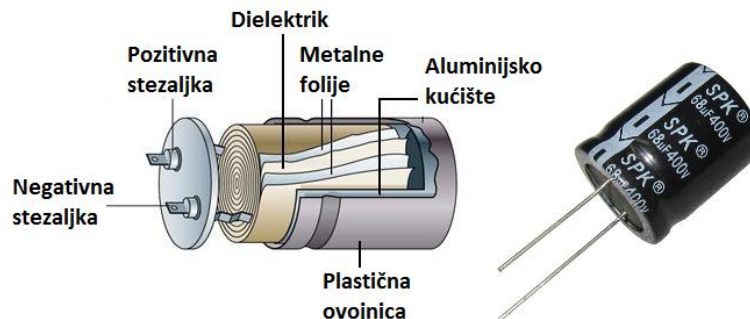
Kondenzatori od stakla koriste se za rad na visokim temperaturama, do 200°C, i tamo gdje je velika vlažnost. Izrađuju se na sličan način kao kondenzatori od tinjca, s tim da se nakon formiranja podvrgavaju visokom pritisku i temperaturi, pri čemu se stvara zaštitno stakleno kućište, tako da cijeli kondenzator predstavlja kompaktnu cjelinu. Mogu se izraditi za vrlo visoke radne temperature i radne napone. Najčešće se upotrebljavaju u odašiljačima.



Slika 4.3.1. – 5 Primjeri izvedbe kondenzatora od stakla

Elektrolitski kondenzatori razlikuju se od ostalih tipova kondenzatora po tome što se u njihovu kućištu nalazi elektrolit. Pozitivna obloga im je od aluminijske folije, a negativnu predstavlja elektrolit. Obloge razdvaja tanki oksidni sloj na aluminiju i služi kao dielektrik. U elektrolit se utapa savijena, formirana, aluminijska folija koja sa svojim izvodom čini pozitivni pol. Elektrolit je kompleksan spoj borne kiseline, glikola ili glicerina i amonijaka. Elektrolitom se impregnira papir, pa elektrolitski kondenzator postaje sličan papirnome kondenzatoru. Impregnirani papir se uvijek pa se tako dobiveni svitak stavi u posudu od aluminijske folije. Na taj način je negativni pol još u unutrašnjosti posude spojen na neformiranu aluminijsku foliju, koja predstavlja negativan pol, a pozitivan je pol izveden kroz izolirano dno. Kapacitet elektrolitskih kondenzatora ovisi o debljini aluminijskog oksida i o površini formirane aluminijske folije, pa se postiže kapacitet i 16 μF na 0.1 m^2 površine. Kapacitet se smanjuje sa snižavanjem temperature okoliša. Elektrolitski kondenzator moramo uvijek spojiti tako da formirana folija bude pozitivni pol, a elektrolit (kućište), negativan pol. U protivnom nastao bi elektrokemijski proces koji bi uništio oksidni sloj, a time i sam kondenzator. Zato su na kondenzatoru označeni polovi, a za izmjenične struje se mogu primijeniti samo nepolarizirani kondenzatori. Elektrolitski kondenzatori imaju i svojstvo regeneracije, tj. u slučaju proboja zbog protoka veće struje stvara se veća toplina koja uzrokuje stvaranje novog sloja oksida na mjestu proboja. Materijali za izradu ovih kondenzatora su aluminij i tantal. **Aluminijski kondenzatori** imaju veće gubitke od ostalih jer na višim temperaturama kada je stvaranje oksida ubrzano i struja gubitaka je znatno veća. Smanjenje ove struje postiže se primjenom što čišćeg aluminijskog oksida, ali faktor gubitaka svejedno je 0.25.

Zbog toga ovi kondenzatori nalaze primjenu gdje su potrebni veliki kapaciteti, uz dopuštene veće gubitke, npr. mrežni filtri i ispravljači te spojevi za odvod VF i NF struja. **Tantalovi kondenzatori** imaju veći kapacitet (volumno) od aluminijskih. Ostala svojstva su također bolja, pa su kapacitet i faktor gubitaka neovisni o frekvenciji i temperaturi u širokom području. Temperaturno područje upotrebe im je znatno šire, faktor gubitaka manji, a VF svojstva su bolja. Ovi kondenzatori se rabe u uređajima gdje su potrebni minijaturni i kvalitetni kondenzatori velikog kapaciteta uz male radne napone.



Slika 4.3.1 – 6 Primjer konstrukcije i izvedba elektrolitskog kondenzatora

4.3.2 KONDENZATORI PROMJENJIVOG KAPACITETA

Dijele se na **zakretne kondenzatore** i na **kondenzatore za fino namještanje**. Kapacitet ovih kondenzatora može se mijenjati u određenim granicama mehaničkim putem, najčešće zakretanjem osovine spojene s nizom ploča koje čine jednu oblogu kondenzatora. Kao dielektrik imaju najčešće zrak i izrađuju se od dva niza paralelnih ploča od kojih je jedan stator, nepomičan dio, a drugi rotor, pomičan dio, koji se okreće oko osovine. Pri zakretanju osovine pločice rotora mijenjaju položaj u odnosu na stator. Tako se mijenja kapacitet. Rotor i stator moraju biti izolirani jedan od drugog, a kao izolacijski materijali se koriste držači od keramike ili kvarca. Izolacijski držači određuju izolacijski otpor kondenzatora koji može iznositi i 10 MΩ. Gubici uglavnom potječu od otpora dovoda koji je znatan na višim frekvencijama uslijed skin efekta. Česte su izvedbe i dvostrukih ili trostrukih kondenzatora koji imaju više rotora spojenih na jednu osovinu. Takvi kondenzatori služe u radioprijemnicima gdje je potrebno istovremeno mijenjati rezonantnu frekvenciju u nekoliko titrajnih krugova. Kondenzatori za podešavanje zovu se još i polupromijenjivi kondenzatori ili **trimeri**. Predviđeni su za podešavanje kapaciteta samo pri proizvodnji ili popravku uređaja u koji su ugrađeni. Malih su dimenzija, najčešće zračni ili keramički, a dodaju se nekom većem kondenzatoru paralelno kako bi se ukupan kapacitet mogao točno regulirati.



Slika 4.3.2 – 1 Primjer konstrukcije i izvedbe zakretnog kondenzatora

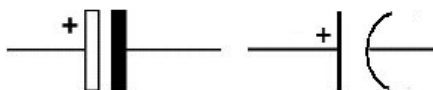


Slika 4.3.2 – 2 Primjer konstrukcije i izvedbe polupromijenjivog kondenzatora ili trimera

Kondenzator
stalnog
kapaciteta



Polarizirani
(elektrolitski)
kondenzator



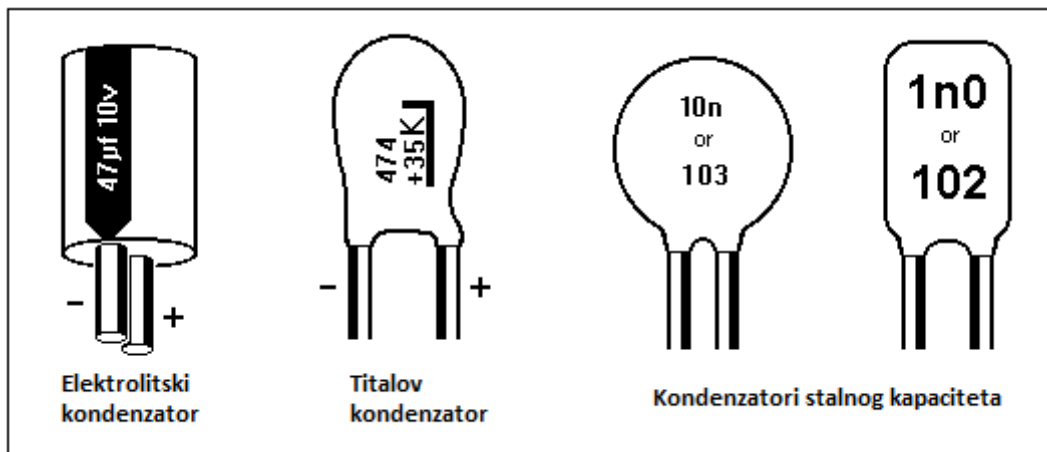
Kondenzator
promjenjivog
kapaciteta



Trimer
kondenzator



Slika 4.3 – 2 Simboli kondenzatora



Slika 4.3. -3 Prikazi kućišta kondenzatora

4.4. MATERIJALI I VRSTE ZAVOJNICA

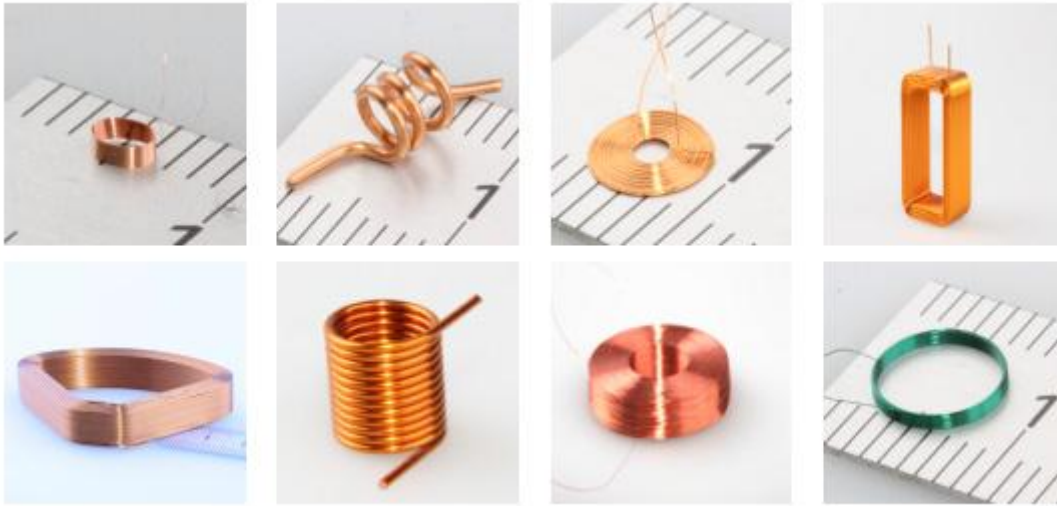
Zavojnice se obično sastoje od žice koja se namata ili unakrsno u jednom ili više slojeva. Nosač ili tijelo zavojnice je izrađena od impregniranog papira, drveta, sintetičkog ili sličnog materijala. Najčešće ima oblik šupljeg cilindra (valjka). Vodič od kojeg je izvedena zavojnice najčešće je bakar, izoliran lakom, rijetko pamukom ili svilom. **Induktivitet** je mjera suprotstavljanja zavojnice protjecanju promjenjive struje. Induktivitet znači izvjesnu tromost prema promjenama struje. Jedinica za mjerenje induktiviteta je henri (H), prema američkom fizičaru Josephu Henryju.

Zavojnice može se podijeliti prema namjeri: za niske frekvencije (NF) i visoke frekvencije (VF). Dok prema izvedbi na: **zavojnice s jezgrom** i **zavojnice bez jezgre**. Kao jezgra NF zavojnice upotrebljavaju se međusobno izolirani transformatorski limovi. Dok se za VF zavojnice koristi posebnu VF jezgre (dobivaju se sintetički).

4.4.1 ZAVOJNICE BEZ JEZGRE

Zavojnice bez jezgre ne koriste magnetsku jezgru izrađenu od feromagnetskog materijala, nego koriste nemagnetske materijale npr. plastiku, keramiku, te sami zrak. Zavojnice sa zračnom jezgrom imaju manji induktivitet nego zavojnice sa feromagnetskom jezgrom, ali se često koriste pri visokim frekvencijama, jer su bez gubitaka energije koji se javljaju u feromagnetskim jezgrama pri povećanju frekvencije.

Gubitci se mogu javiti ukoliko oblik zavojnice nije dovoljno čvrst pri mehaničkim vibracijama namota. Kako bi se smanjio paraziti kapacitet i blizina pojedinih zavoja, konstruirana je radiofrekvencijska (RF) zavojnica. Namoti RF zavojnice često je puta ograničena na jedan sloj sa dovoljnim razmakom između susjednih zavoja. Kod zavojnica velikih snaga, kao što su one u odašiljačima, namoti su ponekad izrađeni od metalnih srebrnih traka ili cijevi koje imaju veću površinu, a sve u svrhu smanjenja utjecaja vrtložnih struja (skin efekt).



Slika 4.4.1 – 1 Primjeri izvedbe zavojnice bez jezgre

4.4.2 ZAVOJNICE S JEZGROM

Zavojnice s jezgrom najčešće koriste za izradu jezgri feromagnetske ili ferimagnetske materijale kao što su željezo ili ferit. Takve zavojnice osim gubitaka u namotu (gubici u bakru) imaju dodatne gubitke koji se javljaju u jezgri, zbog zagrijavanja, te rasipanje toka. Gubici u željezu jezgre nastaju uslijed izmjeničnog magnetiziranja, a čine ih gubici histereze (razmjerni su površini histereze) i gubici uslijed vrtložnih struja. Osim u džulima (energija), gubici se često izražavaju pomoću pripadnih snaga, dakle u vatima. Materijali za izradu feromagnetskih jezgri su: čisto željezo, meki čelik, legure željeza i silicija, legure željeza i nikla, legure željeza, silicija i aluminijska i dr. Izrađuju se u potrebne oblike: lijevanjem, kovanjem, sinteriranjem. Primjena mekomagnetskih jezgri je za istosmjerno magnetiziranje, te tvrdomagnetske jezgre za permanentne magnete. Mekomagnetske jezgre za izmjenične frekvencije (od industrijskih 50 Hz do 100 kHz) moraju biti izolirane, stoga se koristi: papir, lak, oksidi, fosfati i drugi anorganski kemijski spojevi.

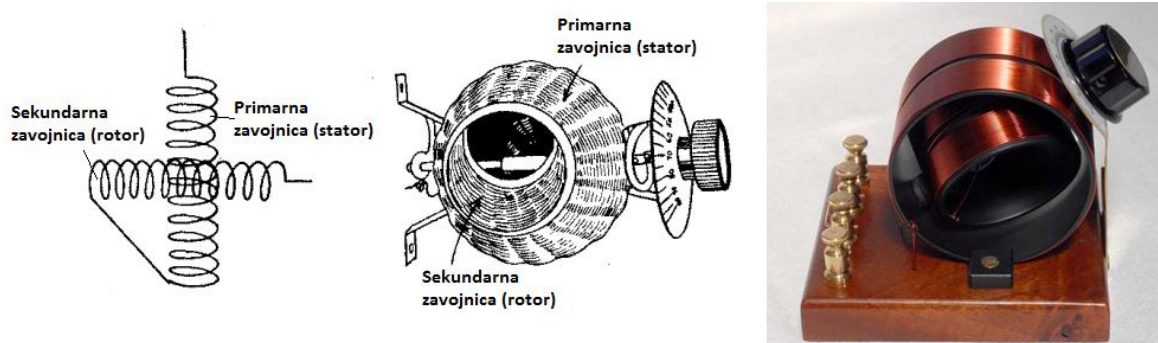


Slika 4.4.2 -1 Primjeri izvedbe zavojnica s jezgrom

4.4.3 PROMJENJIVE ZAVOJNICE

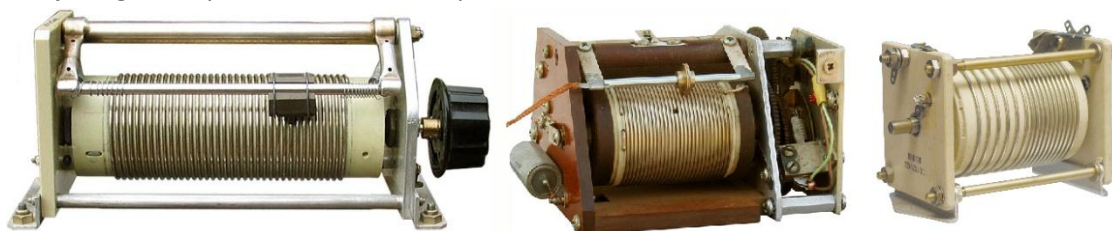
Postoje mnoge izvedbe promjenjivih zavojnica, a osnovna im je funkcija promjena induktiviteta.

Variometar se sastoji od para zavojnica koje su raspoređene na takav način da se os jedne može okretati u odnosu na os druge. Zavojnice su obično spojene u serijskom spoju, i rotiranje jedne zavojnice mijenja zajednički međuinduktivitet. Ovisno o smjeru i jačini magnetskog polja imamo povećanje ili smanjenje induktiviteta, gdje je međuinduktivitet pozitivnog ili negativnog iznosa. Međuinduktivitet je nula ako osi dvaju zavojnica pod pravim kutom. Glavni nedostatak korištenja variometar kao promjenjivi induktivitet jest u tome što dužina vodiča ostaje konstanta. To znači da je otpor zavojnice nepotrebno visok za male vrijednosti induktiviteta i mali frekvencijski spektar rada. Zbog navedenih nedostataka, korištenje variometra kao promjenjivi induktivitet nije dobra praksa. Koriste se tamo gdje je potrebna promjenjiva veza između različitih dijelova mreže.



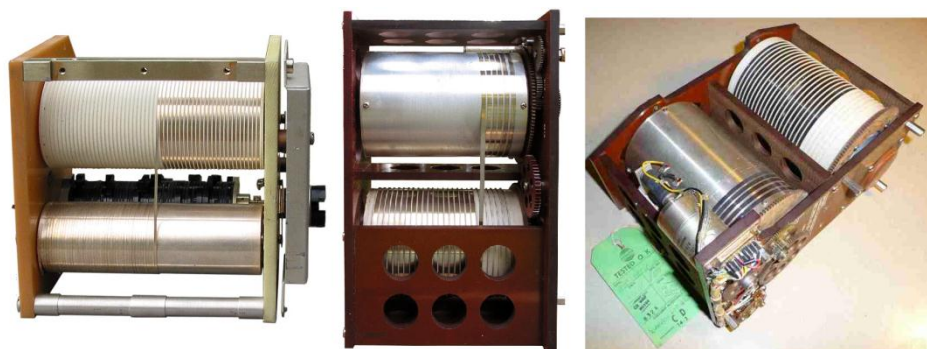
Slika 4.4.3 – 1 Primjeri konstrukcije i izvedbe variometra

Roller zavojnice imaju tu prednost da se duljina vodiča smanjuje kako se smanjuje induktivitet. To drži otpor zavojnice na svom praktičnom minimum i omogućava relativno visoki Q faktor čak i na manjim rasponima induktiviteta. Veliki nedostatak roller zavojnica leži u činjenici da su neiskorišteni zavoji magnetski povezani s onima u uporabi.

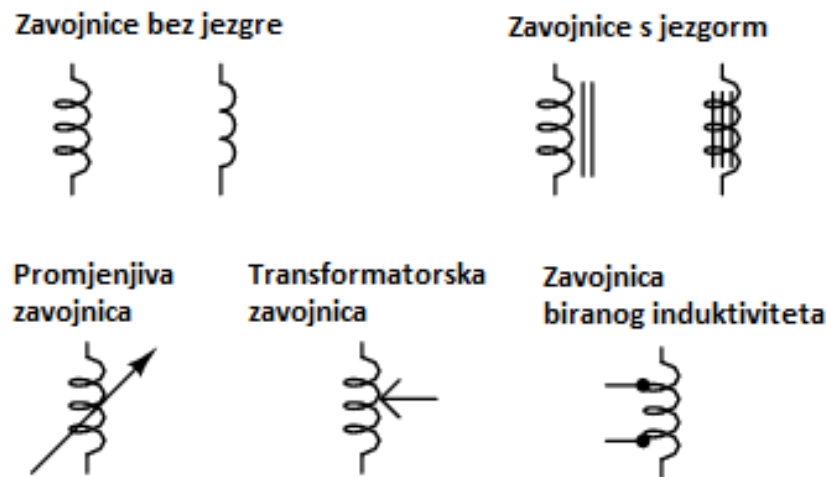


Slika 4.4.3 – 2 Primjeri izvedbi roller zavojnica

Zavojnice s bubnjem su "bez kompromisna" rješenja problema pri izradi promjenjivih zavojnica. Za bilo koju postavku, induktivitet uvijek ima najkraću duljinu vodiča, a time i najveći moguću vrijednost faktora Q i samorezonantnu frekvenciju unutar ograničene geometrijske izvedbe. Loša strana je kompleksnost. Rotacije dvaju cilindara mora biti sinkronizirana pomoću zupčanika, a vodič mora biti dobro zategnut. Također je potrebno je predstartno vrijeme u kojem bubanj namješta duljinu vodiča za namještenu vrijednost induktiviteta. Zavoji se izrađuju od tanke mjedi ili čvrstog bakra zbog mogućih plastičnih deformacija materijal pri namatanju i odmatanju.



Slika 4.4.3 – 3 Primjeri izvedbe zavojnice s bubnjem



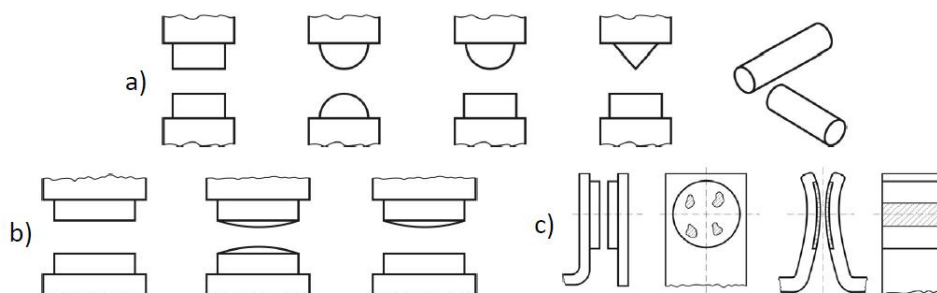
Slika 4.4. -1 Simboli zavojnica

4.5. MATERIJALI ZA ELEKTRIČNE KONTAKTE

Električni kontakti su elementi u sklopnim aparatima. Sklapaju struju ili je prenose s jednog provodnog elementa na drugog. To su konstrukcijski sklopovi, u kojima se kontakti između pojedinih provodnih elemenata ostvaruju pritiskanjem jednog na drugi element, pomoću kontaktnih opruga ili vijaka, spojnih dijelova s navojem ili na neki drugi način. Električni kontakti moraju jasno razdvajati uključeno i isključeno stanje i biti pouzdani. Materijal i konstrukcija moraju zadovoljavati postavljene zahtjeve; električne, mehaničke, kemijske, toplinske. Bez obzira na moguće razlike u izvedbi, od električnog kontakta se traži da imaju dobra električna vodljivost (mali kontaktni otpor), dobru toplinsku vodljivost, mehaničku i kemijsku otpornost te otpornost na visoke temperature. Električne kontakte prema njihovoj namjeni možemo podijeliti na:

- rastavljače – otvaraju u praznom hodu
- sklopke – sklapaju normalni pogon
- prekidače – prekidaju kratkotrajno struje kratkog spoja
- pokretače – koriste se kod pokretanja motora, ograničenje struje
- regulatore – reguliraju određenu veličinu
- osigurače – prekidaju kod određenih veličina
- odvojnike napona
- releje – mjere, te sklapaju

Kod **kontakata za mala opterećenja** je karakteristično da se na njima ne stvaraju oksidni i sulfidni spojevi koji povećavaju otpornost. Rade bez električnog luka i s malim pritiscima. Kontakti za mala opterećenja su: vremenski releji, mjerni preklopnici, precizni kontakti u instrumentima. Kod **kontakata srednjih opterećenja** moguć je luk i trošenje uz povećanje temperature. Značajnije primjene su za opterećene telefonske i telegrafske releje. Kod **kontakata velikih opterećenja** su veliki pritisci i obavezan luk. Električni luk probija sve nečistoće pa kemijska svojstva nisu od značaja. Postoje izvedbe koje rade u ulju ili vakuumu.



Slika 4.5 – 1 Različiti oblici kontakata za: a) mala b) srednja i c) velika opterećenja

U ovisnosti od jakosti struje postoje uglavnom dvije vrste kvarova; korozija i erozija kontakta. Pod erozijom se podrazumijeva raspršenje materijala kontakta. Dolazi i do prijelaza materijala s jednog na drugi kontakt. Pri jako velikim strujama može doći i do zavarivanja kontakata.

Materijali za električne kontakte se biraju na osnovi:

- zadanih pogonskih uvjeta (vrsta, funkcija, vrsta opterećenja, okolina, primjena)
- tehničkih zahtjeva (električki, toplinski, mehanički, kemijski, tehnološki)
- potrebnih fizikalnih svojstava (električna vodljivost, toplinska vodljivost, tvrdoća, svojstva mikrosloja, regeneracija)

Kontaktne materijale dijele se u tri osnovne skupine: čisti metali, legure, sinterirane kombinacije. Ponekad se koriste i obloženi (platirani) materijali. Postupak sinteriranja je vrlo složen i skup, pa se od sinteriranih kombinacija nikada ne izrađuju čitavi kontakti, već samo oni dijelovi koji su najviše izloženi zavarivanju i nagaranju. Za kontakte za mala opterećenja koriste se čisti metali (uglavnom plemeniti metali).

Čisti metali koji se koriste su:

- visokovodljivi metali (srebro, zlato, bakar i dr.)
- kemijski otporni metali (platina, paladij, rodij, renij, iridij i dr.)
- teško taljivi metali (volfram i molibden)
- srednji metali (nikal)

Legure koje se koriste su:

- visokovodljive (srebro – bakar, srebro – nikal, srebro – kadmij, srebro – bronca)
- kemijski otporne (srebro – paladij)

Sinterirane kombinacije materijala koje se koriste su:

- bakar s teško taljivim metalima (bakar – volfram, bakar – volframov karbid)
- srebro s metalnim oksidima (srebro – kadmijev oksid, srebro – kositrov oksid)
- srebro s teško taljivim metalima i karbidima (srebro – volfram, srebro – molibden, srebro – nikal, srebro – željezo)
- srebro s nemetalima (srebro – grafit)

4.6. MATERIJALI ZA ČETKICE STROJA

Električni kontakti ostvaraju se u električnim strojevima pomoću četkica. **Četkice** su klizni kontakti. Moraju se podmazivati. Komutacija i patina su važne karakteristike četkica. **Komutacija** je sposobnost četkice da pod teškim električkim i mehaničkim uvjetima osigura prijenos struje bez iskrenja uz minimalnu potrošnju kliznog kontakta. Aktivni plinovi i soli slabe komutaciju, uvjetuju porast temperature što izaziva povećanje otpora. **Patina** je:

- oksidna metalna prevlaka (bez korozivnih plinova) tijesno povezana s metalom koji se nalazi pod njom. Metalna patina je debljine do 0.02 μm (crveni oksidul Cu_2O , crni oksid CuO).
- fine čestice ugljika. Patina koja sadrži ugljik mijenja boju (intenzitet crnila). Prelazni sloj - ugljik u oksidu čija debljina ovisi o struji.

Posebne osobine materijala za proizvodnju četkica su: dobra sposobnost komutacije, mala električna otpornost, mali pad napona, mali ukupni gubici, jednolika raspodjela struje, velika električna i termička opteretivost, mala potrošnja četkice i kolektora, mali koeficijent trenja, mala količina pepela, dovoljna tvrdoća, dovoljna čvrstoća na savijanje i samopodmazivanje.

Za izradu četkica koristi se **ugljik** jer svojim svojstvima najbolje udovoljava zahtjevima, stoga imamo:

- **amorfne** (ugljene) – žarena čađa i petrokoks uz zagrijavanje do 1100 °C.
- **elektrografitne** – žarena čađa i petrokoks uz zagrijavanje bez zraka više od 2500 °C. Mekše su od amorfni i imaju najširu primjenu.

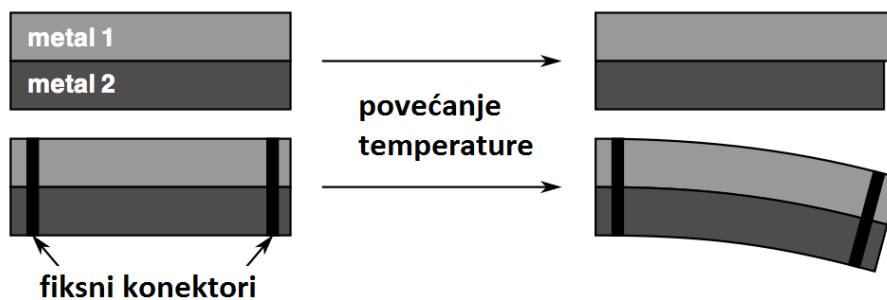
- **grafitne** – grafit i elektrografit uz zagrijavanje do 1300 °C i miješanje s dodatcima i aglomeriranje, što ih čini mekanim i elastičnim.
- **bakelitgrafitne** – grafit i elektrografit uz zagrijavanje do 180 °C i aglomeriranje pomoću fenolformaldehidnih smola, što ih čini mehanički tvrdim.
- **metalografitne** – metalna prašina bakra ili aluminija te prirodni grafit plus vezivo uz zagrijavanje do 180 °C i vezanje pomoću fenolformaldehidnih smola, što ih čini dosta teškim.



Slika 4.6 -1 Primjeri izvedbe četkica strojeva

4.7. MATERIJALI ZA TERMOBIMETALE

Termobimetali su dva čvrsto povezana sloja metala ili njihovih legura s različitim temperaturnim koeficijentima istezanja. Kod zagrijavanja dolazi do različitog istezanja svakog od njih, te se cijela kombinacija savija na stranu materijala s manjim temperaturnim koeficijentom istezanja. Područje upotrebe je od -20 do 250 °C. U pravilu bi se mogla upotrijebiti bilo koja dva metala koja imaju vrlo različite temperaturne koeficijente istezanja. Potrebna je odgovarajuća čvrstoća materijala i da je razlika električnih potencijala što manja zbog elektrokorozije. Najčešće se kao jedan materijal upotrebljava **invar** (64% Fe, 36% Ni) zbog vrlo malog temperaturnog koeficijenta istezanja. Također koristi se još mjed, nikal, konstantan i legure željeza s niklom i manganom.



Slika 4.7 -1 Termobimetali pri povećanju temperature

4.8. MATERIJALI ZA TERMOELEMENTE

Termoelement je vodljivi spoj dvaju različitih metala ili legura, kod kojih se na slobodnom kraju javlja potencijalna razlika, koja je proporcionalna razlici temperatura spojenog i slobodnog kraja. Potencijalna razlika se naziva **termoelektromotorni napon**. Za kontakti potencijal je mjerodavna razlika u izlaznoj radnji i broju elektrona koji je različit za razne materijale. Ako je zatvoren krug ili ista temperatura na oba kraja nema razlike potencijala. Termoelementi se koriste za mjerenje temperature, regulacija, signalizacija. Mjereni naponi su reda veličine mV, a područje upotrebe se poklapa s područjem linearnosti i toplinske postojanosti (od 0 do > 1000 °C).



Slika 4.8 -1 Prikaz i primjeri izvedbe termoelementa

4.9. MATERIJALI ZA RASTALNE OSIGURAČE

Rastalni osigurač je element u strujnom krugu, koji u normalnim prilikama u strujnom krugu omogućuje tok struje, ali kad struja prijeđe kritičnu vrijednost svojim rastaljivanjem prekida strujni krug. Aktivni dio rastalnog osigurača je topljivi umetak (uložak) koji je izrađen tako da se može zamjenjivati unutar određenog osiguračkog sustava. Najčešći osigurački sustavi su:

- D osigurački sustav,
- D0 osigurački sustav,
- NH (NV) osigurački sustav,
- G (L) osigurački sustav – mali osigurači za zaštitu aparata
- HH osigurački sustav – VN osigurači za napone 1 – 36 kV

Klasifikacija osigurača prema funkcionalnim i pogonskim razredima:

- funkcionalne osobine niskonaponskih osigurača – prema I/t karakteristici
- funkcionalni razred – u kojem strujnom području rastalni uložak treba isključiti
- funkcionalni razred g – osigurači za opću upotrebu
- funkcionalni razred a – osigurači za pojedina područja (kod upotrebe rastalnih uložaka *tipa a* moramo za zaštitu od preopterećenja upotrijebiti neki drugi zaštitni organ jer on štiti samo od kratkog spoja)

Pogonski razredi osigurače određeni su slovima koji imaju simbole:

- L – kabeli i vodovi,
- M – sklopni aparati,
- R – poluvodiči,
- B – postrojenja u rudarstvu,
- Tr – energetske transformatori.
- gL – opća zaštita kabela i vodova,
- aM – posebna zaštita sklopni aparata itd.

Prednosti rastalnih osigurača su: velika prekidna moć, velika brzina djelovanja, niska cijena i jednostavna izvedba. **Nedostaci** rastalnih osigurača su: samo za jednokratnu upotrebu, prekidaju samo jednopolno, nisu primjereni za uklapanje pod teretom, prekid signaliziraju samo optički, ne omogućuju blokade i rad s njima nije dovoljno siguran. Potreban je vodički materijal, takav da omogućuje rastaljivanje kod određene prekomjerne struje, a dolaze u obzir metali i legure:

- Srebro se može koristiti za sve struje, ima točno talište, može se precizno dimenzionirati naročito za manje struje (instrumenti) < 3 A.
- Bakar za opće svrhe u obliku veoma tankih žica.
- Aluminij je neprecizan, velika toplinska tromost, velika specifična toplota, izdrži preopterećenja, upotrebljava se za trome osigurače, niski napon velike struje.
- Cink (Zn) ima nisko talište, ali treba biti oprezan jer pri naglom taljenju dolazi do prskanja što može uzrokovati stvaranje vodljivog sloja na površini kućišta osigurača.
- Legura Ag/Cu (50% / 50%) za velike struje.
- Legura Pb/Sn za srednje struje, mehanički mekana, nisu za izvlačenje tankih niti.



Slika 4.9 – 1 Primjeri izvedbe rastalnih osigurača

4.10. PITANJA ZA PROVJERU ZNANJA

1. Definirajte što su otpornici.
2. Koje su sve vrste otpornika stalne otpornosti?
3. Koji materijali se koriste za izradu ugljenoslojnih otpornika?
4. Koji materijali se koriste za izradu metal-film otpornika?
5. Koji materijali se koriste za izradu žičanih otpornika?
6. Navedite sve izvedbe potencimetara te koje su im razlike?
7. Navedite sve otpornike s posebnim svojstvima.
8. Koja su svojstva i simbol NTC otpornika?
9. Koja su svojstva i simbol PTC otpornika?
10. Što su varistori? Nacrtajte simbol.
11. Kako se izrađuju varistori?
12. Što su fotootpornici i kako rade?
13. Nacrtajte simbol fotootpornika i navedite od kojih materijala se izrađuju.
14. Koje su opće karakteristike regulacijskih i tehničkih otpornika?
15. Koji materijali se koriste pri izradi regulacijskih i tehničkih otpornika?
16. Koji materijali se koriste pri izradi preciznih otpornika?
17. Definirajte što su kondenzatori.
18. Definirajte što je električni kapacitet.
19. Kako možemo sve podijeliti kondenzatore?
20. Gdje se koriste papirnati kondenzatori?
21. Kako se izrađuju kondenzatori s metaliziranim papirom?
22. Kako se izrađuju kondenzatori s plastičnim i metalnim folijama?
23. Kako se izrađuju keramički kondenzatori?
24. Kako se izrađuju kondenzatori od tinjca i stakla?
25. Na koji način su izrađeni elektrolitski kondenzatori?
26. Koja su svojstva elektrolitskih kondenzatora?
27. Koje su sve vrste promjenjivih kondenzatora?
28. Koji su sve simboli kondenzatora?
29. Definirajte što su zavojnice.
30. Definirajte što je induktivitet.
31. Koje materijale koriste zavojnice bez jezgre.
32. Koje materijale koriste zavojnice s jezgrom?
33. Koji gubitci se javljaju kod zavojnica s i bez jezgre?
34. Navedite sve vrste promjenjivih zavojnica.
35. Kako izgledaju simboli svih vrsta zavojnica?
36. Definirajte što su električni kontakti?
37. Kako možemo podijeliti električne kontakte prema namjeni?
38. Kako se sve biraju materijali za izradu električnih kontakata?
39. Koji se sve materijali koriste za izradu električnih kontakata?
40. Definirajte što su četkice električnih strojeva?
41. Koji materijali se koriste za izradu četkica električnih strojeva?
42. Definirajte što su termobimentali.
43. Koji materijali se koriste za izradu termobimetala?
44. Definirajte što su termoelementi? Navedite za što se koriste.
45. Definirajte što su rastalni osigurači.
46. Navedite najčešće osiguračke sustave.
47. Koje su prednosti i nedostaci rastalnih osigurača?
48. Koji materijali se koriste u izradi rastalnih osigurača?

5. POLUVODIČKI MATERIJALI I ELEM.

5.1. SILICIJ



Silicij je nemetal i čini 27% Zemljine kore, pretežno u obliku silikata i oksida. Dobivanje elementarnog silicija prilično je teško, a može se provesti na više načina. Jedna od metoda dobivanja silicija je termička redukcija kvarca (SiO_2) koksom u električnim pećima pri temperaturi višoj od 1800°C . Dobiveni silicij ima čistoću 98%, a sadrži 0.5% Fe, 0.4% Al, a ostalo su manje količine primjese drugih metala: Cr, Ca, Mg, Mn, Ti i V. **Praškasti silicij** može se dobiti redukcijom K_2SiF_6 elementarnim kalijem. Nakon hlađenja taline masa se otapa u vodi čime se topljivi KF odvaja od smeđeg praha silicija. Za dobivanje **kristaličnog silicija** primjenjuje se metoda redukcije SiO_2 pomoću suviška aluminija. U tom se procesu prethodno dobiven silicij otapa u suvišku rastaljenog aluminija, a izdvajanje iz otopine vrši se tako da se nakon hlađenja aluminij otopi kiselinom, a kristalni silicij ostane neotopljen. U poluvodičkoj tehnologiji važni su jedino vrlo čisti monokristali silicija pa ga je potrebno pročititi bez obzira na metodu dobivanja. Obično se provodi zonskim taljenjem, pri čemu se, osim pročišćavanja, dobiva i **monokristalni silicij**. Osim zonskim taljenjem u vakuumu, **vrlo čisti silicij** dobiva se redukcijom ultračistog triklorosilana (SiHCl_3) vodikom. Proces se odvija pri temperaturi $1000 - 1300^\circ\text{C}$ u reaktoru u kojem se nalazi štapić vrlo čistog silicija na kojem se talože (u biti rastu) novi kristali silicija procesom kristalnog rasta. Pri tom se moraju održavati vrlo stabilni kemijski i temperaturni uvjeti.

5.1.1 SVOJSTVA SILICIJA

OSNOVNA SVOJSTVA SILICIJA	
Specifična masa	2.329 kg/dm^3
Atomska težina	28.085
Redni broj	14
Električna vodljivost	$0.1 \cdot 10^{-12} \text{ Sm/mm}^2$
Temperaturni koef. istezanja	$2.6 \cdot 10^{-6} / \text{K}$
Talište	2577°C
Vrelište	5909°C
Toplinska vodljivost	149 W/mK
Toplina taljenja	1790.26 kWs/kg
Temperaturni koef. otpora	$-3.48 \cdot 10^{-3} / \text{K}$

Tablica 5.1.1 Osnovna fizikalna i tehnološka svojstva silicija

Tehnologija poluvodiča razvijala se ogromnom brzinom zadnjih tridesetak godina, uvođenjem fotolitografskih postupaka kojima se minijturni poluvodički elementi i cijeli strujni krugovi ugrađuju na silicijsku pločicu veličine par kvadratnih centimetara.

5.1.1.1 Tehnološka i mehanička svojstva

Silicij je tipičan poluvodič i javlja se u dvije alotropske modifikacije: **amorfnoj**, koja se može dobiti termičkom razgradnjom SiCl_4 pri 800°C i **kristalnoj** dijamantne strukture. Kristali silicija su sivkasti i tvrdi, a imaju metalni sjaj. Amorfni silicij u obliku je smeđeg praha koji se lako tali, odnosno isparava. Čist kristal i silicij loš je vodič električne struje, dapače, izolator je, ali mu vodljivost raste s povišenjem temperature i dodatkom malih količina elemenata III.B i V.B skupine periodnog sustava - u prvom redu bora, galija, fosfora i arsena. Obogaćen navedenim primjesama može biti **n** ili **p-tipa** i kao takav danas predstavlja osnovu informatičke tehnologije. Današnja tehnologija čipova ide prema još većoj

minijaturizaciji uvođenjem novih fotolitografskih tehnika koje koriste kratkovalno ultraljubičasto ili rendgensko zračenje za izradu što minijaturnijih elemenata.

5.1.1.2 Kemijska svojstva

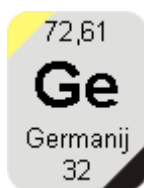
Silicij je kemijski prilično inertan. Pri sobnoj temperaturi postojan je na zraku, a zagrijavanjem u oksidacijskoj atmosferi prevlači se slojem oksida (SiO_2) koji sprječava daljnju oksidaciju. Kristalni silicij se ne otapa u kiselinama, osim fluorovodičnoj, ali zato čak i sa slabim lužinama reagira vrlo živo uz oslobađanje vodika. Pri sobnoj temperaturi reagira s fluorom uz pojavu plamena dajući silicijev tetrafluorid, a s ostalim halogenim elementima reagira pri višim temperaturama. Pri visokim temperaturama reagira s dušikom (1400°C) i brojnim metalima dajući silicide, legure ili intermetalne spojeve. U spoju s kisikom tvori beskonačnu, periodičnu tetraedarsku strukturu u kojoj je jedan atom silicija okružen sa četiri atoma kisika.

Silicij ima tri stabilna izotopa ^{28}Si (92,23%), ^{29}Si (4,67%) i ^{30}Si (3,10%), a poznat je veći broj radio aktivnih izotopa od kojih izotop ^{32}Si ima najdulje vrijeme poluraspada ($t_{1/2} = 160 \text{ g.}$) i raspada se bez emisije γ -zračenja. Osim kao poluvodički materijal, silicij se upotrebljava za dobivanje legure sa željezom (tzv. ferosilicij koji uz željezo sadrži 50 do 98% Si), a u metalurgiji se koristi kao sredstvo za dezoksidaciju rastaljenih metala i za izradu silicijevih antikorozivnih čelika otpornih prema kiselinama. Ti se čelici koriste za izradu aparatura u procesnoj kemijskoj industriji. Vrlo široku upotrebu imaju razni silikati, npr. za dobivanje stakala, keramika, emajla, cemenata (betona), opeka, vatrostalnih materijala, azbesta i raznih drugih industrijskih proizvoda.



Slika 5.1 – 1 Primjeri korištenja silicija

5.2. GERMANIJ



Germanij je metal kojeg ima u zemljinoj kori ima oko 0,0007% i nije elementaran (čist) nego se nalazi u raznim spojevima. Germanij se dobiva redukcijom germanijevog (IV) – oksida (GeO_2) vodikom. U proizvodnji se stoga mora prethodno dobiti oksid. Za dobivanje oksida koriste se različiti postupci čiji je izbor određen polaznom sirovinom. Najčešće su sirovine cinkove ili bakrove nečistoće u obliku praha nastalog preradom tih metala, a mogu biti i ugljeni ostaci ili koncentrat renierita. U praksi se najčešće koristi praškasti otpad nastao preradom cinkovih ruda, a manje ugljeni ostaci. No zbog velikih zaliha ugljena u odnosu na cinkove rude i ova sirovina dobiva na važnosti u dolazećem razdoblju. Nastali **germanijev oksid** (GeO_2) sadrži primjese oksida drugih metala. Pročišćavanje GeO_2 provodi se tako da se otapanjem u koncentriranoj klorovodičnoj kiselini (HCl) sve prevede u kloride, zatim se frakcijskom destilacijom izdvoji hlapljivi germanijev (IV) – klorid (GeCl_4) i hidrolizom ponovno prevede u GeO_2 . Sljedeći korak je redukcija vodikom, za koju se koristi vrlo čisti vodik prethodno pročišćen prolaskom kroz kolone. Da bi se smanjili gubitci GeO_2 sublimacijom, redukcija se najprije izvodi pri temperaturi $630 - 650^\circ\text{C}$, zatim pri $680 - 700^\circ\text{C}$ i na kraju pri $750 - 800^\circ\text{C}$. Nakon toga se

nastali praškasti germanij rastali pri temperaturi od 1000 – 1100 °C i ohladi uz davanje oblika prikladnog za rafinaciju. Budući da je za poluvodičku industriju potreban germanij izuzetno visoke čistoće ($1 : 10^{10}$), pročišćavanje germanija vrši se metodom zonskog taljenja. **Metoda zonskog taljenja** sastoji se u tome da se materijal (obično u obliku štapića) lokalno jako zagrije i rastali na samo jednom dijelu u uskoj zoni, a taj rastaljeni (grijani) dio se pomiče prema drugom kraju pomicanjem svitka koji vrši zonsko zagrijavanje. Pri tom se dio kroz koji je zona prošla skrutne. Postupak putovanja rastaljene zone višestruko se ponavlja, a na krajevima štapića (mjestima početka i završetka putovanja zone) dolazi do koncentriranja nečistoća. Efekt se javlja zbog različite topljivosti nečistoća u tekućoj i čvrstoj fazi. Topljive nečistoće putuju s grijanom zonom prema dnu, a manje topljive nakupljaju se na vrhu štapića. Na krajevima nakupljene nečistoće odvoje se rezanjem tih rubnih dijelova.

5.2.1 SVOJSTVA GERMANIJA

OSNOVNA SVOJSTVA GERMANIJA	
Specifična masa	5.323 kg/dm ³
Atomska težina	72.63
Redni broj	32
Električna vodljivost	$0.46 \cdot 10^{-6}$ Sm/mm ²
Temperaturni koef. istezanja	$6 \cdot 10^{-6}$ / K
Talište	938.25 °C
Vrelište	2833 °C
Toplinska vodljivost	60.2 W/mK
Toplina taljenja	508.535 kWs/kg
Temperaturni koef. otpora	$-3.411 \cdot 10^{-3}$ / K

Tablica 5.2.1 Osnovna fizikalna i tehnološka svojstva germanija

Danas se posebno proučavaju legure germanija i silicija koje imaju veliku potencijalnu primjenu u termo – električnim generatorima jer iznad 600°C pokazuju znatno povećanje električne efikasnosti (po jedinici mase), a bez znakova korozije ili degradacije legure.

5.2.1.1 Tehnološka i mehanička svojstva

Germanij je sivobijeli, jako krhak polumetal koji ima kubične kristale dijamantske strukture. Uz silicij je danas jedan od najvažnijih poluvodičkih elemenata. Potpuno **čist germanij** je tzv. **intrinzični poluvodič** što znači da nije vodljiv na vrlo niskim temperaturama, ima neznatnu vodljivost pri sobnim temperaturama, a s povišenjem temperature vodljivost mu eksponencijalno raste s temperaturom. Razlog takvom ponašanju je relativno mali energetska razmak ("gap") između valentnog i vodljivog pojasa (iznosi oko 0.7 eV) te je s povećanjem temperature sve veći broj termički pobuđenih elektrona koji prelaze u vodljivi pojas i doprinose vodljivosti kristala. Na vodljivost ovakvog poluvodiča može se znatno i vrlo efikasno utjecati dodavanjem kristalu germanija primjesa elemenata treće ili pete skupine (galija ili arsena). Ove primjese stvaraju lokalizirana energetska stanja unutar energetskog procjepa te na taj način povećavaju vodljivost kristala, a svi atomi primjesa u matičnom kristalu otpuste (ako je primjesa peterovalentna) ili prime (ako je primjesa trovalentna) po jedan elektron. U drugom slučaju, u poluvodiču se generiraju "šupljine" koje efektivno djeluju kao pozitivni nosioci naboja. Na taj način količina primjesa određuje broj slobodnih elektrona (odnosno "šupljina"), a time i vodljivost kristala. Kontrolirano dodavanje primjesa zove se **dopiranje**, a provodi se procesom difuzije iz plinovitog stanja primjese. Dopirani kristal germanija zovemo poluvodič. Kao takav, germanij danas ima ogromnu primjenu kod izrade velikog broja poluvodičkih elemenata (dioda, tranzistora, poluvodičkih sklopnih elemenata, integriranih krugova i drugih). Druge primjene germanija su za izradu optičkih elemenata (leća i zaslona) za infracrveno (IC) područje spektra zbog velike propusnosti kristala germanija na IC zračenje valnih duljina od 2 - 12 mm. Kao dopirajuća primjesa u kvarcu (SiO₂) koristi se pri izradi svjetlovodnih kablova. Germanij se koristi i kao legirajući element nekih metala kao što su kositar, aluminij, magnezij i zlato. Dodatak 0.35% germanija kositru udvostručuje tvrdoću. Legura kositra i zlata s dodatkom germanija koristi se za lemljenje plemenitih metala (nakita, npr.) te u zubotehnici.

5.2.1.2 Kemijska svojstva

Od kemijskih karakteristika treba spomenuti da je na zraku postojan i pri sobnoj temperaturi zadržava sjaj. U atmosferi kisika iznad 400°C i u dušičnoj kiselini (HNO_3) stvara se površinski oksidni sloj. Otapa se u koncentriranoj dušičnoj i sumpornoj kiselini, a ne otapa se u razrijeđenim lužinama ukoliko nije prisutan vodikov peroksid kada se otapa lako i brzo.



Slika 5.2 – 1 Primjeri korištenja germanija

5.3. BOR



Bor se javlja u amorfnom i kristalnom obliku. **Amorfni bor** je žutosmeđe boje i postojan je na temperaturama ispod 800 °C. **Kristalni oblik** ima tri modifikacije: alfa-rompski bor koji nastaje na temperaturi iznad 1300 °C, crnosive je boje i izvanredno tvrd, beta-rompski bor postojan je na temperaturama između 800 i 1000 °C, tamnocrvene je boje, dok je treća modifikacija tetragonski bor koji je postojan na temperaturama između 1100 – 1300 °C. Elementarni bor je vrlo teško dobiti u čistom stanju. Industrijski se dobiva redukcijom oksida, hidrida i halogenida bora. Pri industrijskoj proizvodnji bora redukcijom oksida, polazeći od boraksa, najprije se dobije ortoborata kiselina i borov oksid, B_2O_3 . Nastali oksid reducira se natrijem ili magnezijem pri čemu se smjesa borovog oksida i magnezija ili natrija ulaže u peć prethodno ugrišanu do crvenog usijanjanja. Pri tom nastaje elementarni bor kao crn amorfan prah. Kristalizirani bor može se dobiti prolazom smjese para borovog tribromida i vodika preko užarene tantalove žice (1100 – 1300°C). Pri navedenoj temperaturi tribromid se reducira, a na tantalovoj žici talože se kristali elementarnog bora čistoće veće od 99%.

5.3.1 SVOJSTVA BORA

OSNOVNA SVOJSTVA BORA	
Specifična masa	2.08 kg/dm ³
Atomska težina	10.81
Redni broj	5
Električna vodljivost	0.018 Sm/mm ²
Temperaturni koef. istezanja	5 – 7·10 ⁻⁶ / K
Talište	3769 °C
Vrelište	7101 °C
Toplinska vodljivost	27.4 W/mK
Toplina taljenja	192.4 kW/kg
Temperaturni koef. otpora	/

Tablica 5.3.1 Osnovna fizikalna i tehnološka svojstva bora

5.3.1.1 Tehnološka i mehanička svojstva

Boridi su tvari koje imaju lančanu, dvostruku lančanu ili lisnatu strukturu. Mnogi od njih odlikuju se lijepim kristalnim izgledom. Poput metala dobri su vodiči elektriciteta, imaju pozitivni temperaturni koeficijent električnog otpora i niski koeficijent termičkog širenja. Imaju visoko talište, a odlikuju se i

velikom tvrdoćom. Elementarni bor upotrebljava se najviše u metalurgiji za uklanjanje kisika i dušika iz metala, za dodavanje čelicima radi poboljšanja svojstava termičke obrade, mehaničkih svojstava i otpornosti prema koroziji. Koristi se i za proizvodnju vatrostalnih i kemijski otpornih borida i specijalnih legura. Bor se upotrebljava kao materijal za izradu kontrolnih šipki nuklearnih reaktora kojima se regulira tijek i intenzitet reakcije. Razlog tome je velika moć apsorpcije termalnih neutrona u reaktoru koja je posljedica visokog udarnog presjeka borovih jezgara. Iz istog se razloga koristi za zaštitu od zračenja (poglavito neutronske), u detektorima neutrona, a u medicini za otkrivanje i ispitivanje tumora na mozgu.

5.3.1.2 Kemijska svojstva

Kristalizirani bor je kemijski izuzetno inertan, reagira s drugim tvarima tek kod povišenih temperatura. Ne reagira s kisikom na temperaturi od 750 °C, a sa vodom niti pri 100 °C. Od kiselina reagira, i to vrlo polagano, samo s vrućom koncentriranom dušičnom i sumpornom kiselinom, a isto tako i s alkalijama. S rastaljenim natrijevim hidroksidom reagira samo iznad 500 °C, a s klorom pri 550 °C tek počinje reagirati. Slabo vodi električnu struju, ali s porastom temperature vodljivost mu se povećava. Amorfni borov prah je prilično reaktivan u odnosu na kristalni bor. S fluorom reagira već na sobnoj temperaturi, s klorom na 400 °C, zagrijan na zraku sam se zapali kod 700 °C pri čemu plamen ima karakterističnu zelenu boju. Praškasti bor je vrlo jako oksidacijsko sredstvo, osobito pri višim temperaturama. S koncentriranom dušičnom i sumpornom kiselinom oksidira se do ortoboratne kiseline, taljenjem s alkaliskim hidroksidom uz prisutnost zraka daje odgovarajuće alkaliske borate.



Slika 5.3 – 1 Primjeri korištenja bora

5.4. SELENIJ



Selenij se dobiva iz mulja koji nastaje tijekom proizvodnje sumporne kiseline u olovnim komorama ili iz anodnog mulja koji nastaje prilikom elektrolitičke rafinacije bakra. U mulju olovnih komora, pored telurija i sumpora, selenij je prisutan i u elementarnom obliku. Mulj se obrađuje koncentriranom dušičnom kiselinom pri čemu se selenij oksidira u selenijevu kiselinu (H_2SeO_3). U idućem koraku se dobije crveni prah selenija taloženjem pomoću H_2SO_3 . U anodnom mulju selenij je prisutan u obliku jednostavnih i složenih netopljivih selenida. Prvo se anodni mulj žari tako da se oksidacijom selenida stvara lako hlapljivi selenijev (IV) – oksid (SeO). Pare se hlade i izdvajaju apsorpcijom u vodi u posebnim uređajima, tzv. skruberima ili mokrim elektrofilterima. Uvođenjem SO_2 u vodenu otopinu selenijeva kiselina reducira se u crveni prah (elementarni selenij) tehničke čistoće. Kako se u poluvodičkoj industriji upotrebljava selenij visoke čistoće (99.999 % Se) ovako dobiven selenij

potrebno je rafinirati, što se provodi različitim postupcima: destilacijom pri normalnom tlaku u struji inertnih plinova, isparivanjem i sublimacijom selenija u vakuumu, zonskim taljenjem i usmjerenom kristalizacijom, oksidirajućim žarenjem i frakcijskim isparivanjem SeO_2 , otapanjem tehničkog selenija u različitim otapalima i selektivnim taloženjem iz otopine itd.

5.4.1 SVOJSTVA SELENIJA

OSNOVNA SVOJSTVA SELENIJA (sivog)	
Specifična masa	4.81 kg/dm ³
Atomska težina	78.971
Redni broj	34
Električna vodljivost	$0.12 \cdot 10^{-12} \text{ Sm/mm}^2$
Temperaturni koef. istezanja	$37 \cdot 10^{-6} / \text{K}$
Talište	221 °C
Vrelište	685 °C
Toplinska vodljivost	0.519 W/mK
Toplina taljenja	638.24 kWs/kg
Temperaturni koef. otpora	/

Tablica 5.4.1 Osnovna fizikalna i tehnološka svojstva selenija

Elementarni selenij nije otrovan, ali su otrovne njegove pare i spojevi koji mogu uzrokovati pneumoniju i selenozu pa i smrt.

5.4.1.1 Tehnološka i mehanička svojstva

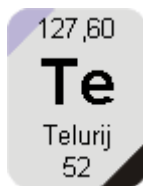
Selenij se javlja u više alotropskih modifikacija: tri crvene, dvije crne i sivoj. Pri sobnoj temperaturi stabilan je sivi, heksagonski (metalni) selenij koji se sastoji od spiralnih lanaca atoma selenija. Metalni, **sivi selenij** slab je vodič električne struje u tami, ali mu se vodljivost povećava osvjetljivanjem i do tisuću puta pa se to svojstvo upotrebljava za izradu selenijevih fotoćelija. Vodljivost selenija razmjerna je drugom korijenu energije upadnog zračenja. **Crvena, praškasta modifikacija selenija** ima prstenastu strukturu. Selenij ne provodi električnu struju, a javlja se kao amorfna faza (koja se izdvaja iz vodenih otopina i zagrijavanjem pri 150 °C prelazi u sivi selenij) i u dva kristalna, monoklinska oblika (alfa i beta-selenij). Od crnih modifikacija jedna je amorfna, a druga je staklasta pri sobnoj temperaturi, a malim povišenjem temperature postaje elastična poput kaučuka, dok pri još višoj temperaturi postaje plastična. Pare selenija su žućkaste i pri temperaturi 900 – 1000 °C sastoje se praktično od molekula Se_2 koje pri 1350 °C počinju disocirati u jednoatomne molekule. Selenij ima dijamagnetska svojstva i tipičan je poluvodič čija provodnost ovisi o čistoći i termičkoj obradi selenija. Nekad se selenij upotrebljavao za izradu tzv. selenskih ispravljača (istisnuli su ih efikasniji i kompaktniji poluvodički).

Pored upotrebe selenija za izradu fotoćelija, koristi se i u kserografiji za izradu foto-osjetljivih slojeva za fotokopiranje, kao modifikator u industriji gume (dodatak 1 – 3% selenija gumi povećava njezinu otpornost na abraziju), u proizvodnji katalizatora i mnogih organskih spojeva. Selenij i njegovi spojevi upotrebljavaju se za bojenje stakla i emajla u ružičastim i crvenim nijansama te za obezbojavanje stakla (uklanjanje zelene boje stakla uzrokovane prisutnošću tragova željeza).

5.4.1.2 Kemijska svojstva

Kemijska svojstva selenija slična su svojstvima sumpora. Na zraku i pri sobnoj temperaturi selenij je postojan, a zagrijavanjem u struji zraka ili kisika oksidira dajući selenijev(IV)-oksid (SeO_2). Gorenjem selenija u struji kisika oksidacija se ubrzava uz razvijanje plamena. Otapa se u koncentriranoj dušičnoj kiselini i smjesi dušične i klorovodične kiseline, a ne otapa se u klorovodičnoj i razrijeđenoj sumpornoj kiselini. Pri sobnoj temperaturi reagira s fluorom, a zagrijavanjem reagira s vodikom i bromom. Pri taljenju s metalima stvara selenide koji su po vanjskom izgledu, strukturi i kemijskim svojstvima slični odgovarajućim sulfidima.

5.5. TELURIJ



Telurij se dobiva kao mulj s 0.3 – 3% telurija. Kako u anodnom mulju ima i selenija, bakra, plemenitih metala i drugih obojenih metala, prvo se iz mulja uklanja bakar, zatim se dobivaju selenij i telurij, a na kraju plemeniti metali. **Elementarni telurij** čistoće 95 – 99.9% dobije se elektrolizom otopine natrijevog telurita.

5.5.1 SVOJSTVA TELURIJA

OSNOVNA SVOJSTVA TELURIJA	
Specifična masa	6.24 kg/dm ³
Atomska težina	127.60
Redni broj	52
Električna vodljivost	4.36·10 ⁻⁹ Sm/mm ²
Temperaturni koef. istezanja	/
Talište	449.51 °C
Vrelište	988 °C
Toplinska vodljivost	1.97 – 3.38 W/mK
Toplina taljenja	137 kW/kg
Temperaturni koef. otpora	/

Tablica 5.5.1 Osnovna fizikalna i tehnološka svojstva telurija

Telurij i njegovi spojevi su otrovni, a posebno su opasni telurovodik i telurijev (VI) - fluorid. Telurijevi spojevi šire nepodnošljivo neugodan zadah koji ima miris po bijelom luku, a upija se u kožu i vrlo se teško i sporo uklanja.

5.5.1.1 Tehnološka i mehanička svojstva

Amorfni telurij taloži se u obliku smeđeg praha iz vodene otopine teluritne ili teluratne kiseline redukcijom pomoću sumporaste kiseline. Najstabilnija je kristalna "metalna" modifikacija, srebrnosive boje, metalnog sjaja i male tvrdoće pa se lako prevodi u prah. Vrlo je slab vodič električne struje, a vodljivost mu se povećava pod utjecajem svjetla, iako mnogo slabije nego kod selenija. Pri sobnoj temperaturi postojan je na zraku i u atmosferi kisika. Telurij se najviše upotrebljava za proizvodnju legura s olovom koje imaju dobra antikorozivna svojstva i odlikuju se tvrdoćom i elastičnošću. Ove legure koriste se za oblaganje uređaja za proizvodnju sumporne kiseline, za izradu aparatura u kemijskoj industriji, za proizvodnju zaštitnih plašteva energetskih kablova. Dodaje se bakru i niskougljičnim čelicima jer im poboljšava mogućnost mehaničke obrade. U čeliku stabilizira karbide i smanjuje mikroporoznost strukture. U manjim količinama telurij se upotrebljava za izradu fotootpornika, za dopiranje poluvodiča, kao sastojak fotoosjetljivih slojeva televizijskih ekrana, u dozimetriji, u detektorima infracrvenog zračenja, u solarnim ćelijama i termoelektričnim generatorima (jer ima mali izlazni rad za elektrone). Njegovi spojevi koriste se u keramičkoj i staklarskoj industriji za proizvodnju dekorativnih boja, a teluridi nekih metala upotrebljavaju se kao katalizatori u organskoj sintezi i pri preradi nafte. Istraživači u Philipsu su razvili novi materijal kao legura antimona i telurija, a glavna karakteristika mu je da treba vrlo malo energije i vremena za prebacivanje između stanja koja služe za pohranu informacija u čipu. Također, poput Flash memorije osigurava da ta stanja budu pohranjena i nakon isključenja izvora napajanja.

5.5.1.2 Keramika svojstva

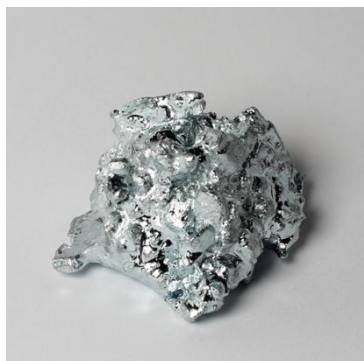
Zagrijavanjem u čistom kisiku sagorijeva plavo-zelenim plamenom stvarajući oksid TeO₂. Bez zagrijavanja reagira s halogenim elementima, a pri zagrijavanju reagira s metalima stvarajući teluride. Uopće ne reagira s vodikom, dušikom i ugljikom, sa sumporom ne stvara spojeve, ali se njihove taline

miješaju u svim omjerima. Sa selenijem telurij stvara neprekidan niz tekućih i čvrstih otopina. Telurij se lako otapa u sumporovoj kiselini i zlatotopci, a polako se otapa u klorovodičnoj i dušičnoj kiselini te u lužinama.



Slika 5.5 – 1 Primjeri korištenja telurija

5.6. GALIJ



Galij se dobiva kao sporedni proizvod kod dobivanja aluminija preradom aluminatne lužine nastale dobivanjem glinice Bayerovim postupkom i preradom anodnog mulja koji nastaje i elektrolitičkom rafinacijom aluminija. Iz aluminatne lužine galij se dobiva elektrolizom u reaktoru koji se sastoji od živine katode i anode od nikalne mreže u obliku poluvaljka. U tijeku procesa na katodi se izdvaja smjesa koja sadrži galij, natrij, aluminij, željezo, silicij, cink i druge metale. Tretiranjem vrućom vodom nastali natrij daje hidroksid (NaOH) koji reagira s galijem stvarajući natrijev galat. Otopina natrijevog galata u lužini ponovo se podvrgava elektrolizi pri čemu se izdvaja sirovi galij. Iz anodne legure (mulja), koja sadrži do 0.3% galija, njegovo izdvajanje može se vršiti alkalnim ili kiselim postupcima. U alkalnom postupku anodna legura izlučuje se vrućom vodenom otopinom natrijeva hidroksida pri čemu se otapaju aluminij i galij uz nastajanje aluminata i galata. Iz dobivene otopine galij se izdvaja elektrolizom, kao i pri izdvajanju iz aluminatne lužine. U kiselim postupcima izlučivanje anodne legure vrši se otopinom klorovodične ili sumporne kiseline pri čemu nastaju galijeve soli koje se iz otopine odvajaju ekstrakcijom pomoću butil-acetata i amil-acetata otparavanjem tog otapala. Nastale se soli otope u NaOH, a iz otopine se izdvoji sirovi galij. Budući da je za primjene potreban izuzetno čist metal (99.99999% Ga), sirovi galij se mora pročištit. Proces rafinacije obuhvaća čišćenje galija kiselinama i lužinama, elektrolitičko čišćenje te čišćenje zonskim taljenjem (vidi objašnjenje kod germanija) ili izvlačenjem monokristala.

5.6.1 SVOJSTVA GALIJA

OSNOVNA SVOJSTVA GALIJA	
Specifična masa	5.91 kg/dm ³
Atomska težina	69.723
Redni broj	31
Električna vodljivost	0.27·10 ⁻¹² Sm/mm ²
Temperaturni koef. istezanja	18·10 ⁻⁶ / K
Talište	27.7646 °C
Vrelište	2400 °C
Toplinska vodljivost	40.6 W/mK
Toplina taljenja	80.17 kW/kg
Temperaturni koef. otpora	/

Tablica 5.6.1 Osnovna fizikalna i tehnološka svojstva galija

Telurij i njegovi spojevi su otrovni, a posebno su opasni telurovodik i telurijev (VI) - fluorid. Telurijevi spojevi šire nepodnošljivo neugodan zadah koji ima miris po bijelom luku, a upija se u kožu i vrlo se teško i sporo uklanja.

5.6.1.1 Tehnološka i mehanička svojstva

Vrlo čisti galij je mekan metal srebrnoplavkastog sjaja. Na prijelomu pokazuje morfologiju karakterističnu za staklo. Vrlo je mekan tako da se može rezati nožem. Odlikuje se niskim talištem (29.8°C) i visokim vrelištem (2230°C) pa se u tekućoj fazi nalazi u najvećem temperaturnom rasponu od svih metala. Ima vrlo nizak tlak vlastitih para i pri visokim temperaturama te vrlo izraženu sposobnost pothlađivanja. Stoga je potrebno inicirati proces očvršćivanja zasipanjem pothlađene tekuće faze jezgama kristalizacije. Pri očvršćivanju volumen se povećava za 3.1% pa se galij ne smije držati u staklenim ili metalnim posudama.

Galij se najviše upotrebljava za dobivanje spojeva s elementima 15. (V.B) skupine periodnog sustava elemenata i kao legirajući metal. Manje količine galija koriste se kao tekućina u visokotemperaturnim termometrima zbog navedenog temperaturnog raspona tekuće faze. Zbog visoke cijene galija ova namjena ograničena je samo na specijalne mjerne uređaje. Tekući galij kvasi staklene i porculanske plohe te na njima, nakon očvršćivanja, stvara prekrasan zrcalni sloj. U **poluvodičkoj tehnologiji** ultračisti galij koristi se kao dopirajuća primjesa, a u spoju s arsenom, galijev arsenid (GaAs), kao poluvodički materijal. Također se koristi kao aktivator u luminiscentnim nanosima, kao sastojak dentalnih amalgama, te u lučnim ispravljačima.

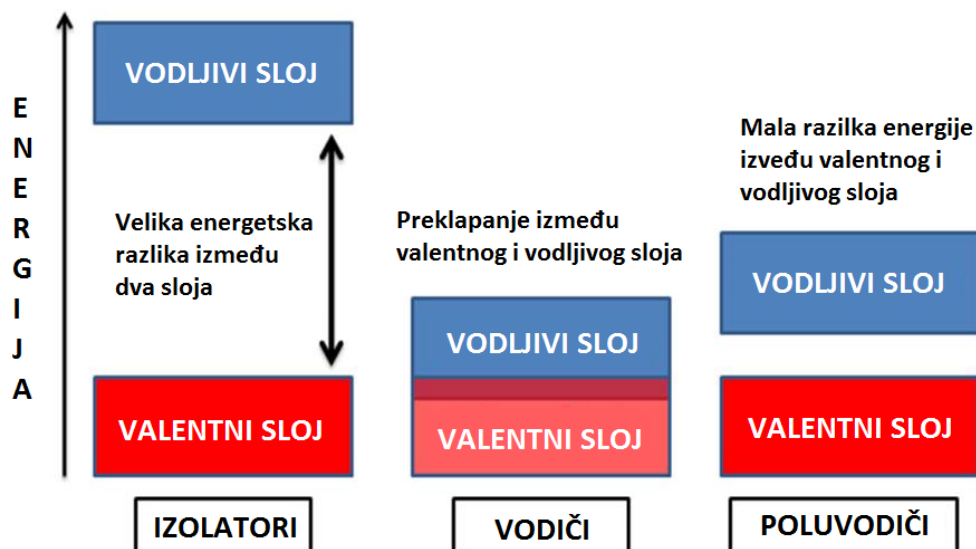
5.6.1.2 Kemijska svojstva

Galij na zraku brzo oksidira pri čemu se na površini stvara zaštitni oksidni sloj koji je stabilan do temperature 260°C . Daljnjim zagrijavanjem do 500°C , metalni galij počinje izgarati. Razrijeđene kiseline i lužine nagriza ga vrlo polako, a zlatotopka i koncentrirane lužine alkalijskih metala nagriza ga vrlo brzo. S antimonom, arsenom i fosforom lako stvara binarne i ternarne spojeve. S jodom reagira na višim temperaturama, a s ostalim halogenim elementima reagira burno i pri niskim temperaturama. S vodom na sobnoj temperaturi reagira vrlo sporo, ali s kipućom vrlo burno. Lako se legira stvarajući čvrste otopine. Već pri sobnoj temperaturi otapa živu, bakar, aluminij, zlato i cink, a pri višim temperaturama otapa sve metale.



Slika 5.6 – 1 Primjeri korištenja galija

5.7. OSNOVNA SVOJSTVA POLUVODIČKIH MATERIJALA



Slika 5.7 -1 Razlika između vodiča, poluvodiča i izolatora

Poluvodički materijali imaju valentne elektrone vezane u kristalnoj rešetci te se oni ne mogu slobodno kretati po materijalu, odnosno voditi struju. Imaju električnu otpornost između $10^{-5} \Omega\text{m} < \rho < 10^4 \Omega\text{m}$ i posjeduju negativni temperaturni koeficijent otpora. Poluvodički materijali mogu se podijeliti na:

- prirodne elemente,
- prirodne kemijske spojeve (i legure),
- umjetno načinjene spojeve (keramika).

Keramičke poluvodiči tvore se, najčešće, od karbida silicija, karbida bora i ugljika, pomiješanih s keramičkom izolacijskom masom. Germanij i silicij su glavni i najinteresantniji predstavnici ovih materijala, ako su potpuno čisti, kod temperature apsolutne nule su izolatori, a kod sobne temperature su vrlo loši vodiči. Značajke elemenata i sklopova izrađenih iz poluvodičkih materijala su:

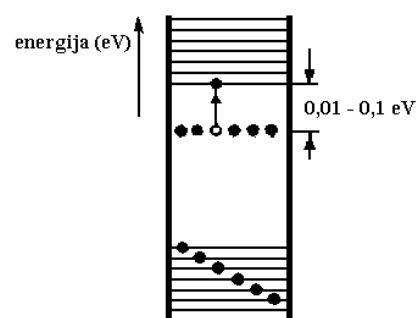
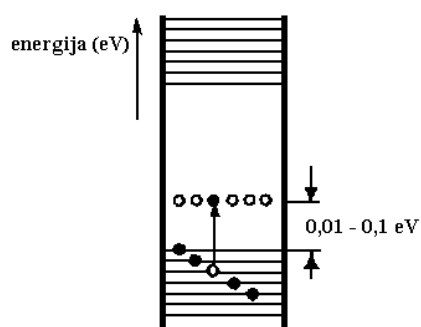
- dug vijek trajanja,
- malen volumen,
- mala težina,
- jednostavna izrada (relativno),
- velika mehanička čvrstoća,
- diode i tranzistori nemaju strujnih krugova za zagrijavanje,
- snaga napajanja je neznatna,
- mala ustrajnost (inercija),
- ekonomična izrada.

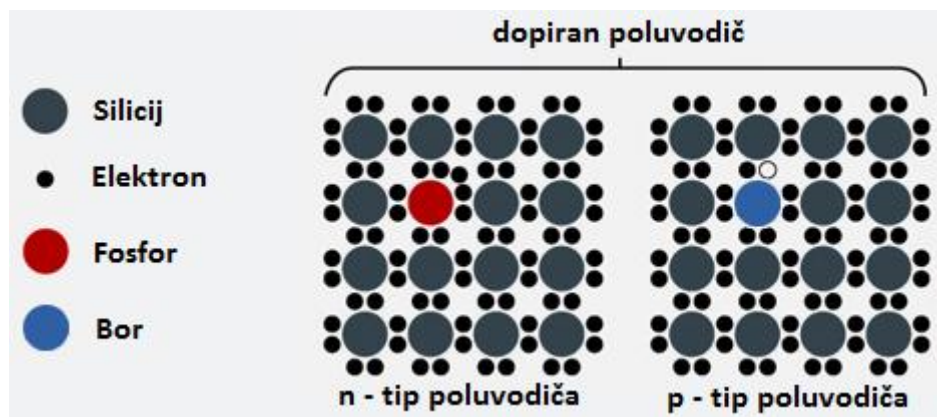
U prvom redu misli se na prednosti poluvodičkih elemenata pri usporedbi sa elektronskim cijevima. Nedostaci su, u odnosu na cijevi, manja snaga, te veća osjetljivost na povišene temperature i na radioaktivna zračenja.

Atomi poluvodičkih materijala spajaju se kovalentnim vezama, tvoreći parove elektrona zajedničke za oba atoma. Takve veze su čvrste. Pri temperaturi apsolutne nule nema slobodnih elektrona. Pri povećanju temperature neke se veze kidaju i postoji određeni broj slobodnih elektrona. Tada, uz djelovanje električnog polja dolazi do određene vodljivosti. Dodavanjem peterovalentne primjese (npr. N, P, As, Sb - antimon, Bi) u čisti monokristal germanija ili silicija (četverovalentni) primjesa će se kovalentnim vezama vezati sa četiri susjedna Si ili Ge atoma, a peti elektron primjese ostaje slobodan.

Uslijed termičkog gibanja slobodni elektroni, dobiveni na takav način, gibat će se kroz kristalnu strukturu kaotično, a kada djeluje vanjsko električno polje protjecat će električna struja. Ovako dobiveni poluvodič naziva se **poluvodičem N-tipa** (negativnog tipa) jer u njemu električnu struju predstavlja gibanje slobodnih elektrona. Peterovalentni atom primjese naziva se donatorom (davatelj). Donorske primjese stavljaju elektrone u pojas slobodnih energijskih razina (donorska razina primjese), što olakšava oslobađanje elektrona.

Dodavanjem trovalentne primjese (npr. In, B, Al, Ga) u čisti monokristal četverovalentnih germanija ili silicija jedna veza nije ostvarena. Tu nastaje tzv. šupljina. Šupljinama se kao nositeljima električne struje pridaje pozitivan karakter. Tako nastaje **P-tip poluvodiča** (pozitivan tip) jer su glavni nositelji električne struje šupljine. Trovalentni atom primjese naziva se akceptor (primatelj). Akceptorske primjese stvaraju u poluvodiču dopunske slobodne energijske razine na koje mogu preći elektroni iz popunjenog valentnog pojasa ostavljajući iza sebe šupljine.





Slika 5.7 – 2 Struktura n i p tipa poluvodiča

Primjese unose nove energijske razine u zabranjeni pojas i time značajno utječu na vodljivost poluvodiča. Poluvodiči u kojima se elektroni i šupljine stvaraju u paru nazivaju se **intrinzični** (unutarnji) poluvodiči. Takvi su samo ako je materijal čist. Poluvodiči u kojima ima i primjesa nazivaju se **ekstrinzični** (vanjski) poluvodiči. U poluvodiču s primjesama postoje slobodni nositelji elektriciteta (elektrona i šupljina) i vezani nositelji elektriciteta: ioni primjesa (negativni akceptori i pozitivni donori). Nositelji naboja mogu biti **većinski** i **manjinski**. U N-tipu poluvodiča većinski su elektroni, a manjinski šupljine. U P-tipu poluvodiča većinski nositelji su šupljine, a manjinski elektroni. U poluvodičima s velikim brojem primjesa može doći do preklapanja energijskih pojava, te im svojstva postaju slična metalima. To su tzv. **degenerirani poluvodiči**. Primjese mogu izazvati nastajanje energijskih razina koje mogu djelovati kao: **zamke** i **rekombinacijski centri**. U zamkama se neko vrijeme zadržavaju slobodni nositelji elektriciteta, te se na taj način utječe i na vodljivost. U rekombinacijskim centrima se poništavaju elektroni i šupljine. U poluvodičima se javljaju:

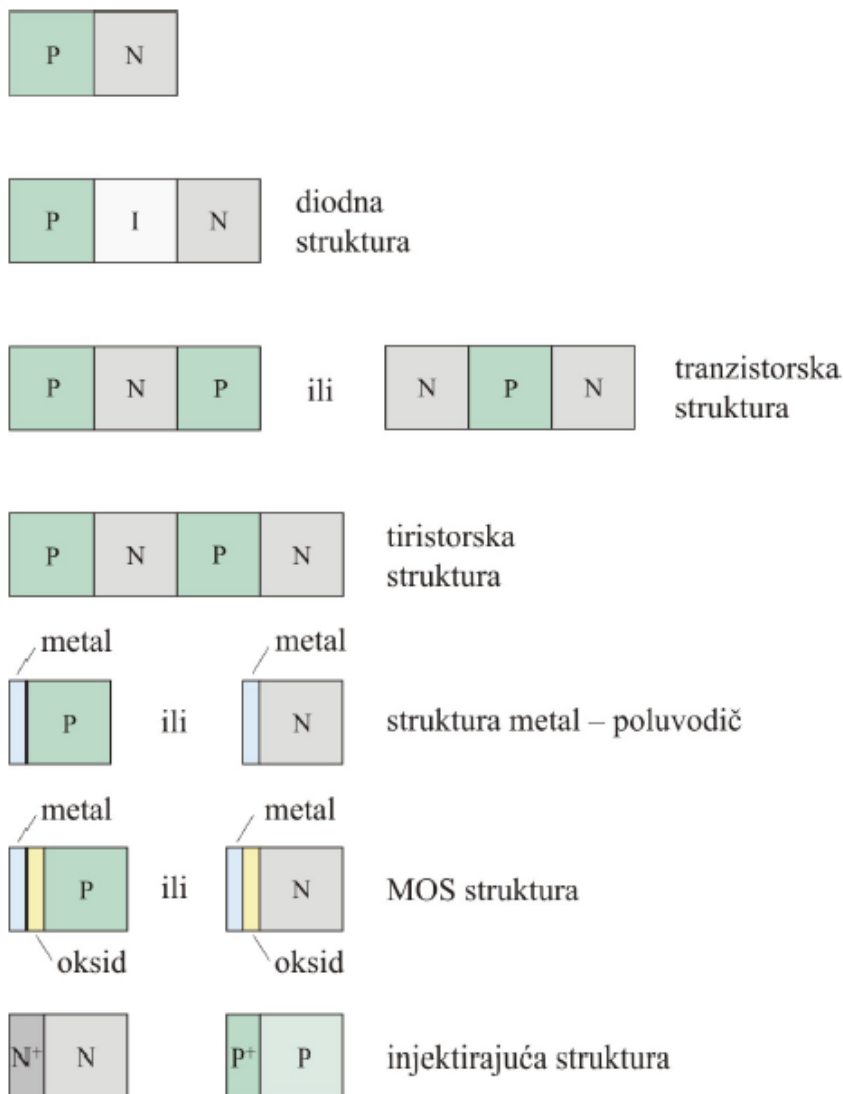
- **termoelektrične pojave:**
 - Seebeckov efekt,
 - Peltierov efekt,
 - Thomsonov efekt,
- **elektromagnetske i termomagnetske pojave:**
 - Hallov efekt,
 - Ettingshausenov efekt,
 - Nernstov efekt,
 - Righi-Leducov efekt,
- **fotoelektrične pojave:**
 - fotovodljivost,
 - fotonaponski efekt,
 - elektroluminiscencija,
- **piezoelektrične pojave:**
 - piezoelektrični efekt.

Materijal	Širina zabranjenog pojasa (eV)	Električna vodljivost (Ω/m)	Pokretljivost elektrona (m^2/Vs)	Pokretljivost šupljina (m^2/Vs)
Silicij Si	1.11	$4 \cdot 10^{-4}$	0.14	0.05
Germanij Ge	0.67	2.2	0.38	0.18
Galij-Fosfor GaP	2.25	/	0.05	0.002
Galij-Arsen GaAs	1.42	10^{-6}	0.85	0.45
Indij-Antimon InSb	0.17	$2 \cdot 10^4$	7.7	0.07
Kadmij-Sumpor CdS	2.40	/	0.03	/
Cink-Telurij ZnTe	2.26	/	0.03	0.01

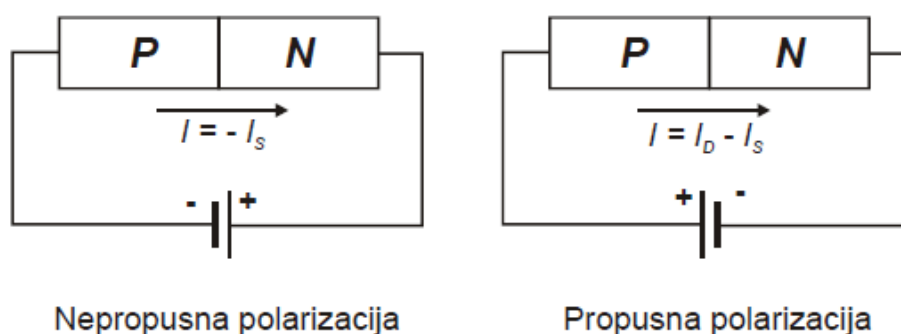
Tablica 5.7 – 1 Osnovne karakteristike nekih poluvodičkih materijala

5.8. POLUVODIČKI ELEMENTI

Poluvodičkih elemenata ima oko pedeset različitih vrsta. Unutar monokristala silicija (pravilne kristalne rešetke) može se naći sedam različitih struktura.



Slika 5.8 – 1 Osnovne strukture poluvodičkih elemenata

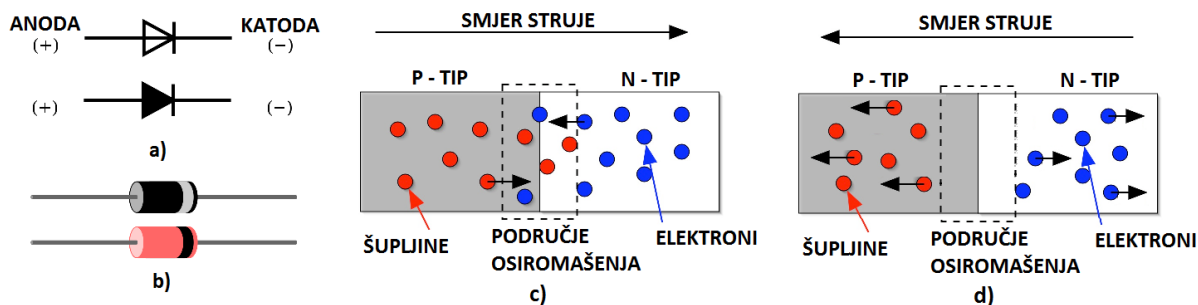


Slika 5.8 – 2 Polarizacije PN spoja

Ako na P-stranu P-N spoja spojimo pozitivni pol vanjskog napona, potencijalna barijera se smanjuje, a ako spojimo negativni pol, potencijalna barijera se povećava. U prvom slučaju difuzija većinskih nositelja se olakšava, pa dolazi do pojačane injekcije elektrona na P-stranu i šupljina na N-stranu tj. P-N spoj je propusno polariziran. Za slučaj povećavanja potencijalne barijere (minus pol na P-stranu), postoji samo struja manjinskih nositelja koja je vrlo mala i ne ovisi o naponu. Ovakva polarizacija se naziva reverzna ili nepropusna polarizacija. Dakle, s obzirom na postojanje većinski i manjinski nositelji imamo dvije moguće struje:

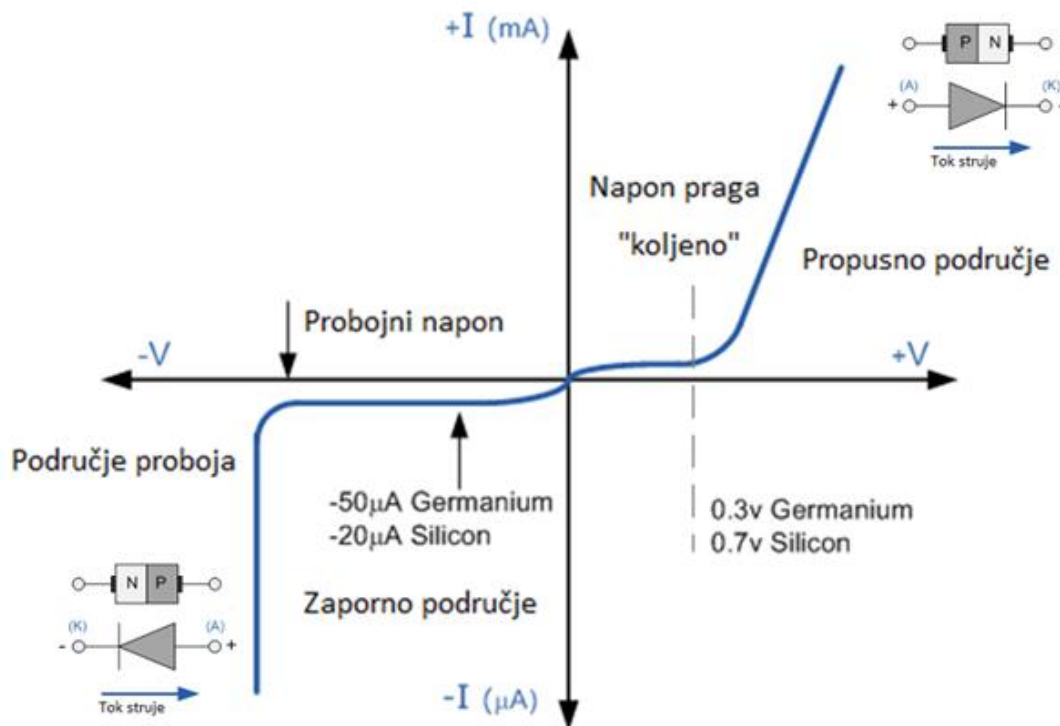
- I_D – struja koja je rezultat kretanja većinskih naboja ili struja difuzije
- I_S – struja koja je rezultat kretanja manjinskih naboja ili struja saturacije tj. zasićenja

5.8.1 POLUVODIČKE DIODE



Slika 5.8.1 – 1 Poluvodička dioda: a) simboli; b) izvedba kućišta; c) propusna polarizacija; d) nepropusna polarizacija

Diode su nelinearni poluvodički elementi koji se sastoje od p-tipa i n-tipa poluvodiča. P-tip poluvodiča naziva se **anoda** (A), a n-tip poluvodiča naziva se **katoda** (K). Najčešće se proizvode od silicija te germanija. Glavno svojstvo PN – diode je da pod utjecajem vanjskog napona u jednom smjeru vodi struju, a u drugom ne. Poluvodič tipa N je onaj kod kojega kao nosioci vodljivosti prevladavaju elektroni, a on se dobiva tako da germaniju ili siliciju dodajemo nečistoće (P, As ili Sb). Poluvodič tipa P je onaj kod kojega kao nosioci vodljivosti prevladavaju šupljine. Spajanjem n- i p-tipa poluvodiča nastaje **pn-spoj**. U blizini samog kontakta elektroni iz n-poluvodiča 'prelaze' u p-poluvodič i tamo se 'poništavaju' s dijelom šupljina, a šupljine iz p-poluvodiča 'prelaze' u n-poluvodič i tamo se 'poništavaju' s dijelom elektrona. Time nastaje područje sa znatnim manjkom nosioca naboja koje se još zove i **područje osiromašenja**.

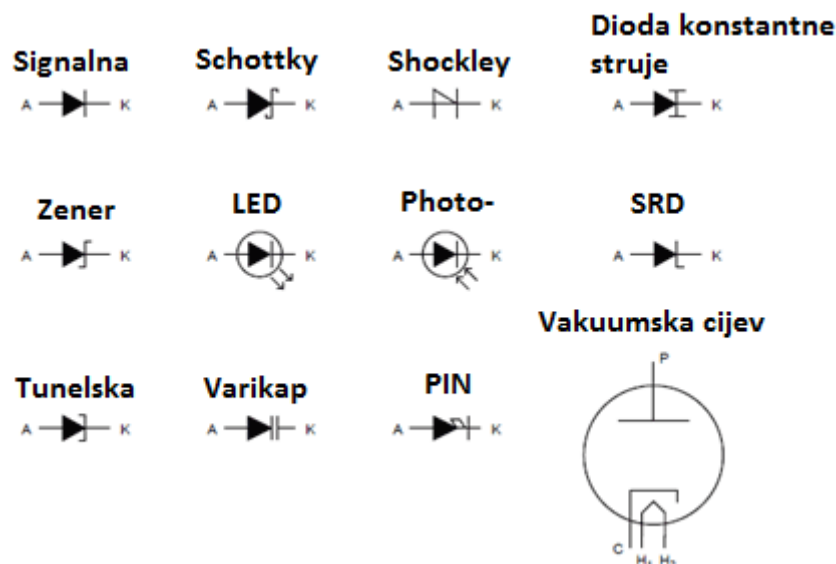


Slika 5.8.1 – 2 Strujno-naponske karakteristike poluvodičke PN diode

Napon praga ili **napon koljena** U_F je napon kod kojeg dioda provede. **Propusni napona** U_F je napon na diodi pri propusnoj polarizaciji i uz navedenu propusnu struju. **Struja propusne polarizacije** I_F je prosječna struja pri propusnoj polarizaciji. **Reverzna struja zasićenja** I_R je struja u području zaporne polarizacije. **Probojni napon** U_{PR} je napon kod kojeg nastaje proboj. Dopušteni **utrošak snage** P je snaga koja se razvije na diodi (snaga disipacije).

Postoje različiti tipovi dioda, a klasifikacija se radi po funkciji koju dioda obavlja:

- **Ispravljačke (signalne) diode** – koriste se za ispravljanje izmjeničnih veličina u istosmjernu. Njihov rad je već opisan u uvodu: diode vode struju kada su propusno polarizirane, a ne vode kada su nepropusno. Zovu se još i signalne jer se koriste u demulaciji radio signala. Ispravljačke diode su bile osnovni elementi jednih od prvih elektroničkih logičkih vrata (DTL - Diode Transistor Logic).
- **Zener diode** – su diode koje se uglavnom koriste kao referentni izvori napona. Izraženo područje proboja kod tzv. Zenerovog napona se koristi za dobivanje stabilnog referentnog napona.
- **Svjetleće diode (LED)** – emitiraju svjetlost kada su propusno polarizirane. Boja svjetlosti ovisi o primjesama u poluvodiču, a mogu varirati od ultraljubičaste do infracrvene. Koriste se za prijenos signala (infracrvene) i signalizaciju. Koriste se i prilikom galvanskog odvajanja električnih krugova, najčešće u optokaplerima.
- **Schottky diode** – temelje svoj rad na ispravljačkom spoju metal-poluvodič. Osnovna karakteristika ovih dioda je da imaju na mjestu PN prijelaza pločastu poluvodičku izolaciju koja se zatvara u vremenu od 100 ps i mali napon koljena (0.2 V). Zbog oblika strujno-naponske karakteristike te kratkog vremena oporavka prikladne su za primjenu u brzim, impulsnim sklopovima ili kao zaštitni elementi.
- **Tunel (Esakijeve) diode** – kod ovakvih dioda na uskom zapornom sloju dolazi do efekta tuneliranja kod čega slobodni elektroni i šupljine prelaze s jedne na drugu stranu PN-spoja kod malih napona. Tunelske diode se koriste u oscilatorima velikih frekvencija do 10GHz.
- **Varikap (kapacitivne) diode** – su diode s naponski upravljanim kapacitetom. Kapacitet je posljedica osiromašenog sloja u pn-spoju. Upotrebljava se u modulatorima. Najčešće rade u nepropusnom području. Kapacitet se kreće između 10 i 200 pF, a probojni naponi su oko 40 V. Kapacitivne diode se koriste za ugađanje tirajnih krugova i za automatsku regulaciju frekvencije u radiotehnici.



Slika 5.8.1 – 3 Simboli poluvodičkih diode i vakuumske cijevi

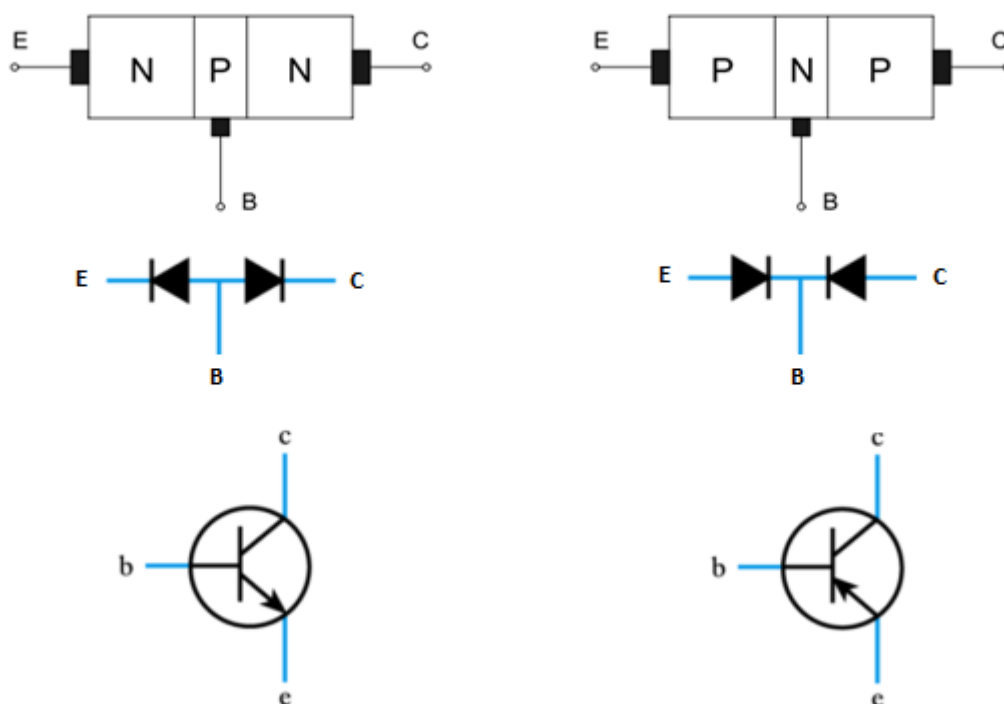


Slika 5.8.1 – 4 Prikazi poluvodičkih dioda: a) signalana; b) Zener; c) Schottky; d) Shockley; e) LED; f) Photo-; g) Tunelska; h) Varikap; i) PIN

5.8.2 TRANZISTORI

Premda je bilo i ranijih istraživanja, zasluga za otkriće tranzistora pripala je 1947. godine Williamu Shockleyu. Prvi tranzistori bili su izvedeni od dopiranog germanija, dok je prvi silicijski tranzistor proizveden od tvrtke Texas Instruments 1954. godine. Uslijedio je brz razvoj poluvodičke tehnologije i brojne vrste novih vrsta različitih bipolarnih tranzistora. Prvi unipolarni MOS (Metal Oxide Semiconductor) tranzistor proizveden je već 1960. godine.

Bipolarni tranzistor je komponenta s tri elektrode, koja posjeduje pojačavačko svojstvo u smislu da male promjene signala između ulazne i referentne elektrode, dovede do velike promjene signala između izlazne i referentne elektrode. Nazivi elektroda su **E – emiter**, **B – baza**, **C – kolektor**. Dvije vrste tranzistora su **PNP** (EBC) i **NPN** (EBC).



Slika 5.8.2 – 1 Konstrukcije i simboli NPN i PNP bipolarnih tranzistora

Baza je poluvodički dio kroz koji prolaze nositelji naboja na putu iz emitera prema kolektoru. Ovisno o primijenjenom tehnološkom postupku proizvodnje tranzistora, širina baze varira. Ovisno o vrstama spoja (zajedničkoj elektrodi) tranzistora možemo imati:

- spoj sa zajedničkom bazom (ZB)
- spoj sa zajedničkim emiterom (ZE)
- spoj sa zajedničkim kolektorom (ZC)

Prema polarizaciji emitorskog i kolektorskog spoja, razlikujemo rad tranzistora u četiri područja:

- **Normalno aktivno područje** – spoj emiter-baza je polariziran propusno, a kolektor-baza nepropusno. Rad tranzistora u ovom području koristimo kao pojačalo.
- **Inverzno aktivno područje** – kod ovog načina rada uloge emitera i kolektora su izmijenjene pa je spoj kolektor-baza propusno polariziran, a spoj emiter-baza nepropusno. Zbog konstrukcije tranzistora, faktor pojačanja je povoljniji ako se za emiter upotrebi elektroda predviđena od strane proizvođača iako nema bitnih razlika prema radu u normalnom aktivnom području.
- **Područje zasićenja** – oba spoja su propusno polarizirana. Naponi propusnih polarizacija su mali što uzrokuje mali otpor između bilo kojih elektroda tranzistora.

- **Zaporno područje** – oba spoja su nepropusno polarizirana. Kao rezultat polarizacije imamo veliki otpor spoja emiter-baza kao i spoja kolektor-baza te malu struju (manjinskih nositelja). Prebacivanje tranzistora iz zapornog područja u područje zasićenja i obratno, koristi se u impulsnim elektroničkim sklopovima za rad tranzistora kao sklopke.

Najvažnije značajke tranzistora koje je potrebno poznavati pri njihovoj uporabi jesu:

- oblik i dimenzije kućišta
- raspored priključaka
- faktor strujnog pojačanja hfe
- frekvencijsko područje rada
- najveće dopuštene vrijednosti struje
- najveće dopuštene vrijednosti napona
- utrošak snage
- radne temperature

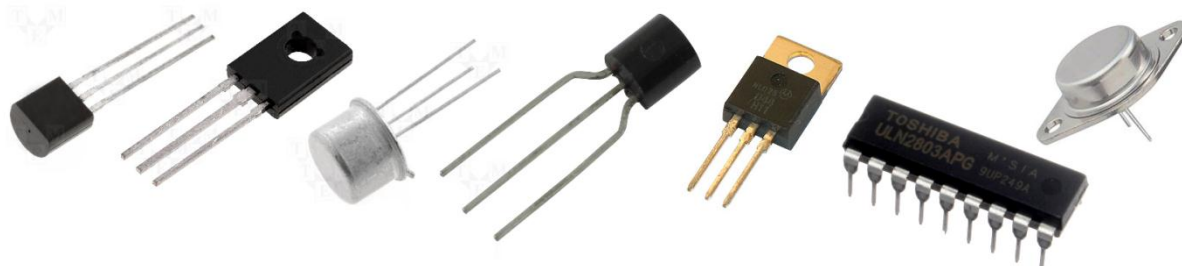
a) **EUROPSKE OZNAKE:**

- PRVO SLOVO OZNAČAVA POLUVODIČ:
 - A – germanij,
 - B – silicij.
- DRUGO SLOVO OZNAČAVA NAMJENU TRANZISTORA:
 - C – niskofrekvencijski (BC547),
 - D – niskofrekvencijski snažni (BD139),
 - F – visokofrekvencijski (BF199, BFQ57),
 - U – visokonaponski (BU208),
 - S- prekidački (BSY54, BCX57).
- TREĆE SLOVO NIJE STANDARDIZIRANO.

- 2N... – tranzistori (2N3055),
- 1N... – diode (1N4007).

- 2SA..., 2SB... – PNP – tranzistori (2SA850),
- 2SC..., 2SD... – NPN – tranzistori (2SC2001).

d) MNOGE ZEMLJE IMAJU SVOJE OZNAKE.



Slika 5.8.2 – 2 Primjeri izvedbe bipolarnih tranzistora

Unipolarni tranzistori nazivaju se tranzistori s efektom polja (**FET** - *field effect transistor*). Za njihovo upravljanje ne koristi se struja kao kod bipolarnog tranzistora već napon te se pomoću električnog polja utječe na struju kroz vodljivi kanal. Pokretni nosioci naboja su ili elektroni ili šupljine. Iako su prvi tranzistori bili izrađeni od germanija, uglavnom se koriste silicijevi kristali zbog boljih svojstava silicija pri visokim temperaturama.

Vrste unipolarnih tranzistora:

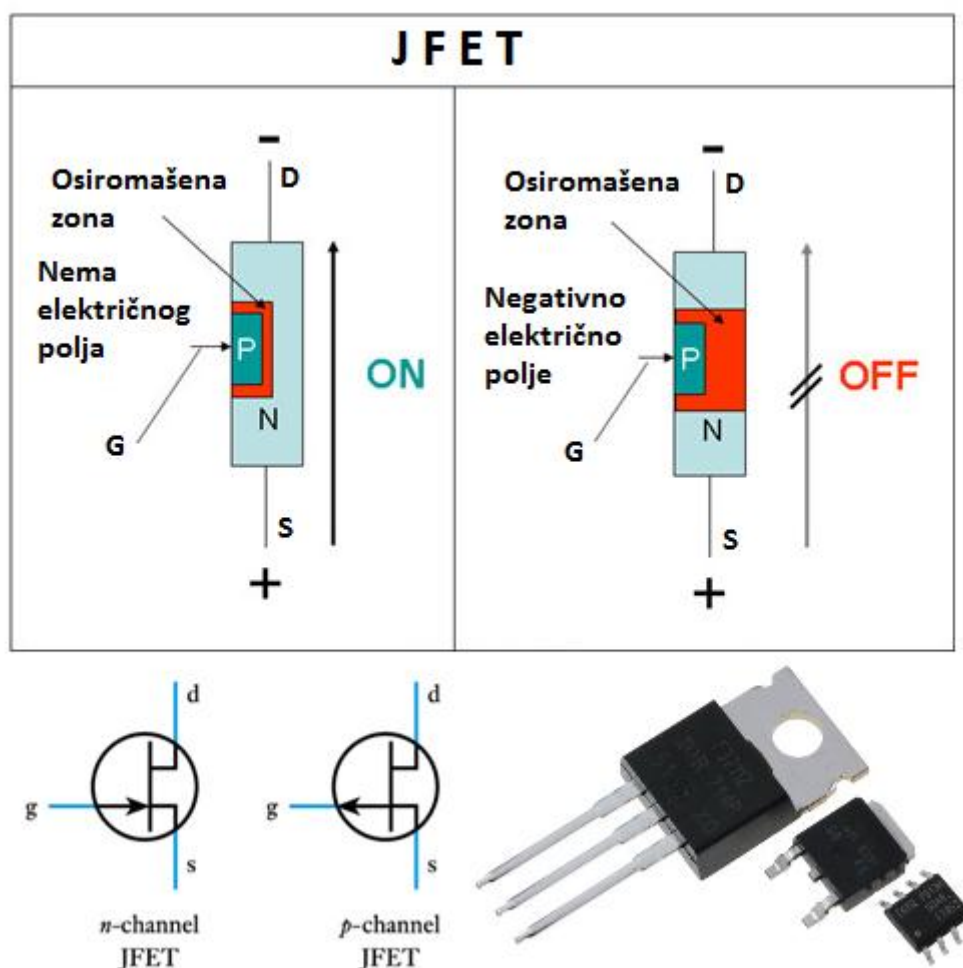
- **SPOJNI** unipolarni tranzistor ili skraćeno **JFET** (engl. *Junction field-effect transistor*)
- **S IZOLIRANIM VRATIMA** (gatom) ili skraćeno **IGFET** (engl. *Insulated gate FET*), ili skraćeno **MOSFET** (metal oxide semiconductor FET)

S obzirom na tip poluvodiča obje vrste mogu biti **n-kanalne** ili **p-kanalne**. Osim što ih možemo podijeliti na N ili P-kanalne, MOSFET tranzistore možemo podijeliti na **obogaćeni** ili **osiromašeni tip**.

Unipolarni tranzistori imaju tri priključka:

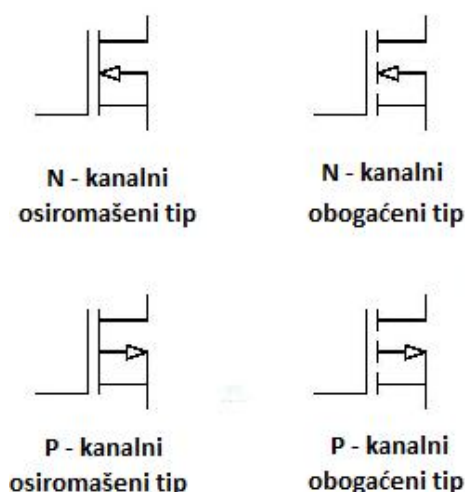
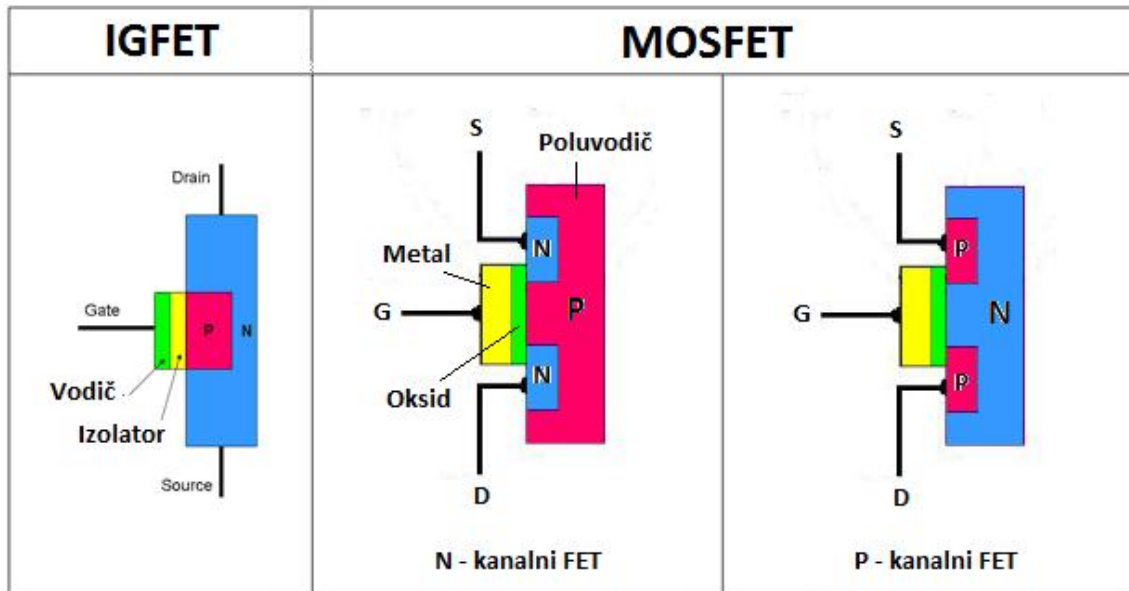
- **G** (gate – vrata) upravljačka elektroda preko napona UGS (VGS)
- **S** (source – izvor, uvod)
- **D** (drain – odvod)

Za slučaj N – kanalnog FET-a, nosioci naboja su elektroni (većinski nosioci u kanalu), a kod P – kanalnog FET-a nosioci su šupljine. Manjinski nosioci nemaju nikakvu ulogu u radu tranzistora. Drugim riječima, rad tranzistora ovisi samo o nosiocima jednog polariteta. Stoga se ova vrsta tranzistora naziva i unipolarni. Efekt polja se očituje u činjenici da su osiromašena područja u kanalu rezultat djelovanja električnog polja na inverzno polariziranim PN – spojevima (upravljačka elektroda – kanal).



Slika 5.8.2 -3 Konstrukcija, simboli i izvedbe JFET tranzistora

S obzirom na mnogo veće onečišćenje P područja, barijera (osiromašeno područje) koje nastaje uslijed reverzne polarizacije PN – spoja, širi se gotovo isključivo na N stranu. Najširi dio barijere je u području priključka odvoda (D) jer su na tom području PN – spojevi najviše inverzno polarizirani ($U_{DS} > 0$ za N – kanalni JFET). Struja koja teče kroz preostali dio kanala ovisi o naponu U_{DS} , ali i o naponu U_{GS} . Što je napon reverzne polarizacije viši, uži je kanal (širi se barijera). Kako otpor direktno ovisi o širini presjeka kanala, uži kanal ujedno znači i veći otpor.



Slika 5.8.2 – 4 Konstrukcija, simboli i izvedbe MOSFET tranzistora

Metal-oksid poluvodič (MOS) - jedno područje predstavlja uvod (S), a drugo odvod (D), dok je cijela površina prekrivena slojem silicijevog dioksida, na kojemu su napravljeni otvori prema N području i oformljeni metalni priključci za uvod i odvod. Kod ove vrste tranzistora ne postoji vodljivi kontakt između upravljačke elektrode (G) i poluvodičkog materijala pa zbog toga ne može doći ni do struje u krugu upravljačke elektrode čak i u slučaju kad je napon $U_{GS} > 0$ (propusna polarizacija PN – spoja). Osnovna karakteristika MOSFET tranzistora je vrlo veliki ulazni otpor (oko $10^{15} \Omega$). U normalnom radu N-kanalnog MOSFET-a, napon između odvoda (D) i uvoda (S) priključen je tako da je $U_{DS} > 0$. Ako na upravljačkoj elektrodi nije priključen nikakav napon, podloga P-tipa i dva N područja predstavljaju dvije PN diode od kojih je jedna propusno, a druga nepropusno polarizirana. Kako obje diode nisu propusno polarizirane, cijeli spoj se ponaša kao veliki otpor između uvoda i odvoda. Priključivanjem pozitivnog napona (s obzirom na uvod) na upravljačkoj elektrodi, u P-tipu poluvodiča će se inducirati negativni naboj, tj. elektroni će biti privučeni u blizinu metalne ploče upravljačke elektrode, ali zbog sloja SiO_2 , neće preći na nju. Ovi elektroni, koji za podlogu predstavljaju manjinske nosioce, skupljajući se ispod ploče u području od uvoda do odvoda. Ulazni napon U_{GS} pri kojemu koncentracija

elektrona postaje jednaka koncentraciji šupljina u podlozi P-tipa naziva se napon praga U_P (ili U_T , eng. threshold). Pri ovome naponu između izlaznih elektroda uvoda i odvoda formira se kanal N-tipa, pa poteče izlazna struja I_D . S obzirom da se u podlozi (poluvodiču P-tipa) formira kanal (poluvodič N-tipa) ovaj efekt naziva se inverzija kanala. Promjenom potencijala na upravljačkoj diodi mijenja se i "dubina" kanala ("dublji" kanal – manji otpor) pa se na taj način upravlja strujom odvoda. Povećanjem pozitivnog napona upravljačke elektrode (G) sve više elektrona je privučeno kanalu te se povećava koncentracija elektrona (kanal postaje "dublji"), pa je i struja I_D veća. Obrnuto, smanjenjem U_{GS} smanjuje se i I_D . Ovo je osnovni princip kontrole struje I_D pomoću U_{GS} . Manja razlika potencijala između odvoda i upravljačke diode u usporedbi s razlikom potencijala između upravljačke diode i uvoda kao posljedica ima mnogo "plići" kanal uz odvod (D), a "dublji" uz uvod (S). Porast potencijala odvoda (kao posljedica porasta I_D) uzrokuje smanjenje koncentracije elektrona u području oko odvoda, odnosno smanjenje vodljivosti kanala tj. još "plići" kanal u blizini odvoda zbog smanjenja razlike potencijala između upravljačke elektrode i odvoda (D). Ovaj efekt je sve izraženiji sa rastom U_{DS} , zbog čega je porast I_D sve sporiji. Kada napon U_{DS} poraste dovoljno da razlika potencijala između odvoda i upravljačke elektrode ($U_{GS}-U_{DS}$) dosegne napon praga, tj. kada $U_{DS} = U_{GS}-U_P$, kanal iščezava u području odvoda, no struja se održava na konstantnoj razini zbog velikog električnog polja koje "prebacuje" elektrone preko osiromašenog područja. Daljnje povećanje napona odvoda ima vrlo mali utjecaj na struju odvoda I_D . Za tranzistor u ovom stanju kažemo da je u zasićenju. Tvornički se može oformiti kanal s istim tipom primjesa kao uvod i odvod. Na ovaj način postiže se protjecanje struje I_D i kad je napon $U_{GS} = 0$, ukoliko postoji napon između uvoda i odvoda, a ovakav tip MOSFET-a naziva se osiromašeni tip. Kod ovog tipa, moguće je i smanjivati U_{GS} (i samim tim smanjivati I_D) – "osiromašiti" kanal - tako da $U_{GS} < 0$ i to sve dok $U_{GS} = U_P$. Nakon ovoga kanal više ne postoji i struja $I_D = 0$.

Najveće prednosti unipolarnih tranzistora su :

- vrlo veliki ulazni otpor tj. nulta ulazna struja (upravljanje bez snage)
- opadanje struje povećanjem temperature
- jednostavnost izrade
- brzina

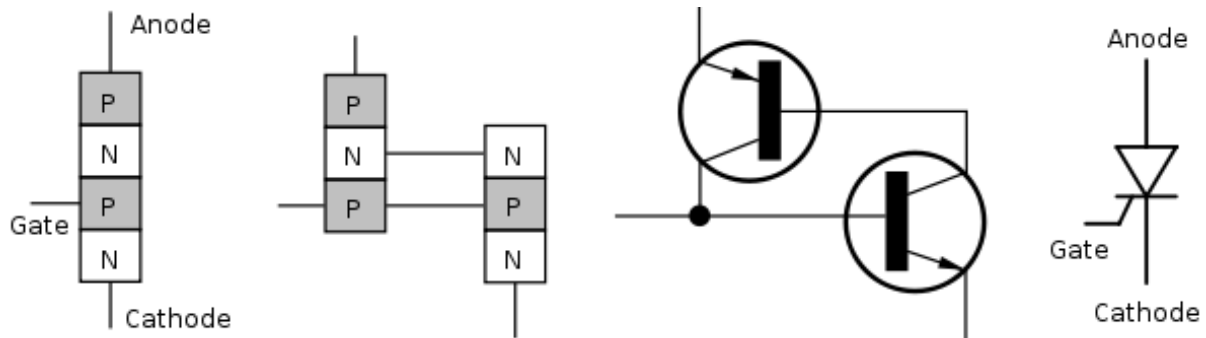
dok bipolarni tranzistori imaju linearniju karakteristiku i veće pojačanje.

5.8.3 TIRISTORI

Ako se tranzistor primjenjuje kao sklopka, njegov prijelaz iz nevodljivog stanja u vodljivo povezan je s prolaskom kolektorske struje u veću vrijednost za određene vrijednosti struje baze. Pri prolasku u vodljivo stanje na tranzistoru nastaju zamjetni gubitci snage koja se pretvara u toplinu. Gubitci električne snage se smanjuju i brzina promjene struje u elementu raste ako element ima statičku strujno-naponsku karakteristiku. Svojestvo je elementa s takvom karakteristikom da mu je struja pri povećanju napona do neke vrijednosti U_{PR} (preklopni napon) vrlo mala i da sporo raste. Nakon prekoračenja tog napona, struja naglo poraste. Takav element ima četveroslojnu strukturu i poznat je kao **četveroslojna dioda** ili dinistor.

Četveroslojne strukture dijelimo prema njihovim upravljačkim mogućnostima. Naime, ako četveroslojna struktura ima samo dvije osnovne elektrode (anodu i katodu), vodljivo i nevodljivo stanje postiže se promjenom napona napajanja. Ako, pak četveroslojna struktura posjeduje i treću, tzv. upravljačku elektrodu, prijelaz strukture iz vodljivog u nevodljivo stanje moguće je ostvariti i s pomoću upravljačke struje. Takve četveroslojne poluvodičke strukture nazvane su upravljivima ili tiristorima.

Tiristori su elektroničke komponente sa četveroslojnom poluvodičkom strukturom te sa upravljačkom elektrodom.

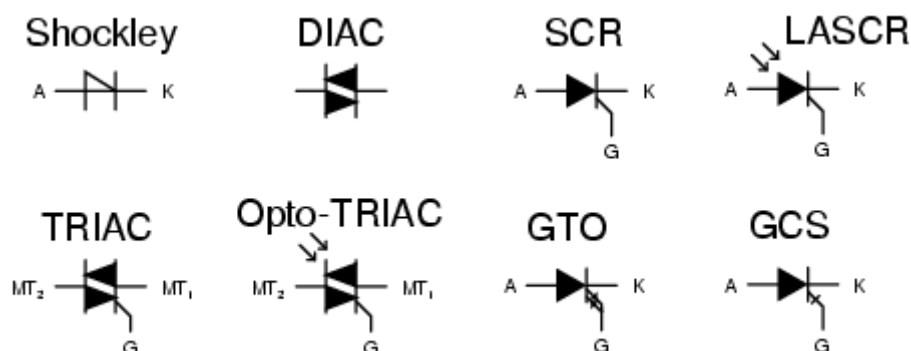


Slika 5.8.3 – 1 Struktura i simbol tiristora

Najvažnije svojstvo tiristora jest mogućnost upravljanja vrlo velikim snagama uz utrošak malih iznosa snaga. Tiristori imaju dva stabilna stanja (vodljivo i nevodljivo), a prijelaz iz jednoga stanja u drugo stanje vrlo je brz. Postoje brojne različite vrste tiristora – široko područje poluvodičkih elemenata, tako postoje tiristori s dvije, tri i četiri elektrode. Prema smjeru vođenja struje tiristore dijelimo na **jednosmjerne** i **dvosmjerne**. Prema načelu rada, razlikujemo slijedeće tiristore:

- jednosmjerni diodni tiristor,
- jednosmjerni upravljački triodni tiristor (SCR),
- dvosmjerni diodni tiristor (DIJAK) - koriste se u energetske pretvaračima, PLC-ovima, izmjeničnim pretvaračima i td.
- dvosmjerni upravljački triodni tiristor (TRIJAK).

Tiristori uglavnom se **koriste** gdje su velike struje i naponi, a češće se koriste za kontrolu izmjenične struje, gdje promjena polariteta struje uzrokuje automatsko isključivanje uređaja. Može se reći da uređaj radi sinkronizirano sa radom tiristora. Tiristori mogu se koristiti kao elementi kontrole za fazni kut faznih kontrolera. Oni se također mogu naći u napajanju za digitalne sklopove, gdje se koriste kao svojevrsni pojačani prekidač, kako bi spriječio eventualne prekide u napajanju koji mogu izazvati oštećenje komponenti. Tiristori se koriste u kombinaciji sa Zener diodom koja je pričvršćena na upravljaču elektrodu,. Ako se izlazni napon podigne iznad razine Zener napona , tiristor će napraviti kratki spoj na izlazi. Ova vrsta zaštite kruga poznata je pod nazivom *poluga*, a ima prednost u odnosu na standardne prekidače i osigurače jer stvara veliku vodljivost prema negativnom potencijalu (masi) što brzo odvodi višak energije/napona.



Slika 5.8.3 – 1 Simboli raznih tiristora



Slika 5.8.3 – 2 Izvedbe raznih tiristora

5.8.4 OPTOELEKTRONIČKI ELEMETI

Optoelektronički elementi su elektroničke komponente kod kojih je djelovanje povezano sa svjetlosnim efektom. One koriste fotoelektrične pojave u poluvodičima. Fotoelektrične pojave koje se javljaju u poluvodičima su:

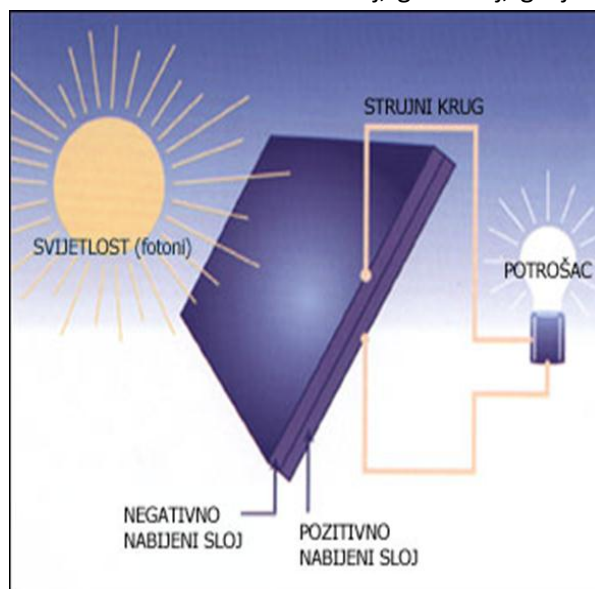
- **fotovodljivost** – je pojava električne vodljivosti poluvodiča pod utjecajem svjetlosti.
- **fotonaponski učinak** – je pojava napona na PN spoju poluvodiča zbog apsorpcije svjetlosti ili drugih elektromagnetskih zračenja. Djelovanjem svjetlosti nastaje višak nosioca naboja, pa se PN spoj može koristiti kao pretvornik svjetlosne energije u električnu.
- **elektroluminiscencija** – je pojava pretvorbe električne energije u svjetlosnu. Prolaskom struje kroz PN spoj nastaje emitiranje svjetlosti, stoga se može koristiti kao pretvornik električne energije u svjetlosnu.

Vrste optoelektroničkih elemenata su:

- **fotodetektor** – elementi koji svjetlosne veličine pretvaraju u električne, odnosno koji svjetlosnu energiju pretvaraju u električnu energiju (fotootpornici, fotodiode, fototranzistori, fototiristori i sunčane ćelije)
- **svjetlosni izvori** – elementi koji električnu energiju pretvaraju u svjetlosnu energiju (LED dioda i poluvodički laseri)
- **fotovezni ili optovezni elementi** – kombinacija svjetlosnog izvora i fotodetektora

Osnovni materijali koji se koriste za izradu optoelektroničkih elemenata su: silicij, germanij, galijev arsenid i dr.

Solarna ćelija je poluvodički uređaj koji se sastoji od velikih površina PN spoja diode, koja je u prisustvu sunca sposobna generirati korisnu električnu energiju. Solarne ćelije se sastoje od poluvodiča (najčešće silicija) koji apsorbira sunčevu svjetlost. Silicij se grije na ekstremne temperature te mu se dodaju bor i fosfor čime se stvara nestabilna okolina unutar ćelije. Daleko najčešći materijal za solarne ćelije je od kristalnog silicija. Kristalni silicij solarne ćelije može se izvesti na tri načina: monokristalni vafli, poliester i trakasti silicij. Postoji mogućnost i povezivanja ćelija i to na dva načina: paralelno i serijski.



Paralelno – paralelnim spajanjem dolazi do povećanja jakosti struje s povećanjem površine, izvodi se tako da se svi (+) polovi spoje na isti vodič, analogno i za (-) vodiče. Serijski – serijskim spajanjem dolazi do povećanja napona s povećanjem površine, izvodi se tako da se naizmjenično spajaju (+) i (-) pol ćelije u nizu. Fotonaponske solarne ćelije proizvode struju izravno iz sunčeve svjetlosti pa funkcioniraju kao ekološki izuzetno prihvatljivi a gospodarski sve zanimljiviji izvori struje. FN ćelije dugoga su vijeka i lako se postavljaju te ih je veoma lako održavati. Zbog toga se one razvijaju u mnogim zemljama diljem svijeta, pa čak i tamo gdje imamo manje sunčanih dana nego u Hrvatskoj. Da bi se proizvele FN solarne ćelije potrebno je utrošiti određenu količinu električne energije. Vrijeme povrata uložene energije je vrijeme koje FN ćelija mora raditi da bi proizvela električnu energiju koja je bila potrebna za njenu proizvodnju.

Sunčeva energija uzrokuje izlazak elektrona iz atoma i njihovo kretanje kroz materijal između dva suprotno nabijena sloja čime se stvara električna struja. Osnovni napon koji se dobije po pojedinoj ćeliji ovisi o vrsti materijala i načinu izrade i obično iznosi oko 1V. Povezivanjem više fotonaponskih (solarnih) ćelija i njihovim kombinacijama proizvode se fotovoltaični paneli s uobičajnim radnim

naponima od 12 ili 24V istosmjernog napona (DC). Snaga takvih panela direktno ovisi o ukupnoj površini svih ćelija. Tipičan solarni panel snage 80 – 100W i napona 12V DC ima dimenzije 100cm x 50cm. Cijena električne energije iz fotonaponskih panela je zbog upotrebe posebnih materijala i visoke tehnologije izrade dosta veća (gotovo faktor 2x) od cijene iz konvencionalnih izvora, ali zato je to vrlo čisti oblik i vrlo rasprostranjen oblik energije te vrlo isplativ u područjima gdje nema klasične električne infrastrukture. Po načinu izrade fotonaponske ćelije se dijele na:

- monokristalinične (najčešće Si, η oko 18%),
- polikristalinične (najčešće Si, η oko 14 %),
- amorfne (silicij, η 4 do 6%),
- tanko slojne (film CuInSe_2 , η oko 16%).

Fotonaponske ćelije se i dalje istražuju i razvijaju. Želi im se povećati efikasnost, a smanjiti cijena izrade. No i na ovom sadašnjem stupnju, fotovoltaične ćelije vrlo uspješno sudjeluju u čitavom nizu tehnologija koje koriste energiju sunca (tzv solarne tehnologije).

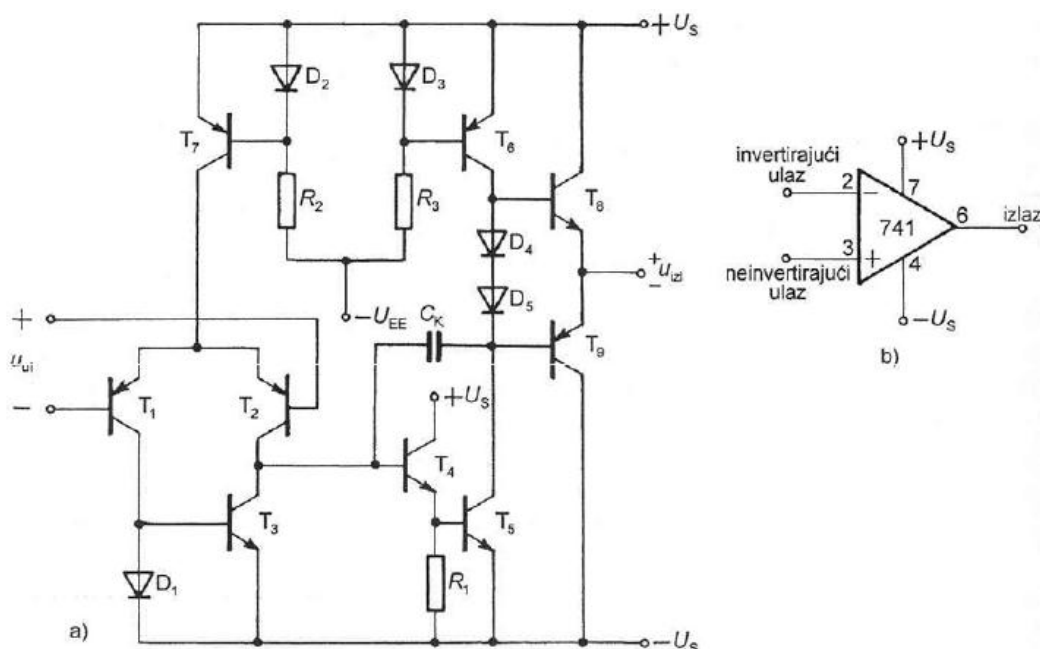
Slika 5.8.4 – 1 Prikaz fotovoltaičnih ćelija



5.8.5 INTEGRIRANI SKLOPOVI

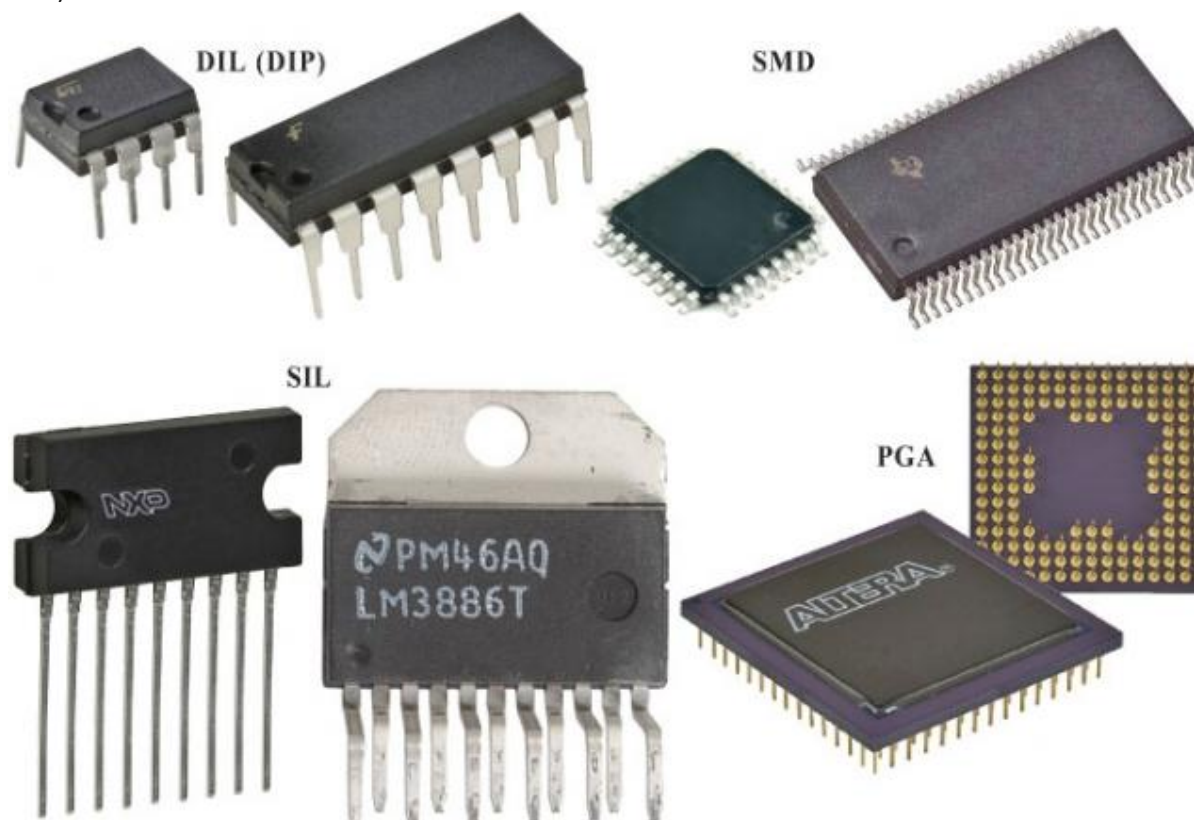
Integrirani sklopovi (eng. integrated circuits, **IC**) imaju male dimenzije, malu masu i malu potrošnju snage. Primjenjuju se u suvremenim elektroničkim sklopovima. Oni zamjenjuju tranzistore u elektroničkim sklopovima kao što su prethodno tranzistori zamijenili vakuumske elektronske cijevi. Integrirani sklopovi su suvremene mikroelektroničke komponente za elektroničke sklopove. Sastoje se od mikroskopski malih elektroničkih komponenata kao što su diode, tranzistori, otpornici i kondenzatori. Pakiraju se u pojedinačna hermetički zatvorena kućišta s priključnicama.

Integrirani sklopovi mogu biti linearni i digitalni. **Linearni integrirani sklopovi** koriste se u analognim sklopovima, kao što su audio pojačala, regulatori napona, operacijska pojačala i radiofrekvencijski sklopovi. Većina su linearnih integriranih sklopova komponente male snage s disipacijom (gubitkom) snage manjom od 1 W. Oni su, međutim, raspoloživi i kao čipovi većih snaga, 5 W ili više. **Digitalni integrirani sklopovi** koriste se u računalima, kalkulatorima, digitalnim satovima, kao i mnogim drugim digitalnim sklopovima.



Slika 5.8.5 – 1 Linearni integrirani sklop 741: a) pojednostavljena shema spoja; b) simbol sklopa

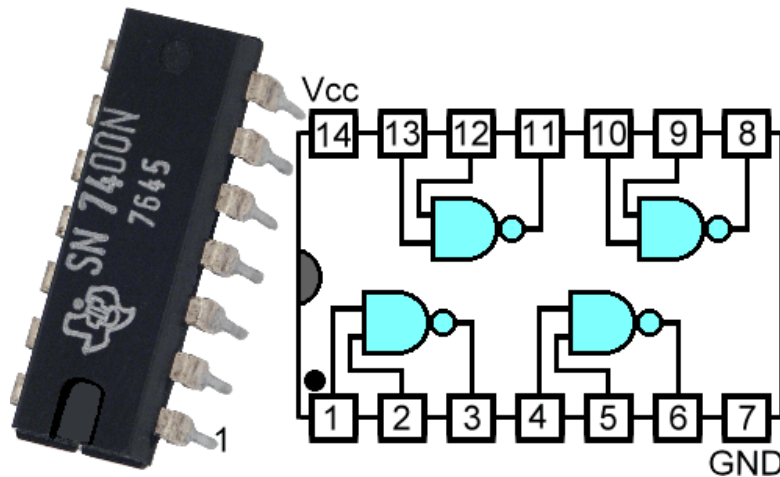
Kućišta mogu biti različitog oblika s različitim brojem priključaka (izvoda), plastična ili keramička. Sama kućišta znatno su većih dimenzija od integriranog sklopa. Ograničenje u izvedbi integriranih sklopova jest broj priključaka. Ovisno o broju ulaza i izlaza koje ima logički sklop, u jedno kućište moguće je smjestiti jedan osnovni logički sklop ili više njih. Za složenije sklopove potrebno je više priključaka. Stoga su kućišta takvih sklopova većih dimenzija. Česti oblik kućišta integriranih sklopova je **dvolinijsko kućište** (eng. dual-in-line package, skraćeno DIP). Sve više se proizvode digitalni sklopovi u kućištima za tehnologiju površinske montaže (eng. surface-mount technology, skraćeno SMT).



Slika 5.8.5 – 2 Izgled kućišta digitalnih integriranih sklopova

Danas se proizvodi mnogo različitih sklopova u jednom kućištu, od osnovnih logičkih do čitavih uređaja. Osnovni integrirani logički sklopovi sadrže manji broj integriranih elemenata (do 100) i nazivaju se **sklopovi niskog stupnja integracije** (eng. SSI, skraćeno od Small Scale Integration). Složeniji integrirani sklopovi (brojila, registri, dekoderi) sadrže veći broj integriranih elemenata (od 100 do 1000) i nazivaju se **sklopovi srednjeg stupnja integracije** (eng. MSI, skraćeno od Medium Scale Integration). Još veći broj elemenata (od 1000 do 100000) sadrže **sklopovi visokog stupnja integracije** (eng. LSI, skraćeno od Large Scale Integration). Sklopovi s više od 100 000 integriranih elemenata nazivaju se sklopovima **vrlo visokog stupnja integracije** (eng. VLSI, skraćeno od Very Large Scale Integration). Tu spadaju memorije i mikroprocesori. U posljednje vrijeme proizvode se sklopovi s još većim brojem elemenata koji se svrstavaju pod naziv sklopovi **ultravisokog stupnja integracije** (eng. ultra large-scale integration, skraćeno ULSI). Svi integrirani digitalni sklopovi mogu se svrstati u nekoliko skupina. Za sklopove unutar neke skupine karakteristično je da su prilagođeni za međusobno spajanje, što omogućuje relativno jednostavnu gradnju složenih digitalnih uređaja. Skupine integriranih sklopova s bipolarnim tranzistorima poznate su pod nazivima **TTL i ECL**, a skupine s unipolarnim tranzistorima su **CMOS i NMOS**.

Pri radu s integriranim sklopovima neophodno je poznavati raspored priključaka ili dijagram spajanja (eng. pin connection diagram, pin assignment, pin description, pin configuration). Iz njega se vide funkcije izvoda integriranoga sklopa.

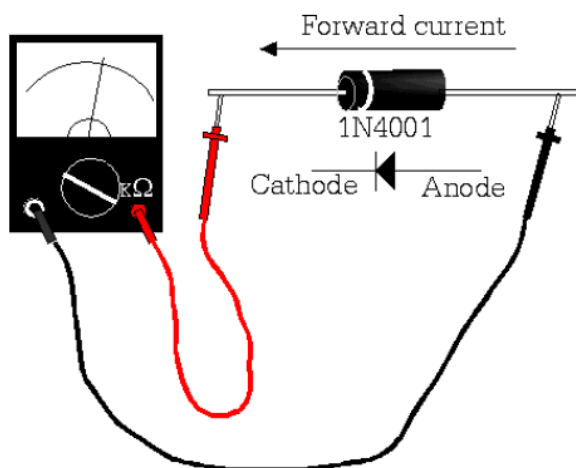


Slika 5.8.5 – 3 Izgled integriranih logičkih sklopova unutar kućišta

Priključci označeni s U_{cc} , odnosno V_{cc} (eng. voltage) i GND (engl. ground) služe za spajanje zajedničkoga napona napajanja za sve sklopove unutar jednoga kućišta. Na priključak V_{cc} spaja se pozitivni pol izvora napajanja, a na priključak GND negativni pol.

5.9. ISPITIVANJE POLUVODIČKIH ELEMENATA

5.9.1 ISPITIVANJE POLUVODIČKE DIODE

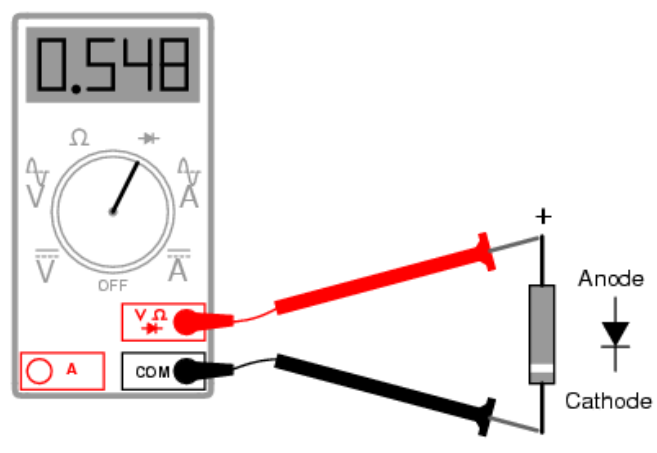


Kod analognog voltmetra koristi se skala za manji otpor (do 2 k Ω). Obična signalna dioda ili ispravljačka dioda treba pokazati mali otpor (tipično 2/3 skale ili nekoliko stotina ohma) u jednom smjeru, dok u drugom treba pokazati beskonačni otpor. Ne bi trebalo biti blizu 0 Ω (kratki spoj) ili u prekidu u oba smjera. Germanijeva dioda će pokazati niži otpor, zbog nižeg pada napona na njoj.

Slika 5.9.1 – 1 Ispitivanje poluvodičke diode analognim instrumentom

Na digitalnom multimetru, obično postoji mod za ispitivanje dioda. Silicijska dioda će pri tom pokazati 0.5 do 0.8V u propusnom smjeru i prekid u nepropusnom smjeru. Germanijeva dioda će pokazati manji napon, između 0.2 i 0.4V u propusnom smjeru. Većina dioda (99 od 100) su u kratkom spoju kada su neispravne.

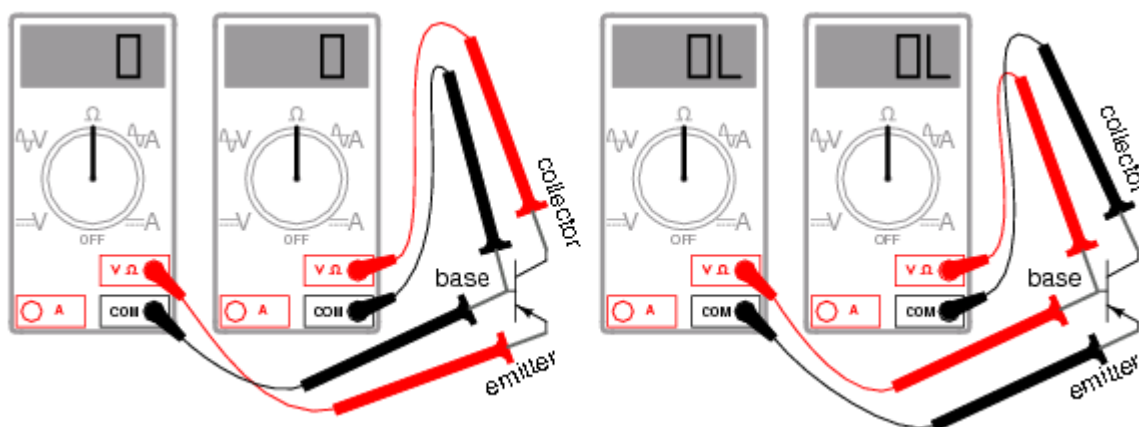
Slika 5.9.1 – 2 Ispitivanje poluvodičke diode digitalnim instrumentom



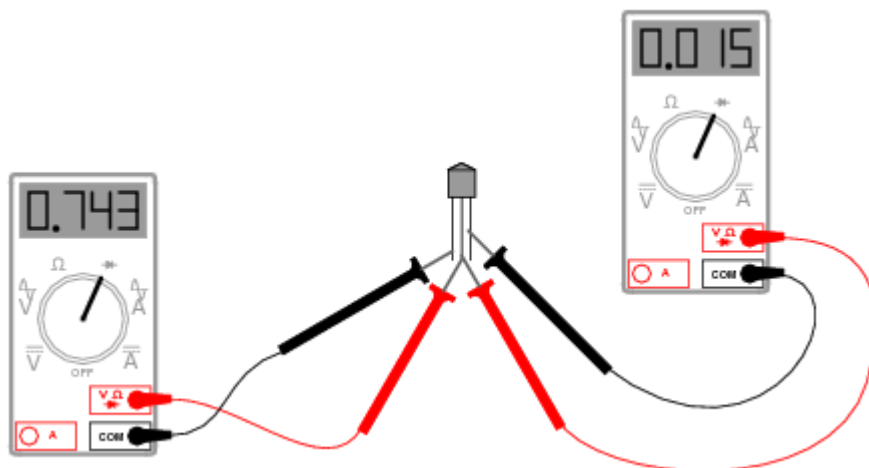
5.9.2 ISPITIVANJE TRANZISTORA

Ispisnost nekog tranzistora može se najbrže i najjednostavnije odrediti ometrom. Pri tom treba paziti na veličinu napona baterije u ometru i na maksimalnu struju koja može teći u njegovom vanjskom krugu. Ta struja za tranzistore koji nisu predviđeni za pojačanje snage ne bi smjela biti veća od 1 (mA) jer bi se tranzistor mogao oštetiti.

Tranzistor se kontrolira tako da se izmjere otpori kolektor-baza, emiter-baza. Mjerenje se zasniva na činjenici da se za ovu svrhu tranzistor može smatrati kao da je sastavljen od dviju u seriju suprotno spojenih dioda. U propusnom smjeru taj otpor iznosi do nekoliko stotina oma, a u nepropusnom smjeru oko 100 i više k Ω . Ako je otpor u nepropusnom smjeru manji od navedenih vrijednosti ili pak, omometer pokaže prekid, to znači da je tranzistor neispravan.



Slika 5.9.2 – 1 Ispitivanje bipolarnog tranzistora digitalnim omometrom



Slika 5.9.2 – 2 Ispitivanje N kanalnog JFET-a

5.10. PITANJA ZA PROVJERU ZNANJA

1. Što je silicij?
2. Ukratko pojasnite kako se dobiva silicij.
3. Koja su tehnološka i mehanička svojstva silicija?
4. Koja su kemijska svojstva silicija?
5. Gdje se sve koristi silicij?
6. Što je germanij?
7. Ukratko pojasnite kako se dobiva germanij.
8. Koja su tehnološka i mehanička svojstva germanija?
9. Koja su kemijska svojstva germanija?
10. Gdje se sve koristi germanij?
11. Što je bor?
12. Ukratko pojasnite kako se dobiva bor.
13. Koja su tehnološka i mehanička svojstva bora?
14. Koja su kemijska svojstva bora?
15. Gdje se sve koristi bor?
16. Što je selenij?
17. Ukratko pojasnite kako se dobiva selenij.
18. Koja su tehnološka i mehanička svojstva selenija?
19. Koja su kemijska svojstva selenija?
20. Gdje se sve koristi selenij?
21. Što je telurij?
22. Ukratko pojasnite kako se dobiva telurij.
23. Koja su tehnološka i mehanička svojstva telurija?
24. Koja su kemijska svojstva telurija?
25. Gdje se sve koristi telurij?
26. Što je galij?
27. Ukratko pojasnite kako se dobiva galij.

28. Koja su tehnološka i mehanička svojstva galija?
29. Koja su kemijska svojstva galija?
30. Gdje se sve koristi galij?
31. Kako sve možemo podijeliti poluvodičke materijale?
32. Kako nastaju keramički poluvodiči?
33. Koje su osnovne karakteristike poluvodičkih materijala?
34. Kako nastaje poluvodič N tipa?
35. Koji materijali se koriste za izgradnju poluvodiča N tipa?
36. Kako nastaje poluvodič P tipa?
37. Koji materijali se koriste za izgradnju poluvodiča P tipa?
38. Koje se sve pojave javljaju u poluvodičima?
39. Nacrtajte simbol poluvodičke diode.
40. Koje je osnovno svojstvo poluvodičke diode?
41. Kako nastaje područje osiromašnja PN spoja?
42. Što je napon praga poluvodičke diode i koliko on iznosi?
43. Navedite različite tipove dioda.
44. Nacrtajte simbole različitih tipova dioda.
45. Što je bipolarni tranzistor?
46. Koje su vrste bipolarnog tranzistora i koji su nazivi elektroda?
47. Nacrtajte konstrukcije i simbole bipolarnih tranzistora.
48. Koji su mogući spojevi bipolarnog tranzistora?
49. Koja su sva područja rada bipolarnog tranzistora?
50. Koje su najvažnije značajke bipolarnih tranzistora?
51. Što su unipolarni tranzistori i koje su vrste?
52. Kako se nazivaju priključnice unipolarnih tranzistora, te koja im je uloga?
53. Nacrtajte simbole svih vrsta unipolarnih tranzistora.
54. Koje su prednosti unipolarnih tranzistora?
55. Što su tiristori i gdje se primjenjuju?
56. Koje su sve vrste tiristora?
57. Nacrtajte simbole svih tiristora.
58. Što su optoelektronički elementi i koje im je najosnovnije svojstvo?
59. Koje su sve fotoelektrične pojave optoelektroničkih elemenata?
60. Navedite sve vrste optoelektroničkih elemenata.
61. Od kojih materijala se uglavnom izrađuju optoelektronički elementi?
62. Što su solarne ćelije?
63. Kako rade solarne ćelije?
64. Koja je uloga integriranih sklopova?
65. Koje su vrste integriranih sklopova i za što se koriste?
66. Kakva su kućišta integriranih sklopova?
67. Prema broju integriranih elemenata unutar integriranog sklopa, kako ih sve možemo podijeliti?
68. Koji su česti nazivi / kratice integriranih sklopova?
69. Na koji način se ispituje poluvodička dioda?
70. Na koji način se ispituje tranzistor?

6. IZOLACIJSKI MATERIJALI

Treća grupa materijala koji se upotrebljavaju u elektrotehničkim proizvodima su izolacijski materijali, a služe za:

- izoliranje vodiča, vodova i kabela
- izoliranje namota
- izoliranje svih vrsta vodičkih elemenata (kontakti, elektrode, spojevi, izvodi i dr.)
- izoliranje raznih konstrukcijskih dijelova

Izoliranje konstrukcijskih dijelova se često rješava tako da se ti dijelovi rade od izolacijskog materijala s velikim specifičnim otporom $> 10^{12} \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ ($10^6 \Omega \text{ m}$).

Električni proizvod, a time i izolacijski materijal, radi pod veoma različitim uvjetima kao što su:

- visina napona
- veličina struje
- razne frekvencije
- razna dinamika rada
- razni ambijenti

Izoliranje mora biti pouzdano i dugotrajno, a izolacija mora odolijevati naprezanjima koja proizlaze iz funkcioniranja proizvoda: električkim, mehaničkim, toplinskim, te naprezanjima koja proizlaze iz utjecaja okoline. To su vanjska naprezanja, određena tehno-klimatskim faktorima tj.:

- temperaturom
- vlagom
- kemikalijama
- raznim zračenjima

Značajno je da obje vrste naprezanja djeluju istovremeno i međusobno se potpomažu. Izolacijski materijal istovremeno mora biti tehnološki prikladan i ekonomski opravdan.

6.1. ZAHTJEVI ZA IZOLACIJSKE MATERIJALE

Električno polje je glavni izvor naprezanja u električnom proizvodu, a ujedno je i uzrok svim ostalim naprezanjima. Električno polje je izvor naprezanja kojeg izolacija mora trajno izdržati. Pod utjecajem polja događaju se promjene u izolaciji: teče struja, dolazi do polarizacije, javljaju se gubitci, parcijalna izbijanja, te konačno može doći do proboja.

Materijal nije idealan pa mu ni otpor nije beskonačan, nego ima konačnu, veoma veliku vrijednost, koja određuje struju kroz izolacijski materijal. Taj otpor se naziva **izolacijski otpor** (R_i) i važan je za praksu.

$$R_i = \frac{R_p \cdot R_u}{R_p + R_u} \quad R_p = \frac{R_p \cdot R_i}{R_u - R_i}$$

Kako su otpori jako veliki, slijedi da su struje jako male. Utjecaj površine ima veliku ulogu u veličini struje pa se izolacijski otpor može podijeliti na:

- **unutarnji otpor** (R_u) koji određuje struju kroz materijali
- **površinski otpor** (R_p) koji određuje struju po površini materijala

Unutarnji otpor (R_u) ovisi o svojstvima materijala i na njega se ne može utjecati, ali zato se može utjecati na površinski otpor, ukoliko se ustanovi da je mali, te da je zbog njega i izolacijski otpor premalen. To se postiže različitim načinima zaštite ili obrade površine izolacijskog materijala. Kvaliteta površine izolacijskog materijala je važna i zbog toga što je po svom sastavu izolacijski materijal uglavnom nehomogeniji od metala pa okolina ima daleko veći utjecaj na njegova svojstva.

Polarizacija je pomak materije, orijentacija te nastajanje dipola pod utjecajem polja. Mjera za polarizaciju je relativna dielektrična konstanta (ϵ_r), koja kaže koliko je kapacitet materijala veći od kapaciteta zraka odnosno vakuuma. ϵ_0 je dielektrična konstanta vakuuma, a računa se prema izrazu:

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$$

Elektronska deformacijska polarizacija nastaje zbog mijenjanja putanje elektrona oko matične jezgre. Promjene putanje nastaju unutar atoma, nema trenja sa susjednim atomima, tj. ta vrsta polarizacije ne izaziva gubitke. Masa elektrona je vrlo mala pa može, zbog male tromosti, pratiti vrlo brze promjene vanjskog polja.

Strukturna polarizacija (pozitivnim nabojem) je složena i ovisi od materijala do materijala. To je ustvari gibanje slobodnih iona kroz materijal. To su čestice velikih masa koje se pri svom putu sudaraju s ostalim molekulama i pri tim sudarima predaju energiju, što opet znači gubitke. U realnim materijalima mogu biti razne polarizacije, pri čemu je elektronska uvijek prisutna. O kombinaciji polarizacija u materijalu ovisi veličina dielektrične konstante, te njena vremenska i toplinska ovisnost. Polarni materijali imaju velike dielektrične konstante, koje izazivaju gubitke i ovisne su o frekvenciji, te se ne mogu upotrebljavati u visokofrekventnoj tehnici. Dielektrični gubici predstavljaju gubitke energije koji se u materijalu pod utjecajem polja pretvaraju u toplinu, te povišuju temperaturu materijala. Kod istosmjernog polja gubici su zbog vodljivosti, a kod izmjeničnog polja gubiticima pridonose i gubici zbog polarizacije. Dakle, gubici ovise i o frekvenciji narinutog polja. Mjera za gubitke je kut gubitaka $\tan \delta$.

$$\begin{aligned} P &= UI \cos \varphi & \delta &= 90 - \varphi & P &= UI \sin \delta \\ \text{za male vrijednosti } \delta &\leq 6^\circ & \sin \delta &= \tan \delta \\ P &= \tan \delta \end{aligned}$$

Parcijalna izbijanja su proboji kroz dio izolacije, ili što je puno češće proboji kroz zračne uključke, koji se nalaze u šuplinama izolacije ili izolacijskog sistema. Uzroci parcijalnih izbijanja su uz dovoljno veliko polje, nehomogena izolacija, ili kod složenih izolacija nejednolika svojstva materijala koji čine tu složenu izolaciju. Djelovanje parcijalnih izbijanja je prilično dugotrajan proces, a učinci djelovanja se primjećuju tek nakon dužeg vremena. Po svome karakteru djelovanje je složeno i može se podijeliti na:

- mehaničko (udaranje iona u stjenke šupljina)
- kemijsko (kemijske reakcije plinova unutar šupljine ili tih plinova s okolnom izolacijom)
- toplinsko (povišenje temperature u šupljini i okolnom materijalu)
- električko (povišenje polja u izolaciji)

Električni proboj nastupa iznad kritične vrijednosti električnog polja. Uzroci prekoračenja polja mogu biti različiti. Jednom je to nedopušteni porast narinutog napona, drugi puta je to slabljenje svojstva materijala kao posljedica njegova starenja. **Dielektrična čvrstoća (E)** materijala je veličina električnog polja kod kojeg dolazi do proboja materijala, a može se izračunati prema izrazu:

$$E = U/d$$

Dielektrična čvrstoća je svojstvo materijala koje ovisi o debljini i postepeno pada s porastom debljine. Probojni napon je visina napona kod kojeg je došlo do proboja materijala. To je svojstvo konkretnog elementa ili materijala. Materijal se zbog gubitaka zagrijava, njegove unutarnje veze slabe. Nakon nekog vremena veze su toliko oslabile da je postojeće polje dovoljno veliko da dođe do proboja. **Probojni napon** ovisi o vrsti materijala, trajanju naprezanja, debljini, temperaturi, frekvenciji, vlazi, stanju površine, ukljućima u materijalu.

Povišenje temperature je također posljedica narinutog električnog polja. Uzrok su gubici u vodičima, magnetskim krugovima i izolaciji, a može biti i posljedica čisto mehaničkih naprezanja. Izolacija je osjetljiva na porast temperature, a moguće posljedice mogu biti reverzibilne i

ireverzibilne. Reverzibilne: manji otpor, veći gubitci, manja dielektrična čvrstoća, istezanje, promjena oblika zbog termoplastičnosti, promjena agregatnog stanja, promjena viskoziteta, (koje se vraćaju na početne vrijednosti kad se materijal ohladi). Ireverzibilne: pucanje i dekompektizacija radi nejednolikog istezanja, promjena kemijskog sastava. I jedne i druge promjene mogu dovesti do uništenja izolacije.

Uzroci **mehaničkih naprezanja** nastaju uslijed:

- električkih i elektromagnetskih sila
- uslijed mehaničkih opterećenja (pritisak, rotacija, vibracije)
- nejednolikog toplinskog rastezanja
- Moguće posljedice su:
- dekompektizacija
- razaranje (sporo ili brzo)

Budući da sva ta naprezanja djeluju istovremeno, međusobno se potpomažu i sva zajedno slabe svojstva. Vanjski utjecaji kojima uža i šira okolina može djelovati na proizvod:

- temperatura i promjene temperature okoline
- vlaga i promjene vlage (relativna, apsolutna) što uzrokuje kondenzate
- oborine (voda, slana magla, kemijski agresivni sastojci)
- elektrolitski sastojci
- prašina, abrazija
- talozi (smanjenje površinskog otpora)
- zračenja; prirodna (sunce, kozmička) i umjetna (radijacija)
- biološki faktori (plijesni, gljivice, termiti)

To su sve tehno-klimatski elementi, tj. klima. **Klimatska postojanost** je otpornost izolacijskog materijala na tehno-klimatske elemente i sposobnost izolacijskih materijala da zadrže svoja temeljna svojstva pod ukupnim utjecajem svih tih faktora koji sačinjavaju pojam klime. Izolacijski materijali su na većinu ovih faktora znatno osjetljiviji od metala, što proizlazi iz njihove građe. Specifičnosti izolacijskih materijala u odnosu na metale su:

- više ili manje osjetljivi spojevi
- slabi vodiči kako toplinski tako i električki
- porozni (često u cijeloj strukturi)

To znači da vanjski utjecaji imaju za posljedicu:

- reverzibilne promjene i pogoršanje električkih svojstava
- trajne promjene svih svojstava uključujući mogućnost razgradnje

6.2. SISTEMATIZACIJA IZOLACIJSKIH MATERIJALA

Postoji veliki broj izolacijskih materijala, vrlo različitih svojstava, raznih oblika i raznih agregatnih stanja. Sistematizacija izolacijskih materijala pomaže lakšem snalaženju pri upotrebi. Postoji nekoliko kriterija prema kojima se provodi sistematizacija izolacijskih materijala:

- po porijeklu: prirodni, umjetni i modificirani
- po primjeni: trajne tekućine, skrutive tekućine, termoplastični, termostabilni, elastomeri
- po agregatnom stanju: plinoviti, tekući, kruti
- po toplinskoj postojanosti: toplinske klase od Y do C
- po kemijskoj građi: organski i anorganski

Koja podjela je aktualna ovisi o trenutnim potrebama izbora. U nastavku koristit će se podjela po kemijskoj građi, jer te grupe materijala imaju mnoge zajedničke karakteristike. Organski materijali imaju u sastavu ugljik, koji je presudan za dobar dio njihovih svojstava, među kojima je niska toplinska postojanost, a anorganski, koji nemaju ugljika, imaju visoku toplinsku postojanost.

Izolacijski materijali se dobivaju na različite načine. Mogu se upotrebljavati prirodne sirovine, koje su rijetko kada odmah upotrebljive. Često je potrebna prerada, vrlo složena, uglavnom fizička, što znači bez kemijske promjene strukture. Ponekad proces prerade može biti i fizikalno-kemijski, čime se utječe na strukturu materijala. Uporabni oblici su često jako različiti od polazne sirovine (papir), tako da ih je na prvi pogled teško prepoznati.

Osim ovih jednostavnih izolacija (ne po svojoj građi) upotrebljavaju se sve više takozvane složene izolacije koje se sastoje od više izolacijskih materijala. One se izrađuju zbog sve viših zahtjeva, koji se postavljaju na izolacijske materijale, pa jedan sam ne može udovoljiti svim uvjetima. Prema tome složene izolacije se izrađuju zbog:

- proširenja asortimana
- boljih fizikalnih svojstava
- boljih tehnoloških sposobnosti

Ni složena izolacija ne može obaviti sve funkcije koje se traže od izolacije, pa se u jedan uređaj ugrađuje više izolacijskih materijala koji sačinjavaju izolacijski sustav.

6.3. ORGANSKI IZOLACIJSKI MATERIJALI

Organski izolacijski materijali su prirodne tvari organskog porijekla, što znači da u svom sastavu imaju ugljik. Ugljik je kemijski veoma aktivan i ima mogućnosti stvaranja vrlo raznolikih veza. Zahvaljujući tim raznolikostima povezivanja, organski spojevi su visokomolekularni i vrlo raznoliki. Opće karakteristike su im:

- velika raznolikost (oblika, stanja i tehnoloških mogućnosti)
- manja kemijska stabilnost (lakše stupanje u kemijske reakcije)
- izraženije starenje
- niža toplinska postojanost
- oprez sa klimatskim utjecajima
- često su vrlo higroskopni

Njihova prerada može biti vrlo raznolika što ovisi od polazne sirovine i krajnjeg proizvoda. Krajnji proizvodi mogu se dobiti na sljedeće načine:

- pročišćavanjem bez kemijske obrade, koje često može biti vrlo složeno, dobivamo prirodne organske materijale (papir, ulja)
- obradom materijala uz kemijsku modifikaciju, znači djelomičnu promjenu kemijskih veza, a time i svojstava, dobivamo modificirane organske materijale (proizvodi na bazi celuloze)
- kemijskom sintezom dobivamo potpuno nove materijale, koji se od početnih sirovina razlikuju po svojstvima, obliku i veličini molekula (umjetne mase)

Po vrstama i oblicima primjene dijelimo organske izolacijske materijale na:

- trajne tekućine (služe za ispunu šupljina)
- skrutive tekućine (služe za ispunu šupljina, premaze, veziva)
- kruti termoplastični (služe za izradu raznih oblikovanih dijelova, vlakna, folije, cijevi)
- kruti termostabilni - vlaknasti - papiri, tkanine (služe za nosioce u složenim izolacijama)
- kruti termostabilni - mase (služe za izradu ljepila, složenih izolacija, oblikovanih dijelova)
- elastomeri - trajno elastični - guma (služe za omotače, oblikovane dijelove)

6.3.1 MINERALNA ULJA

Mineralno ulje je trajna prirodna tekućina, smjesa tekućih ugljikohidrata. Dobiva se preradom nafte, tj. mazuta. Prema namjeni u elektrotehnici mineralna ulja se dijele na transformatorsko, kondenzatorsko i kabelsko. Kondenzatorsko i kabelsko ulje su nešto čišći. Mineralno ulje je svjetlo



žuta tekućina (nijanse boje ovise o porijeklu). Također, prilikom starenja mineralnom ulju raste kiselinški broj. Ovakvo mineralno ulje se može regenerirati, u prvoj fazi fizički zagrijavanjem, cijeđenjem centrifugiranjem i sušenjem, a kasnije kemijskim postupkom, koji je jako sličan rafinaciji. Upotrebljava se za izolaciju, a ujedno i kao rashladno sredstvo u transformatorima, kondenzatorima i kabelima. Naročito kvalitetna se pokazala kombinacija papir - ulje, gdje se papir i ulje izvanredno nadopunjavaju. Ulje popuni šupljine u papiru i tako mu smanji higroskopnost, a papir prekida eventualno nastale polarne lance u ulju, te mu tako poboljša električna svojstva. Kako je mineralno ulje lako zapaljivo, ne smije se upotrebljavati tamo gdje je velika opasnost od požara (rudnici), te se tada kao nadopuna i ponekad zamjena mineralnom ulju upotrebljavaju modificirana ulja.

6.3.2 MODIFICIRANA ULJA



Modificirana ulja su klorirani ugljikovodici. Zbog klora u svom sastavu ne gore, ali su im pare otrovne, kemijski su agresivnija, o čemu se mora voditi računa prilikom izbora ostalih materijala u tom električnom proizvodu. Inače najlakše se prepoznaju po većoj težini (za razliku od mineralnog ulja, modificirana ulja su teža od vode).

6.3.3 BILJNA ULJA

Biljna ulja spadaju u sušive tekućine. Sušive tekućine su takvi materijali koji su prilikom primjene u tekućem agregatnom stanju, a svoju funkciju obavljaju u krutom agregatnom stanju. Do skrutnjavanja može doći na sobnoj temperaturi ili pri povišenoj temperaturi s ili bez katalizatora. To su preteče modernih lakova (na njihovoj osnovi su napravljeni prvi lakovi).

6.3.4 VOSKOVI I BITUMEN



Voskovi i bitumen su prirodni termoplastični materijali (crne boje). Upotrebljavaju se za impregnaciju papira i zaštitu od vlage, jer su nehigroskopni.

6.3.5 PRIRODNE SMOLE

Prirodne smole su prirodni termoaktivni materijali. U sirovom stanju mogu se rastaliti ili otopiti u otapalima, a ako su duže vrijeme izloženi višim temperaturama konačno otvrdnu i više se ne mogu rastaliti. Mogu biti biljnog ili životinjskog porijekla. Najpoznatiji je **šelak**, nekad nezamjenjiv kao vezivo. Žute je boje životinjskog porijekla, dobiva se pročišćavanjem i prekuhavanjem. Razvojem kemije zamijenjen je umjetnim masama.



6.3.6 MODIFICIRANE SMOLE

Modificirane smole su uglavnom na bazi celuloze. Dobiju se kemijskom obradom celuloze dušičnom kiselinom - nitroceluloza (celuloid, nitrolakovi) ili octenom kiselinom - acetilceluloza (celulozni triacetat, acetatna svila).

6.3.7 KAUČUK I GUMA

Kaučuk i guma: Kaučuk je prirodni elastomer, koji se dobiva iz drveta. Njegova elastičnost je posljedica *cik-cak* strukture molekula koje se pod mehaničkom silom rastežu. Prirodni kaučuk je niske toplinske postojanosti, ljepljiv je pa nije pogodan za primjenu. Zato se vulkanizira, obrađuje



sumporom, te se dobiva guma, koja se i upotrebljava. Rezultati vulkanizacije su bolja toplinska, kemijska i mehanička svojstva.

Karakteristike gume su:

- dobra električna svojstva
- nehigroskopnost
- polarna je (nije za visokofrekvencijsku tehniku)
- stari (gubi elastičnost, dobiva risove)
- niska toplinska postojanost (klasa Y)
- topiva je u ulju (ne smije doći u kontakt s mineralnim uljem)
- sumpor, koji je unesen u gumu vulkanizacijom, napada bakar

Upotrebljava se za izoliranje vodiča i kabela, kao brtvila. U zamjenu za prirodnu gumu načinjene su umjetne gume (butadilen, neopren). To su kemijski spojevi otporniji na starenje, uljostabilni, ali nešto lošijih mehaničkih svojstava.



Slika 6.3.7 – 1 Primjeri korištenja kaučuk gume

6.3.8 PRIRODNA ORGANSKA VLAKNA

Prirodna organska vlakna: To su vlakna biljnog i životinjskog porijekla. Služe za izradu raznih izolacijskih materijala. Vrste vlakana su:

- celulozna (uglavnom se dobivaju iz drveta)
- lanena
- pamučna
- svilena (životinjskog porijekla)



Slika 6.3.8 – 1 Vrste prirodnih vlakana: a) celuloza; b) lan; c) pamuk; d) svila

Zajednička svojstva su im:

- velike tehnološke sposobnosti za izradu prediva ili papira, odnosno ljepenke
- dobra mehanička svojstva
- niska toplinska postojanost (klasa Y)
- neotpornost na starenje
- higroskopnost (proizlazi iz vlaknaste građe, pune šupljina)

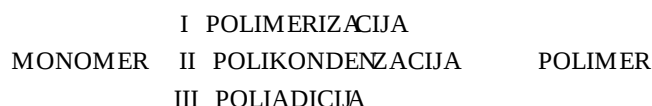
Upotrebljavaju se za izradu:

- papira i ljepenki
- prediva kao sirovine za tekstilne proizvode
- elementarna vlakna se upotrebljavaju kao vlaknasto punilo

6.3.9 UMJETNE MASE (SMOLE)

Umjetne mase (sintetičke mase, umjetne smole) su kemijskom sintezom dobiveni umjetni visokomolekularni spojevi, nastali omrežavanjem niskomolekularnih sirovina. Takvi spojevi imaju, u odnosu na sirovine, potpuno nova svojstva, izgled i sposobnosti. Sve veći im je značaj i na mnogim

područjima su praktički potpuno zamijenili odgovarajuće prirodne materijale (gumu, šelak, ljepilo, lakove). Intenzivnim razvojem kemije praktički svakog se dana razvijaju novi proizvodi. Postoje tri osnovna načina dobivanja umjetnih masa:



I polimerizacija = $A+A+A+A+\dots$ odgovarajući utjecaj MA (makromolekula tipa A)

II polikondenzacija = $A+B+A+B+\dots$ odgovarajući utjecaj MC (makromolekula tipa C + kondenzat)

III poliadicija = $A+B+A+B+\dots$ odgovarajući utjecaj MC (makromolekula tipa C)

Odgovarajući utjecaj može biti: otapalo, katalizator, temperatura, pritisak

6.3.10 TERMOPLASTIČNE MASE

Termoplastične mase najčešće nastaju polimerizacijom. Termoplastičnost znači:

- omekšavanje pri povišenim temperaturama
- savitljivost
- istezljivost
- relativnu mekoću
- širok raspon električkih, mehaničkih, toplinskih i klimatskih svojstava

Termoplastične mase se prerađuju:

- lijevanjem
- ubrizgavanjem
- istiskivanjem ili izvlačenjem
- kalandriranjem

Uporabni oblik za preradu termoplastičnih masa je već polimerizirani granulat, koji se dimenzionira, topi i konačno oblikuje. Upotrebljavaju se za:

- izoliranje žica i kabela
- izradu vlakana
- izradu folija
- izradu oblikovanih dijelova
- izradu ploča i cijevi, koje se u toplom stanju daju dodatno oblikovati

Neki primjeri termoplastičnih umjetnih masa su:

1. Polivinilklorid (PVC)

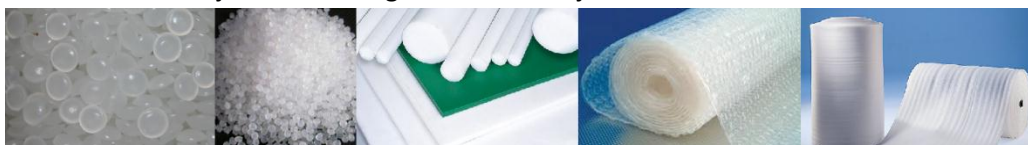
Polivinilklorid je jedna od najrasprostranjenijih termoplastičnih masa, jer je relativno jeftin. Polaran je pa se ne upotrebljava u visokofrekvencijskoj tehnici. Ima nisku toplinsku postojanost. U upotrebi su tvrdi PVC koji ima kao dodatke stabilizatore i iz njega se izrađuju oblikovani dijelovi i folije, te meki PVC, koji ima kao dodatke omekšivače, a upotrebljava se za izoliranje žica i kabela. Neki od trgovačkih naziva su: **okiten**, **plastilen**.



Slika 6.3.10 – 1 PVC materijal i primjena

2. Polietilen

Polietilen ima odlična električna svojstva. Upotrebljava se u visokofrekvencijskoj tehnici za izolaciju žica i kabela te izradu folija. Jedan od trgovačkih naziva je **hostalen**.



Slika 6.3.10 – 2 Polietilen materijal i primjena

3. Polistirol

Polistirol ima odlična električna svojstva. Upotrebljava se u visokofrekvencijskoj tehnici za izolaciju svitaka, izradu folija. Neki od trgovačkih naziva su: **styrofol**, **styropor**.



Slika 6.3.10 – 3 Polistirol materijal i primjena

4. Poliamidi

Poliamidi imaju odlična mehanička svojstva. Upotrebljavaju se za izradu vlakana, folija, oblikovanih dijelova. Neki od trgovačkih naziva su: **ultramid**, **nylon**.



Slika 6.3.10 – 4 Poliamidni materijal i primjena

5. Poliimidi

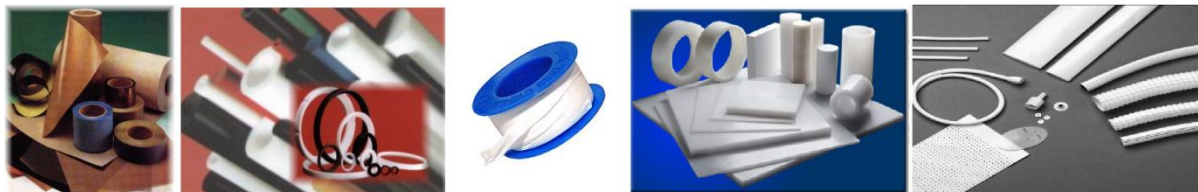
Poliimidi imaju odlična mehanička, električna i toplinska svojstva (toplinska klasa F). Upotrebljavaju se za izradu folija, koje se upotrebljavaju kao utorska izolacija niskonaponskih strojeva. Jedan od trgovačkih naziva je **kapton**.



Slika 6.3.10 – 5 Poliimidni materijal i primjena

6. Politetrafluoretilen

Politetrafluoretilen ima visoku kemijsku i termičku otpornost, te dobra električna svojstva. Upotrebljava se za izradu vlakana i folija u visokofrekvencijskoj tehnici. Neki od trgovačkih naziva su: **teflon**, **hostaflon**.



Slika 6.3.10 – 6 Politetrafluoretilenski materijal i primjena

7. Polietilen Tereftalat

Polietilen Tereftalat ima odlična mehanička svojstva, elastičan je, žilav, otporan na udarce. Upotrebljava se za izradu vlakana i folija. Jedan od trgovačkih naziva je **mylar**, **PET**.



Slika 6.3.10 – 7 Polietilen Tereftalatni materijal i primjena

8. Poliuretani

Poliuretani imaju odlična mehanička svojstva, malu higroskopnost. Upotrebljavaju se za izradu vlakana i folija. Neki od trgovačkih naziva su: **moltopren**, **dorlon**.



Slika 6.3.10 – 8 Poliuretani materijal i primjena

9. Akrilati

Akrilati se odlikuju prozirnošću. Upotrebljavaju se za izradu prozirnih dijelova (zamjena za staklo). Jedan od trgovačkih naziva je **pleksiglas**.



Slika 6.3.10 – 8 Akrilatni materijal i primjena

6.3.11 TERMOSTABILNE MASE

Termostabilne umjetne mase, za razliku od termoplastičnih, ne omekšavaju pri povišenim temperaturama, što ne znači da su toplinski postojanije od njih. Treba još jednom naglasiti, da je toplotna postojanost temperatura koju materijal trajno (ili programirano vrijeme) izdrži, a da je termostabilnost način ponašanja materijala. Prilikom omrežavanja termostabilne mase prolaze kroz tri faze:

- Sirovo stanje (faza A). Omrežavanje još nije počelo, masa je taljiva na povišenim temperaturama i topiva u raznim otapalima vrlo često je u tekućem stanju.
- Poluzavršeno stanje (faza B). Omrežavanje je počelo, molekule su počele rasti, ali kemijski proces još nije završen. Masa je najčešće u krutom ili polukrutom stanju. Može se taliti, ali su potrebne više temperature, i topiti u otapalima, barem djelomično.
- Završeno stanje (faza C) omrežavanje je završeno. Dobiven je novi materijal, koji se više ne da rastopiti ni rastaliti. Ako se takav materijal zagrijava on će izgoriti, ali se neće rastaliti. Sada mu gorivost (temperatura zapaljivosti) određuje toplotnu postojanost.

Termostabilne umjetne mase su pogodne za preradu samo u prve dvije faze, znači za vrijeme omrežavanja, i to u fazi A lijevanjem, a u fazi B slično termoplastičnim masama (ali samo jednom). Uporabni oblici su: monomerne komponente odvojene, tekuće ili krute, ili smiješane u fazi B, krute ili tekuće. Upotrebljavaju se za:

- ljepila
- lakove
- zalivne mase
- izolacijske kitove
- mase za prešanje
- slojevite prešane materijale

Neki primjeri termostabilnih umjetnih masa su:

1. Fenol Formaldehidne

Fenol Formaldehidne termostabilne mase su jedne od najstarijih umjetnih termostabilnih masa. Relativno su jeftine. Polarne su pa se ne upotrebljavaju u visokofrekvencijskoj tehnici. Imaju nisku toplotnu postojanost. Upotrebljavaju se za izradu masa za prešanje. Trgovačkih naziva je **bakelit**.



Slika 6.3.11 – 1 Fenol Formaldehidni materijal i primjena

2. Anilin Formaldehidne

Anilin Formaldehidne termostabilne mase imaju odlična električna svojstva, pa se upotrebljavaju u visokofrekvencijskoj tehnici. Upotrebljavaju se za izradu masa za prešanje i za izradu slojevitih prešanih materijala (laminata).

3. Karbamidne

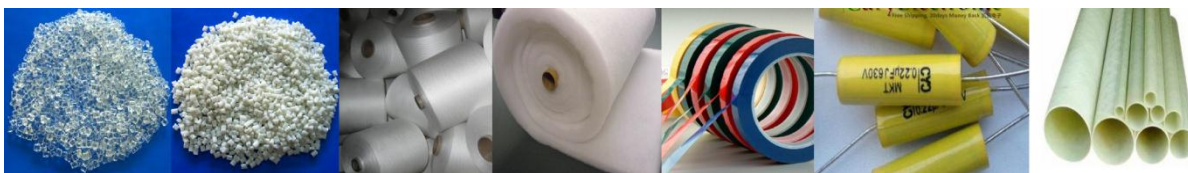
Karbamidne termostabilne mase su otporne na površinske struje. Upotrebljavaju se za izradu masa za prešanje i za izradu slojevitih prešanih materijala (laminata).

4. Melaminske

Melaminske termostabilne mase su otporne na utjecaj vlage. Upotrebljavaju se za izradu masa za prešanje.

5. Poliesteri

Poliesteri su termostabilne mase koje otvrdnjavaju i bez povišene temperature. Cijena im je razmjerno niska. Upotrebljavaju se za izradu oblikovanih dijelova lijevanjem, za mase za prešanje te za lakove. Trgovački naziv im je **chromoplast**.



Slika 6.3.11 – 2 Poliesterni materijal i primjena

6. Epoksidne

Epoksidne termostabilne mase za razliku od svih prethodnih, koje su nastale polikondenzacijom, nastaju poliadicijom. Kako nemaju kondenzata manje se skupljaju, i spadaju među najkvalitetnije mase. Odljevi su veoma kompaktni. Imaju odlična električna i mehanička svojstva. Upotrebljavaju se za izradu lakova za impregnaciju, i to bez otapala, zatim kao ljepila. Trgovački naziv im je **araldit**.

6.3.12 SILIKONI

Silikoni su polimerni organosilicijski spojevi. To su materijali koji tvore prijelaz između anorganskih i organskih materijala. Nastali su tako, da se u strukturi, inače organskoj, ugljik zamijeni silicijevim oksidom (SiO). Tako su ti spojevi zadržali dobre tehnološke sposobnosti organskih materijala, a dobili visoku toplinsku postojanost anorganskih. Ovisno o strukturi, polaznom materijalu, te stupnju umrežavanja dobivaju se različiti materijali, koji imaju neka zajednička svojstva, a to su:

- dobra toplinska postojanost
- toplinska neovisnost svojstava (-60 do 250 °C)
- teško zapaljivi
- nehigroskopni
- odlična električna svojstva
- otporni na radioaktivna zračenja
- visoka cijena
- teža obradivost

Najvažnije vrste silikona podijeljene po grupama su:

1. Silikonska ulja

Silikonska ulja služe kao zamjena mineralnim uljima, sa svim prednostima koja proizlaze iz svojstava silikona, a to su bolja toplinska postojanost, veća dielektrična čvrstoća, veći probojni napon, ali slabije podmazivanje pri nižim temperaturama.

2. Silikonske masti

Silikonske masti su smjesa silikonskih ulja i punila (grafitni prah, prah kremene kiseline i sl.). Odlikuju se širokim temperaturnim područjem primjene. Upotrebljavaju se kao masti za vruće ležajeve, zaštitu od vlage kontakata, sklopnih elemenata, radarske tehnike, zbog široke toplinske neovisnosti svojstava.

3. Silikonske smole

Kada se spominju silikonske smole misli se uglavnom na termostabilne, koje se na tržištu pojavljuju uglavnom kao poluzavršene. Mogu se mjeriti s ostalim termostabilnim smolama, s tim da imaju bolju toplinsku postojanost (toplinska klasa F i H), bolju kemijsku postojanost i višu cijenu. Slabije prijanjaju na bakar pa nisu za direktnu izolaciju bakrenih žica. Mogu se miješati s ostalim termostabilnim smolama što smanjuje cijenu proizvoda uz odgovarajuća svojstva.

4. Silikonski elastomer

Silikonski elastomer (silikonski kaučuk) je možda i najinteresantniji oblik silikona. Po svom ponašanju veoma je sličan gumi, pa mu je to i područje upotrebe, sa svim prednostima koje posjeduje a to su, viša toplinska postojanost, bolja kemijska stabilnost, velika glatkoća površine. Upotrebljava se za izoliranje žica i kabela, izradu izolacijskih vrpce, zaštitu u tropskoj atmosferi, ali isto tako u polarnoj atmosferi, gdje i pri niskim temperaturama zadrži elastičnost.

6.3.13 VLAKNASTI MATERIJALI

Vlaknasti materijali su proizvodi izrađeni iz vlakana, koji se mogu upotrijebiti za električnu izolaciju. Poznate su razlike među svojstvima vlakana, anorganska imaju visoku toplinsku postojanost, organska nisku, prirodna su higroskopna umjetna nisu, pa su i vlaknasti proizvodi proizvedeni iz tih vlakana različitih svojstava sukladno vlaknima.

6.3.14 DRVO

Drvo je pomoćni izolacijski materijal, zbog nepouzdanosti svojih svojstava, koja ovise o smjeru rezanja drveta, čistoći i slično. Upotrebljava se za izradu klinova, nosača i ostalih pomoćnih elemenata. Drvo je inače najvažnije kao izvor celuloze, koja se iz njega dobiva. Celuloza se iz drveta dobiva složenim fizičkim procesom, koji se svodi na usitnjavanje i ispiranje drveta. Tako dobivena celulozna vlakna služe za dalju preradu i dobivanje papira, tj. ljepenke ili kao vlaknasta punila. **Papiri** su lisnati proizvodi, najčešće, kratkih vlakana drvene celuloze. Dobivaju se kalandriranjem vlakana u listove debljine do 0,5 mm. U elektrotehnici se upotrebljava natronska celuloza bez ljepila, što je čišća tim je kvalitetnija. Kvaliteta papira ovisi o dužini vlakana i tehnološkom postupku dobivanja (broj valjanja, pritisak prilikom valjanja). Na taj način mogu se dobiti glatki, porozni ili neki specijalni papiri. Papiri (na bazi celuloze) imaju:

- nisku toplinsku postojanost
- jako su higroskopni

Podjela papira prema primjeni:

1. Kabelski, kondenzatorski i transformatorski

Kabelski, kondenzatorski i transformatorski su papiri, koji rade u ulju pa moraju biti kemijski vrlo čisti i porozni kako bi što bolje upijali ulje. Kabelski pored toga mora imati odlična mehanička svojstva kako bi izdržao naprezanja prilikom namatanja, a i kasnije u upotrebi. Kondenzatorski mora biti jako tanak, jednolične debljine. Transformatorski koji se najviše i upotrebljava mora biti strojno gladak.

2. Papiri za laminate

Papiri za laminate su rijetki papiri, da se mogu natapati smolama, jer se upotrebljavaju kao nosioci u složenim izolacijama. Oni su tanji i manje gustoće.

3. Papiri nosioci tinjca

Papiri nosioci tinjca se upotrebljavaju kao nosioci u složenim izolacijama na bazi tinjca. Tu im je zadatak da budu nosioci mehaničkih svojstava takove složene izolacije i od njih se prvenstveno traže odlična mehanička svojstva, pogotovo u uzdužnom smjeru to jest smjeru namatanja vrpce.

4. Papiri za izolaciju magnetskih limova

Papiri za izolaciju magnetskih limova se upotrebljavaju kao izolacija između magnetskih limova. Ti papiri nisu pod velikim električnim opterećenjem. Moraju biti jako tanki zbog što boljeg faktora ispune (svilasti papir).

5. Specijalni papiri

Specijalni papiri su papiri izrađeni od drugih vlakana, a ne od celuloznih. Postoji tinjčev papir, azbestni papir, papir od staklenih, polietilenskih ili poliesterskih vlakana. Ti papiri zbog slabijih tehnoloških svojstava navedenih vlakana imaju u sebi uvijek veziva.

6.3.15 PREŠPANI

Prešpani (kartoni, ljepenke) su lisnati proizvodi kratkih vlakana drvene celuloze, koji se dobivaju prešanjem većeg broja kalandriranih slojeva u jedan deblji sloj debljine od 0.1 do nekoliko desetaka mm. U usporedbi s papirima prešpani su gušći i manje savitljivi. Vrste prešpana su:

- strojni (upotrebljava se kao pomoćni materijal)
- utorski (upotrebljava se za izolaciju utora)

Oba ova prešpana rade suhi pa moraju biti gusti, nehigroskopni, žilavi i sposobni za oblikovanje.

- transformatorski (upotrebljava se za izolaciju transformatora)
- kondenzatorski (upotrebljava se kao dielektrik u kondenzatorima)

Ovi prešpani rade u ulju, te moraju biti porozni, da bolje upijaju ulje, kemijski čisti, da ne zagađuju ulje i imati minimalne promjene dimenzije prilikom upijanja ulja.

- specijalni prešpani (posebno obrađeni prešpani, kao što su: transformerbord vrlo čisti prešpan za transformatore, fiber prešpan obrađen cinkovim kloridom gasi luk)

6.3.16 TEKSTILNI PROIZVODI

Tekstilni proizvodi su dobiveni predenjem raznih vlakana, a zatim raznim načinima tkanja, o čemu i ovise njihova svojstva. Nazivi su im tkanine, trake, navlake. Zajednička svojstva bez obzira na porijeklo su im : velika higroskopnost, iako različitog karaktera, te dielektrična čvrstoća jednaka dielektričnoj čvrstoći zraka. Prema tome neizolirani tekstilni proizvodi su samo mehanički odstoynici, ali nakon impregnacije njihova svojstva se bitno popravljaju. Upotrebljavaju se kao omotači ili nosioci.

6.4. ANORGANSKI IZOLACIJSKI MATERIJALI

Zajedničke karakteristike anorganskih izolacijskih materijala su:

- kemijski su stabilni,
- visoke toplinske postojanosti,
- imaju dobra do odlična električna svojstva,
- tvrdi i kruti,
- otporni na starenje (minimalno stare),
- nisu higroskopni,
- ograničeni oblici (samo čvrsto agregatno stanje).

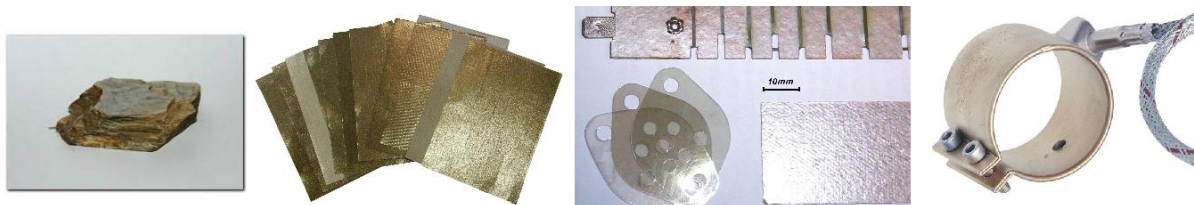
6.4.1 TINJAC

Tinjac je mineral koji se sastoji od kalijeva, magnezijeva i aluminijskog silikata. Lako se kala u tanke listiće (nekoliko μm) i ograničene površine (nekoliko cm^2). Skup je zbog ručne prerade i ovisno o kemijskom sastavu postoji više vrsta tinjca, ali u elektrotehnici se rabe samo **muskovit** i **flogopirit**. Svojstva tinjca su:

- izvanredan dielektrik ($E_{\text{pr}} = 50$ do 100 kV/mm , $\rho = 10^{18} \Omega\text{mm}^2/\text{m}$, $\epsilon_r = 6$)
- visoka toplinska postojanost (600 do 1000°C)
- visoka kemijska postojanost
- nije higroskopan

U prirodnom obliku koristi za elektroizolaciju kod električnih strojeva, mjernih instrumenata, elektroničkih elemenata i kao dielektrik za kondenzatore (naročito promjenjive). Veći broj izolacijskih

materijala proizvodi se miješanjem tinjca u obliku **listića** ili **praha** s odgovarajućim **vezivima** (polimeri) – tzv. *mikaprodukti*: **mikanit**, **mikaleks**, i td.



Slika 6.4.1 – 1 Tinjac kao materijal i primjena

6.4.2 AZBEST

Azbest spada u minerale vlaknaste strukture. Nema dobra elektroizolacijska svojstva pa se ne primjenjuje kod visokonaponskih i visokofrekvencijskih uređaja. Osnovne prednosti: visoka temperaturna stabilnost, slabo provođenje topline i **negorivost** (talište 1150 °C) pa je vrlo otporan na djelovanje električnog luka. Primjena u elektrotehnici: azbestno brašno za kitove i punjenje rastalnih uložaka osigurača; azbestno predivo, konac, trake i ploče za izoliranje; azbestni cement za ploče, cijevi i druge elemente; izolacija od vatre, vatrogasna odjela, itd.



Slika 6.4.2 – 1 Azbest kao materijal i primjena

6.4.3 KVARC

Kvarc su kristali SiO_2 s HCP rešetkom. Dobre optičke i **piezoelektrične** karakteristike. Primjena mu je:

- dielektrik u kondenzatorima.
- za izradu šipki, cijevi (kvarcne svjetiljke) i ploča rabi se **kvarcno staklo** koje nastaje taljenjem kvarca ili kvarcnog pijeska.
- u poluvodičkoj tehnologiji SiO_2 služi za izolaciju i pasiviranje površina.



6.4.4 STAKLO

Najveća grupa minerala (većina stijena na Zemlji građena je od čak 95 % silikata), koje čine većinom Si i kisik, s dodacima iona poput Al, Mg, Fe i Ca. Neki važni minerali iz ove grupe, a koji čine stijene jesu: **feldspati**, **kvarc**, **olivini**, **granati**, **tinjci**,..... Najveći dio svjetske proizvodnje stakla čine silikatna stakla, osnovna komponenta kod silikatnog stakla je **SiO_2** . Nema točku tališta, nego ima područje omekšanja od 500 °C do 1200 °C. Proizvodi se: lijevanjem, valjanjem, izvlačenjem, ekstruzijom ili puhanjem. Gotovo uvijek je nužna naknadna toplinska obrada zbog smanjivanja zaostalih naprezanja nastalih brzim ohlađivanjem stakla. Prema sastavu obična stakla mogu biti:

- **kalcijska** ($\text{MeO} \cdot \text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2$)
- **olovna** ($\text{MeO} \cdot \text{PbO} \cdot 6\text{SiO}_2$)

Stakla su smjese raznih oksida i silikata. Po svom stanju to su ustvari pothlađene tekućine, što znači da imaju amorfnu strukturu. Nemaju točku tališta, nego imaju područje omekšanja, a ono je između 500 i 1200 °C. U elektrotehnici se upotrebljavaju bezalkalijska stakla, jer alkalijski elementi u vodi postaju ioni što smanjuje otpor. Izrada prolazi kroz više faza. Razne sirovine se samelju, smiješaju i otapaju. Tako otopljena smjesa se rashladi do područja plastičnosti i onda se oblikuje u tražene oblike. Oblikovanje se vrši: valjanjem, lijevanjem, puhanjem, ekstruzijom, izvlačenjem. Naročito je interesantno izvlačenje. Na takav način se dobiju staklena vlakna, oblik koji se najviše i upotrebljava za izradu izolacijskih materijala, te kao optička vlakna (u tom slučaju moraju imati veliku prozirnost).

Izolacijska vlakna se izrađuju u debljinama 5, 7, 9 i 13 mikrona (poluproizvodi: prediva, konci, vrpce, tkanine, papiri) i kao takova imaju izvanredna svojstva:

- odlična mehanička svojstva (zatezna čvrstoća im je ravna zateznoj čvrstoći najboljih čelika, ali kad su opterećena na uvrtnje čvrstoća im je slabija)
- nehigroskopna su
- visoka toplinska i kemijska postojanost
- praktički ne stare

6.4.5 KERAMIKA

Keramika se prema veličini zrna dijele na:

- gruba keramika (veličina zrna od 0.1 do 0.2 mm npr. za opeke).
- fina keramika (veličina zrna < 0.1 mm, npr. suđe, sanitarije).

Prema namjeni ih dijelimo na: visokokvalitetna, konstrukcijska, industrijska, funkcionalna (suprakeramika), elektrokeramika, rezna keramika, biokeramika. Prema kemijskom sastavu keramika se dijeli na:

- silikatnu keramiku (porculan, steatit, kordijerit, mulit)
- oksidnu keramiku (Al_2O_3 , MgO , ZrO_2 , Al_2TiO_5 , BaTiO_3)
- neoksidnu keramiku (SiC , Si_3N_4 , AlN , B_4C , BN)

Keramike se primjenjuje elektrotehnici kao:

- izolatori (u energetici veliki otpori)
- dielektrici (keramički kondenzatori veliki ϵ')
- podloge kod izrade hibridnih krugova (visoka toplinska vodljivost)
- otporni i vodljivi slojevi (visoka električna vodljivost) te nevodljivi i funkcionalni slojevi
- NTC, PTC otpornici (temperaturna ovisnost otpora)
- tvrdi magnetski materijali



Slika 6.4.5 – 1 Bitne faze procesa proizvodnje keramike

6.4.6 PORCULAN

Porculan je smjesa aluminijevih silikata (kaolin, kvarc, feldšpat). Relativno je jeftin. ima grubu strukturu, pa mu se prilikom obrade mora dodati dosta tekućine, te se prilikom sušenja skuplja (i do 20 %). Zbog toga se ne mogu izrađivati jako precizni predmeti. To je polarni materijal pa se ne može upotrijebiti u visokofrekventnoj tehnici. Zbog grube strukture vrši se obrada površine, takozvano glaziranje, da bi se povećala otpornost na vanjske utjecaje. Najčešća upotreba mu je za vanjske nosače energetskih vodova, odnosno područje niske frekvencije.



Slika 6.4.6 – 1 Porculan kao materijal i primjena

6.4.7 STEATIT

Steatit je smjesa magnezijevih silikata (kaolin, masnik, feldšpat). Finije je strukture od porculana i to mu je prednost. Pod prstima djeluje pomalo masno, i nije potrebna dodatna obrada površine, kao kod porculana. Mogu se izrađivati precizniji dijelovi, a kako nije polaran može se upotrebljavati i u visokofrekventnoj tehnici.



Slika 6.4.7 – 1 Steatit kao materijal i primjena

6.4.8 SUPSTRATI

Supstrati su uglavnom spojevi aluminijskog oksida (Al_2O_3), a upotrebljavaju se kao nosioci u hibridnim tehnikama planarnih i diskretnih komponenata, gdje daju čvrstoću i stabilnost tim sklopovima. Razlozi njihove upotrebe su:

- dobra izolacijska svojstva i toplinska vodljivost
- zadovoljavajuća mehanička čvrstoća
- precizne dimenzije (unutar malih tolerancija)
- mali temperaturni koeficijent istezanja (dimenzije neovisne o temperaturi)
- odgovarajuća hrapavost (zbog prijanjanja komponenata na površinu)
- kemijska i fizička kompatibilnost s ostalim materijalima
- relativno niska cijena

6.4.9 RUTILI

Rutili su titanovi spojevi (TiO_2 , BaTiO_3 , SrTiO_3) a glavna, nama interesantna, odlika im je jako velika dielektrična konstanta (ϵ' do 10000) pa se upotrebljavaju kao dielektrik u keramičkim kondenzatorima. Na taj način dobiju se kondenzatori velikih kapaciteta a malih dimenzija. Nažalost dielektrične konstante rutila su ovisne o temperaturi, naponu i frekvenciji pa su takvi kondenzatori vezani pri upotrebi na usko područje (za točno određene uvjeta).



Slika 6.4.9 – 1 Rutili kao materijal i primjena

6.4.10 VATROSTALNA KERAMIKA

Vatrostalne keramike se odlikuju minimalnim temperaturnim koeficijentima istezanja, te podnose kako visoke temperature tako i nagle promjene temperatura. To su uglavnom čisti aluminijski oksidi.

Upotrebljavaju se za svjećice u automobilima i sličnim prilikama gdje je materijal izložen istovremeno raznim temperaturama i naglim temperaturnim promjenama.

6.5. SLOŽENI IZOLACIJSKI MATERIJALI

Materijali danas vrši sve složenije funkcije, stoga se krenulo u izradu složenih izolacija sastavljenih od više materijala, pri čemu ti materijali na sebe preuzimaju razne funkcije. Princip je objediniti najbolje od pojedinih materijala, a da se pri tome ostala svojstva čim manje pokvare. Znači složene izolacije se izrađuju zbog:

- proširenja asortimana
- boljih svojstava
- boljih tehnoloških sposobnosti

Impregnirani vlaknasti proizvodi: nosioc + impregnant

Nosioc može biti papir pa govorimo o impregniranim ili uljnim papirima ili tkanina pa govorimo o impregniranim ili uljnim tkaninama. Vezivo je uvijek trajno fleksibilni lak. Na taj način smo zadržali odlične tehnološke sposobnosti nosioca, a impregnacijom smo smanjili higroskopnost i povećali dielektričnu čvrstoću.

Višeslojne fleksibilne izolacije: nosioc + fleksibilno ljepilo

Nastaju lijepljenjem više listova (2 ili 3) različitih savitljivih materijala, međutim ljepilo ne ulazi u unutrašnjost materijala. Po svom karakteru rada kod tih izolacija prvenstveno vodimo računa o mehaničkim i toplinskim naprezanjima, jer su ona najveća, a električna su već ispunjenjem tih zahtjeva obično zadovoljena. Upotrebljavaju se uglavnom kao utorske izolacije niskonaponskih strojeva. Od materijala za nosioce upotrebljavaju se: folije, papiri, prešpani, impregnirane tkanine, a od ljepila se traži: odlična adhezija, dobra toplinska vodljivost te trajna elastičnost.

Izolacije na bazi tinjca se rade s osnovnom namjenom otklanjanja jedinog nedostatka tinjca, tehnološke naravi, a to je ograničena veličina njegovih listića. Sva ostala svojstva su u takovoj složenoj izolaciji lošija o svojstava čistog tinjca. Postoje dvije grupe složenih izolacija na bazi tinjca dvokomponentne mikaniti i trokomponentne mikafolije ili mikavrpce.

Mase za prešanje (duroplasti) služe za izradu raznih oblikovanih dijelova, koji ujedno moraju vršiti i izolacijske zadatke. Dvije bitne komponente su vezivo + punilo, gdje su veziva termostabilne smole, najčešće u fazi B, koje se ako je kruto samelje u prah i pomiješa sa punilom, koje može biti praškasto (tinjčev prah, piljevina, kvarcno brašno) ili vlaknasto (celulozna, staklena vlakna). Tako miješano punilo i vezivo stavljaju se u kalupe zagrijavaju pod pritiskom dok vezivo ne pređe u fazu C, kada masa potpuno otvrdne.

Slojeviti prešani materijali (Laminati) upotrebljavaju se za izradu ploča, cijevi i štapova. Komponente su nosioc + vezivo. Postoje dvije vrste nosioca, ako je nosioc papir imamo tvrdi papir (pentinaks) odnosno tkanina imamo tvrdo tkivo (tekstolit). Veziva su termostabilne smole u fazi B.

6.6. PITANJA ZA PROVJERU ZNANJA

1. Čemu služe izolacijski materijali?
2. Kojim naprezanjima izolacija mora odolijevati?
3. Kako definiramo električno polje kod električnih proizvoda?
4. Što je polarizacija?
5. Što je strukturna polarizacija?
6. Kako nastaju parcijalna izbijanja?
7. Kako nastaje električni proboj?
8. Što je dielektrična čvrstoća materijala?
9. O čemu ovisi probojni napon?
10. Zbog čega dolazi do povišenja temperature unutar izolacijskog materijala?
11. Koje su moguće posljedice povišenja temperature unutar izolacijskog materijala?

12. Zbog čega nastaju mehanička naprezanja izolacijskih materijala?
13. Koji su vanjski utjecaji na izolacijski materijal?
14. Što je klimatska postojanost?
15. Kako možemo sve sistematizirati izolacijske materijale?
16. Zbog čega se izrađuju izolacijski materijali?
17. Što su organski izolacijski materijali?
18. Koje su opće karakteristike organskih izolacijskih materijala?
19. Kako dijelimo organske materijale prema vrstama i oblicima primjene?
20. Što je mineralno ulje i kako se dobiva?
21. Gdje se sve koristi mineralno ulje?
22. Što je modificirano ulje i kako se dobiva?
23. Koja su svojstva biljnih ulja?
24. Što su voskovi i bitumen, te gdje se koriste?
25. Što su prirodne smole i kakva su im svojstva?
26. Kako se dobivaju modificirane smole?
27. Kako dobivamo kaučuk i koja su mu svojstva?
28. Kako nastaje guma?
29. Koje su sve karakteristike gume?
30. Gdje se sve upotrebljava guma?
31. Što su prirodna organska vlakna i čemu služe?
32. Kako nastaju umjetne mase?
33. Koje su sve karakteristike materijala ako je on termoplastičan?
34. Gdje se upotrebljavaju termoplastične mase?
35. Nabrojite primjere termoplastičnih masa.
36. Kako nastaju termostabilne umjetne mase?
37. Gdje se sve koriste termostabilne umjetne mase?
38. Nabrojite primjere termostabilnih masa.
39. Što su silikoni?
40. Koja su svojstva silikona?
41. Navedite najvažnije vrste silikona?
42. Kako se dobivaju vlaknasti materijali i gdje se koriste?
43. Zašto koristimo drvo u elektrotehničkim proizvodima?
44. Kako možemo podijeliti papir prema njegovoj primjeni?
45. Što su prešpati i kako se dobivaju?
46. Koje su sve karakteristike anorganskih izolacijskih materijala?
47. Kako se dobiva tinjac i koja su mu svojstva?
48. Gdje se primjenjuje azbest?
49. Gdje se primjenjuje kvarc?
50. Kako se dobiva staklo?
51. Što je staklo i koje su mu karakteristike?
52. Koje su sve vrste keramika?
53. Gdje se sve koristi keramika?
54. Što je porculan i gdje se koristi?
55. Što je steatit i gdje se koristi?
56. Zbog čega se koriste supstrati?
57. Što su rutili i koje su mu karakteristike?
58. Kako se dobiva vatrostalna keramika?
59. Zašto su nam potrebni složeni izolacijski materijali?
60. Navedite sve složene izolacijske materijale i navedite čemu služe.

7. MAGNETSKI MATERIJALI

Magnetski materijali su dijelovi električnih proizvoda, koji imaju osnovni zadatak da usmjerenom vode magnetski tok i time omogućuju elektromagnetske pretvorbe na kojima se zasniva funkcija tih proizvoda. Koriste se materijali koji izrazito dobro vode magnetski tok. Praktički svi materijali su magnetski, ali su samo feromagnetski i ferimagnetski od praktičke važnosti u tehnologiji, jer se lako magnetiziraju relativno slabim poljem (H).

7.1. OSNOVNA SVOJSTVA MAGNETSKIH MATERIJALA

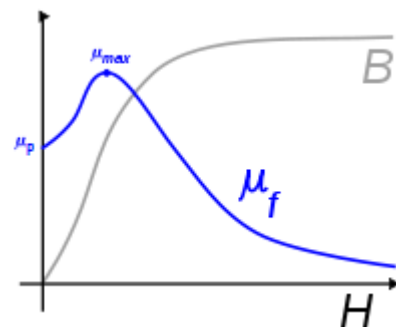
Magnetske pojave su ustvari pojave, koje prate struju, a izvor magnetizma je u atomu. Jezgra se vrti oko svoje osi i to je prvi uzrok magnetskog momenta. Elektron se vrti oko jezgre to je drugi uzrok magnetskog momenta, te oko svoje osi (spin), što je treći uzrok magnetskog momenta. Spin je pozitivan ili negativan što ovisi o smjeru vrtnje.

Permeabilitet (μ) je ustvari magnetska vodljivost, a definiran je kao odnos magnetske indukcije i magnetskog polja. Permeabilitet dobiva se prema izrazu:

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad ; \quad \mu = B/H \quad (\text{Vs/Am})$$

Uvedena je veličina **relativni permeabilitet** (μ_r), koji nam ustvari govori koliko neki materijal bolje vodi magnetski tok od zraka odnosno vakuuma. Kako je krivulja magnetiziranja nelinearna, tako je i permeabilitet, promjenjiva veličina, pri čemu su za nas naročito interesantne dvije veličine i to:

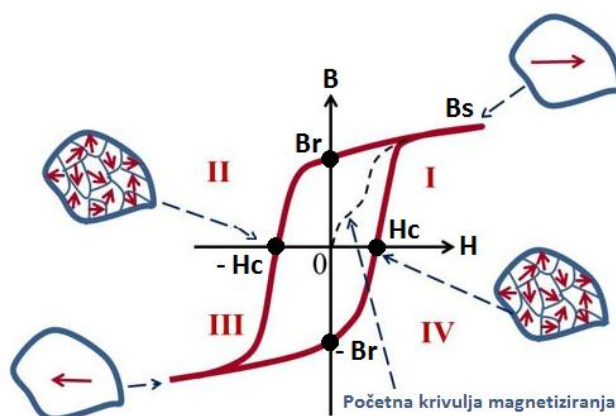
- početni permeabilitet (μ_p) određen početnim nagibom krivulje magnetiziranja (mjeri se kod vrlo malog polja reda veličine 10^{-5} A/m) te
- maksimalni permeabilitet ($\mu_{\max}$) određen maksimalnim nagibom krivulje magnetiziranja
- diferencijalni permeabilitet određen je strminom krivulje magnetiziranja u bilo kojoj točki



Iz svega do sada navedenog vidljivo je da permeabilitet ovisi o:

- vrsti feromagnetika
- stupnju magnetiziranja
- stanju strukture
- temperaturi

Kako je krivulja magnetiziranja ireverzibilna magnetiziranje i razmagnetiziranje ne ide istim putem. Ukoliko bi izvršili cijeli krug magnetiziranja što znači: materijal namagnetizirati do zasićenja, razmagnetizirati ga, namagnetizirati ga u suprotnom smjeru do zasićenja te ga ponovo razmagnetizirati dobili bi **petlju histereze**. Petlja histereze nam govori o magnetiziranju i razmagnetiziranju materijala uz određene gubitke.



Slika 7.1 – 1 Petlja histereze

Karakteristične točke na krivulji su:

- B_m (B_s) **indukcija zasićenja**, maksimalna indukcija do koje se može materijal namagnetizirati,
- B_r **remanencija**, gustoća magnetskog toka koja ostane u materijalu koji je, nakon magnetiziranja do zasićenja, izvađen iz polja,

- **H_c koercitivna sila**, jakost polja suprotnog smjera potrebna da se materijal, magnetiziran do zasićenja, razmagnetizira.

Površina obuhvaćena histerezom znači ustvari akumuliranu energiju magnetiziranja, koja je zadržana u materijalu, a to su ustvari gubitci magnetiziranja. Osim statičke postoji i dinamička petlja histereze. Razlika je u tome što dinamička petlja histereze obuhvaća i dodatne gubitke zbog magnetske tromosti materijala. Viša frekvencija - šira petlja histereze. Ove veličine su za razne materijale veoma različite, od vrlo malih do vrlo velikih. Indukcija zasićenja (B_m) može biti od nekoliko dijelova Tesla pa do preko 2 Tesla, isto tako i remanencija (B_r), a koercitivna sila (H_c) se kreće od nekoliko desetinki A/m pa do stotinjak kA/m. Koercitivna sila je ujedno veličina po kojoj se magnetski materijali u primjeni dijele na meke, koji imaju male koercitivne sile i tvrde koji imaju velike koercitivne sile.

Gubitci magnetiziranja dijele se u dva dijela, i to gubitke histereze i gubitke vrtložnih struja. Gubitci histereze ovise o magnetskim svojstvima materijala (širina petlje histereze, permeabilitet, magnetsko kašnjenje), a gubitci vrtložnih struja ovise o električkim svojstvima materijala (specifični električni otpor).

Magnetostrikcija je promjena dimenzije magnetskog materijala pod utjecajem i u ritmu narinutog magnetskog polja.

Magnetoelastičnost je svojstvo magnetskog materijala da pod utjecajem mehaničkih sila mijenja svoja magnetska svojstva (permeabilitet, indukciju zasićenja).

Porastom temperature slabe magnetska svojstva materijala. Indukcija zasićenja pada, krivulja se linearizira, da bi pri određenoj temperaturi prerasla u pravac, te se materijal počeo ponašati kao paramagnetski materijali. Taj proces je reverzibilan, jasno ako materijal nije prethodno termički obrađen, kako bi se dobila neka specijalna struktura u svrhu poboljšanja magnetskih svojstava, te nakon hlađenja materijal poprima svoja prethodna svojstva. Ukoliko je materijal bio prethodno termički obrađen, trajno gubi svojstva postignuta tom obradom. Temperatura kod koje se feromagnetski materijal počeo ponašati kao paramagnetski naziva se Curieva točka ili **Curieva temperatura** a za pojedine feromagnetske elemente iznosi kako je pokazano u tablici:

Element	Željezo (Fe)	Kobalt (Co)	Nikal (Ni)	Gadolinij (Gd)
Temperatura (°C)	769	1125	356	16

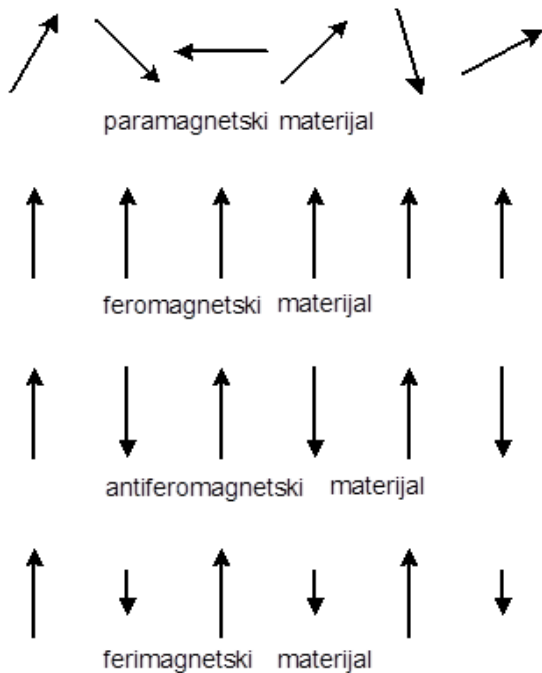
7.2. VRSTE MAGNETSKIH MATERIJALA

Spram magnetske vodljivosti i ponašanja u magnetskom polju materijali se mogu podijeliti u slijedeće grupe:

- diamagnetski materijali
- paramagnetski materijali
- antiferomagnetski materijali
- feromagnetski materijali
- ferimagnetski materijali

Prva dva tipa materijala (diamagnetski i paramagnetski) praktički nemaju nikakve važnosti kao magnetski materijali, jer se u magnetskom polju ponašaju gotovo kao vakuum odnosno zrak. Za te materijale relativni permeabilitet, koji uspoređuje određeni materijal s vakuumom, iznosi otprilike 1.

Diamagnetski (Au, Ag, Cu, Cd, Pb, Sn, Zn) relativni permeabilitet je nešto manji od 1. **Paramagnetski** (Al, Mn, Mg, Na, K, Ca, Pt) relativni permeabilitet je nešto veći od 1. **Antiferomagnetski** materijali, koji imaju sve elemente feromagnetika, isto tako nisu interesantni, jer zbog svoje građe, to jest međusobnog poništavanja magnetskog momenta susjednih domena, njihov magnetizam ne dolazi do izražaja.



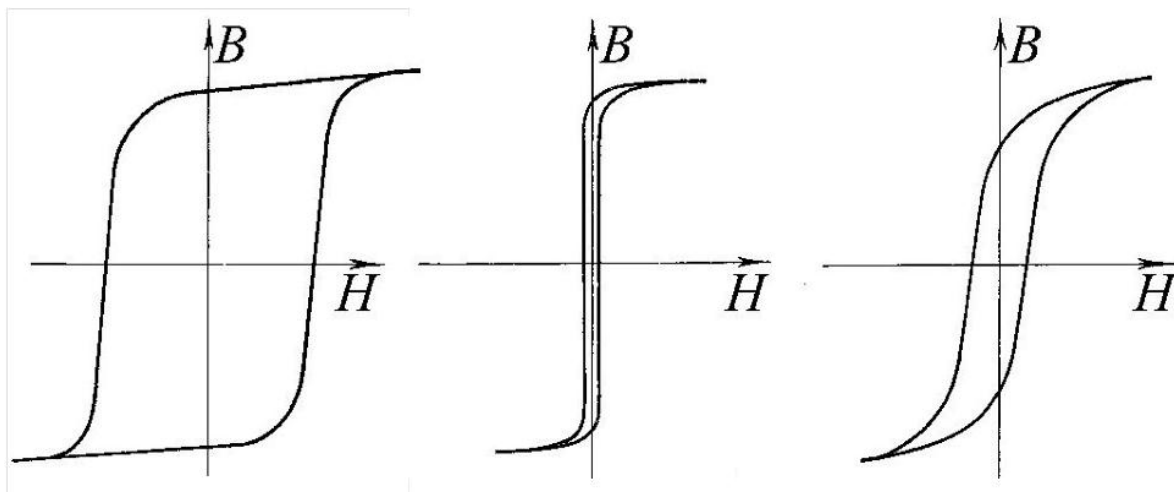
Slika 7.2 – 1 Magnetski momenti magnetskih materijala

Prema ovako pojednostavljenom prikazu može se zaključiti da je spontana magnetizacija izrazita kod feromagnetskih materijala, kod antiferomagnetskih je jednaka nuli, dok kod ferimagnetskih je različita od nule.

Feromagnetski i ferimagnetski materijali jedini imaju veliku magnetsku vodljivost, njih karakterizira:

- intenzivno magnetiziranje već relativno malim poljem (permeabilitet puno >1)
- nelinearna krivulja magnetiziranja (permeabilitet ovisi o jačini polja)
- postoje Weissove domene i Blochove stijene
- dolaze u zasićenje

Prirodni feromagnetski materijali su željezo Fe, nikal Ni, kobalt Co, gadolinij Gd, od čistih elemenata, te neke legure koje mogu biti sastavljene i od elemenata koji nisu feromagnetici, ako prilikom njihovog nastajanja nastanu uvjeti za pojavu feromagnetizma. Materijal je feromagnetski ukoliko kod djelovanja vanjskog magnetskog polja i sam postaje magnet, tako što se njegovi elementarni magneti (magnetski dipoli) orijentiraju u pravcu vanjskog polja pod djelovanju magnetizacije. Kada materijal nije magnetiziran, elementarni su magneti usmjereni u svim smjerovima. Gubitci u feromagnetskim materijalima nastaju zbog histereze i vrtložnih struja. Feromagnetski materijali se po obliku petlje histereze dijele na **meke** i **tvrde**. Prvi su uske petlje histereze i male vrijednosti koercitivne jakosti magnetskog polja ($H_c < 800 \text{ A/m}$). Tvrdi imaju široku petlju histereze i veliku vrijednost koercitivne jakosti magnetskog polja. Vrijednost magnetske indukcije zasićenja je B_s .



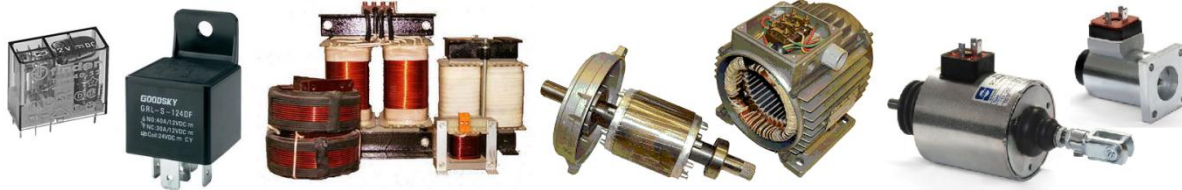
Slika 7.2 – 2 Petlja histereze raznih magnetskih materijala

Gubitci zbog vrtložnih struja razmjerni su kvadratu frekvencije, debljini uzorka feromagnetika, električnoj provodnosti i magnetskoj indukciji. Da bi se ovi gubitci smanjili magnetski krugovi se izrađuju od limova ili traka feromagnetskog materijala međusobno elektroizoliranih svilastim papirom, uljnosmolastim lakovima, oksidacijom ili fosfatiranjem površine. Gubitci zbog histereze se povećavaju smanjivanjem debljine feromagnetskog materijala pa je optimalna debljina limova u pogledu ukupnih gubitaka od 0.35 do 0.5 mm za izmjenična magnetska polja frekvencije 50 Hz.

Osnovna svojstva mekih feromagnetskih materijala su:

- uska petlja histereze,
- mali iznos koercitivne jakosti magnetskog polja,
- mali gubici zbog histereze,
- veliki iznos maksimalne relativne permeabilnosti.

Meki feromagnetski materijali rabe se za magnetske krugove izložene djelovanju izmjeničnih magnetskih polja, odnosno kod releja, transformatora, kućišta motora, jezgra elektromagneta.



Slika 7.2 – 3 Primjeri korištenja mekih feromagnetskih materijala

Tvrđi feromagnetski materijali služe za trajne izvore magnetskog polja bez vanjskog magnetiziranja kao što su: zvučnici, mali električni strojevi (dynamo, alternator), neki releji i sl., magnetski zapisi (trake), mjerni instrumenti. Također tvrđi feromagnetski materijali koriste se za izradu stalnih (permanentnih) magneta.



Slika 7.2 – 3 Primjeri korištenja tvrdih feromagnetskih materijala

Od ferimagnetskih materijala u elektrotehnici su najznačajniji **feriti**. To su smjese oksida nekih metala. Po magnetskim svojstvima feriti su između fero i antiferomagnetskih materijala. Prema iznosu električne provodnosti feriti pripadaju poluvodičima. Zato su gubici zbog vrtložnih struja kod ferita znatno manji nego kod feromagnetskih materijala pa se mogu koristiti na visokim frekvencijama. Još je jedna značajna razlika između feri i feromagnetskih materijala; feriti imaju znatno manji iznos magnetske indukcije zasićenja B_s od feromagnetika. Po obliku histerezne petlje feriti se dijele na **meke** i **tvrde** materijale. Opisuju se jednakim parametrima (Curieva temperatura, magnetska indukcija zasićenja, koercitivna jakost magnetskog polja, početna i maksimalna permeabilnost, i td.) kao i feromagnetski materijali.

Mekim ferimagnetskim materijalima pripadaju i granati; najčešće se za mikrovalne komponente rabi ltrij – Željezo granat. Mangan-cink feriti koriste se u izmjeničnim magnetskim poljima frekvencije do nekoliko MHz, te Nikal-Cink feriti koji se lakše proizvode od Mangan-Cink ferita a primjena im ovisi o radnom frekvencijskom opsegu.



Tvrđim feritnim materijalima po strukturi su slični materijali za magnetsko zapisivanje. Obično je fini prah željeznog oksida, zajedno s vezivima, nanesen u tankom sloju na poliestersku traku ili podlogu



gipkog ili tvrdog diska. Neki materijali za magnetsko zapisivanje imaju i dodatak kobalta Co, a umjesto željeznog oksida rabi se i kromov dioksid CrO_2 .

7.3. PITANJA ZA PROVJERU ZNANJA

1. Što su magnetski materijali i koja im je zadaća?
2. Kako se definira magnetska pojava?
3. Što je permeabilitet materijala?
4. O čemu sve ovisi permeabilitet materijala?
5. Što nam pokazuje petlja histereze?
6. Koje su karakteristične točke petlje histereze?
7. Koji su sve gubitci magnetiziranja?
8. Što je magnetostrikcija?
9. Što je magnetoelastičnost?
10. Što nam govori Curieva temperatura o materijalu?
11. Koje su sve vrste magnetskih materijala?
12. Od kojih materijala se izrađuju magnetski materijali?
13. Koliki je permeabilitet magnetskih materijala?
14. Kako možemo podijeliti feromagnetske materijale?
15. Koja su osnovna svojstva mekih feromagnetskih materijala?
16. Gdje se sve koriste meki feromagnetski materijali?
17. Gdje se sve koriste tvrdi feromagnetski materijali?
18. Kako se dobivaju ferimagnetski materijali?
19. Kako možemo podijeliti ferimagnetske materijale?
20. Gdje se sve koriste meki ferimagnetski materijali?
21. Gdje se sve koriste tvrdi ferimagnetski materijali?

8. MATERIJALI ZA SPAJANJE

Međusobno spajanje elementa konstrukcija i elektrotehničkih komponenata i sklopova u čvrsto povezane cjeline izvodi se raznim oblicima mehaničkog spajanja, varenjem, lemljenjem i lijepljenjem. Spojna mjesta najčešće moraju zadovoljiti određene mehaničke i električne zahtjeve. Kod dijela spojeva, kao što je ožičenje uređaja, kvaliteta električnih spojeva je od izuzetne važnosti.

8.1. SPAJANJE VIJCIMA I ZAKOVICAMA

Spajanje vijcima i zakovicama je vrlo rašireni način povezivanja konstrukcijskih elemenata međusobno i spajanja elektrotehničkih elemenata u sklopove i uređaje. Kod spajanja vijcima i zakovicama treba naročito voditi računa o izboru materijala prema elektrokemijskim svojstvima. Pravilan izbor veličine vijaka i zakovica, oblik nareza i glava i izbor podložnih pločica isto tako je važan za dobro spajanje. Spojevi zakovicama se primjenjuju tamo gdje se ne očekuju naknadne intervencije. Kod upotrebe vijaka potrebno je koristiti i podložne pločice koje osiguravaju bolji i sigurniji spoj, a mogu biti obične, zupčaste, perne i sl.



Slika 8.1 – 1 Primjeri vijaka i zakovica

8.2. UPLITANJE, STISKANJE I OMATANJE VODOVA

Međusobno **spajanje vodiča** navedenim metodama iziskuje neke posebne dodatne materijale. Kod uplitanja to je izolirana traka s kojom se takav spoj omota i zaštiti od dodira ili kontakta s nekim drugim vodom pod naponom. Spajanje stiskanjem vodova izvodi se alatom na posebne kableske stopice koje se zatim vijcima ili konektorski spajaju na željeno kontaktno mjesto. Za tehniku spajanje omatanjem potrebni su posebni igličasti izvodi na koje se specijalnim alatom omataju vodovi za ožičenje. Uplitanje i stiskanje se često koristi kod instalacija, toplinskih uređaja i automobila, a omatanje kod nekih ožičenja računala.

8.3. SPAJANJE VARENJEM

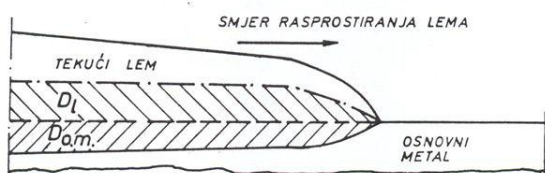
Varenjem se ostvaruje nerastavljiva veza vrlo dobrih mehaničkih svojstava, a kod metala i s dobrim električnim spojem, pa je to vrlo često primjenjivan način spajanja elemenata nosivih konstrukcija u elektrotehnici. Posebni oblici varenja i utaljivanja sastavni su dio tehnologija izrade poluvodičkih elemenata. Postupci varenja mogu se automatizirati, pa time osigurati veliku ujednačenost, točnost i kvalitetu spojeva i automatizacijom osloboditi radnike sudjelovanja u ovom inače nezdravom tehnološkom postupku.

8.4. LEMLJENJE I LEMOVI

Lemljenje je spajanje metalnih materijala (osnovnih materijala) pomoću dodatnog rastaljenog materijala – lema, čije je talište niže od tališta osnovnog materijala. Postoje nekoliko vrsti / načina lemljenja, a to su:

- **meko lemljenje** (soldering, Weichlöten, brasatura dolce) – lem se tali pri $\vartheta < 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ - najčešće u elektronici ili za slabije opterećene spojeve (npr. konzerve).
- **tvrd lemljenje** (brazing, Hartlöten, brasatura forte – lem se tali pri $\vartheta > 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ - najčešće za jače opterećene spojeve u strojarstvu.
- **visokotemperaturno lemljenje** – lem se tali pri $\vartheta > 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ – za komponente za aeronautiku, nuklearne reaktore; cijeli element se zagrijava u peći u vakuumu ili u posebnim plinovitim atmosferama.

Područje taljenja lema je područje temperature od početka taljenja do potpuno rastaljenog stanja. Radna temperatura je najniža temperatura površine izratka na mjestu lemljenja, na kojoj se temperaturi lem može vezati za osnovni materijal. Radna temperatura mora biti viša od temperature početka taljenja, ali može biti niža ili viša od temperature pri kojoj se lem potpuno rastali.



Slika 8.4 – 1 Lemni spoj

Spoj između lema i osnovnog materijala nastaje zbog veza na atomskoj razini nakon hlađenja lema u kruto stanje. Na radnoj temperaturi dolazi do ubrzane izmjene atoma, tj. do difuzije na graničnim površinama lema i osnovnog materijala. Površine lemljenja moraju biti glatke i dobro očišćene od oksida, prevlaka i nečistoća. Lemljenje se poboljšava posebnim pastama, prašcima i tekućinama, a zaštitnim plinovima se smanjuje oksidacija spajanih površina.

Prednosti lemljenja su:

- mogu se spajati i različiti metali
- utjecaj temperature na osnovni materijal je manji nego kod zavarivanja
- spojeni dijelovi nisu oslabljeni rupama, kao npr. kod zakivanja
- lemljeni spojevi dobro provode struju i toplinu
- lemljeni spojevi dobro brtve
- potrebno je manje energije nego kod zavarivanja
- pogodno za spajanje dijelova različite debljine i tankih dijelova (neće doći do stvaranja rupe)
- postupak lemljenja se može automatizirati (pogodno za serijsku proizvodnju)
- na jednom komadu se može lemiti istodobno na više mjesta.

Nedostaci lemljenja su:

- manja čvrstoća nego kod zavarenih spojeva
- mala otpornost na visoke temperature
- lemovi djelomično sadrže skupe metale (Sn, Ag) pa lemljenje nije pogodno za velike lemljene spojeve
- čvrstoća spojeva dobivenih mekim lemljenjem je ograničena
- postoji opasnost od pojave galvanске korozije uzrokovane različitim električnim potencijalom lema i osnovnog materijala
- u odnosu na zavarivanje je priprema površina spoja skuplja.

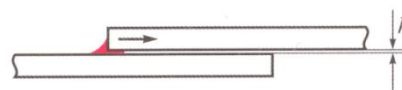
Postupci lemljenja (u ovisnosti od opterećenja, radne temperature, oblika mjesta spajanja):

- **Plameno lemljenje** – mjesto lemljenja se ugrije plamenikom; prije ili poslije zagrijavanja se lem prsloni na mjesto spoja ili uloži u spoj; postupak je prikladan za meko i tvrd lemljenje.

- **Lemljenje pomoću lemila** – vruće, rukom ili strojem vođeno lemilo (grijano električki ili plinom) ugrije mjesto lemljenja; prisloni se lem koji se otapa i spaja dijelove; koristi se za meko lemljenje (elektronika).
- **Lemljenje uronjavanjem** – pastama ili rastopinama se obrade mjesta koja moraju ostati nezalemljena; dijelovi se u položaju u kojemu moraju biti spojeni uranjaju u rastaljeni lem; lem prodire u mjesta spoja; postupak je prikladan i za meko i za tvrdo lemljenje.
- **Lemljenje u peći** – lem se dodaje mjestu spajanja; dijelovi se ugriju u plinskoj ili električnoj peći; postupak je prikladan za meko i, češće, tvrdo i visokotemperaturno lemljenje.
- **Otporno lemljenje** – slično kao kod elektrootpornog zavarivanja; mjesto spajanja s prethodno uložnim lemom se ugrije električnim otporom (Jouleov efekt) “stiskanjem” u kliještima ili na strojevima za elektrootporno lemljenje; postupak je prikladan za meko i tvrdo lemljenje.
- **Indukcijsko lemljenje** – zagrijavanje osnovnog materijala dobiva se induciranjem izmjenične struje visoke frekvencije (do 5 MHz) u površinskom sloju; prikladno za meko, tvrdo i visokotemperaturno lemljenje.
- **Lemljenje pomoću laserske zrake** – toplina se generira koncentriranom apsorpcijom visoko-energetskog monokromatskog zračenja u vakuumu ili atmosferi s inernim plinom; koristi se za tvrdo i visokotemperaturno lemljenje preciznih elemenata s lemom visoke temperature taljenja.

Izvedba mjesta lemljenja:

- **Lemljenje sa zračnošću (zazorom)** – površine spajanja odvojene malom jednolikom zračnošću do $h \approx 0.25$ mm; lem se kapilarnim djelovanjem “usisava” u tu zračnost.
- **Lemljenje sa šavom** – razmak površina koje se spajaju je veći od 0.5 mm, ili se izvodi V- ili X-šav (ponekad se zato govori o “zavarivačkom lemljenju”); rijetko se izvodi jer je čvrstoća manja i potrebna je velika količina lema.



Za **meko lemljenje** teških kovina (Fe, Cu, Ni) koriste se lemovi koji su legure Sn-Pb i još nekih elemenata, a za lake kovine (Al i Al-slitine) lemovi koji su legure Sn-Zn-Cd i još nekih elemenata. Za **tvrdo lemljenje** teških kovina koriste se Cu-lemovi, Ag-lemovi, mjedeni lemovi i novosrebrni CuNi-lemovi, a za lake metale AlSi- i AlSiSn-lemovi. Kod **visokotemperaturnog lemljenja** koriste se lemovi temeljeni na Ni, Au i drugim plemenitim metalima te na Cu. Za posebne izvedbe koristiti se i lemovi temeljeni na Ti, Zr, Co ili Nb.

8.5. LIJEPLJENJE I LJEPILA

Lijepljenje je spajanje dijelova iz istih ili različitih materijala (metali, keramike, sintetički materijali, drvo, papir, plastika, cement, koža, ...) prijanjanjem pomoću ljepila. Fizikalni princip spajanja temelji se na:

- **adheziji** – silama privlačenja na sučelju dva različita materijala (tj. između osnovnog materijala i ljepila)
- **koheziji** – međumolekularnim silama u samom ljepilu.

Prednosti lijepljenja su:

- mogu se lijepiti jednaki i različiti materijali
- za spoj je potrebno malo prostora
- nisu potrebne rupe kao kod vijaka i zakovica pa nema koncentracije naprezanja
- nema visokih temperatura kao kod zavarivanja i utjecaja na svojstva materijala
- naprezanja na spoju se jednoliko raspoređuju na velikim površinama
- “sendvič”-konstrukcije omogućavaju visoku krutost i malu težinu (lake konstrukcije)

- spojevi su nepropusni i otporni na koroziju
- ne mijenjaju se svojstva materijala koji se lijepe jer nema visokih temperatura
- elastičnost ljepila može kompenzirati toplinske dilatacije te ublažiti udarce i vibracije
- jednostavna serijska proizvodnja.

Nedostaci lijepljenja su:

- mala čvrstoća u odnosu na druge načine spajanja (zavarivanje, lemljenje, zakivanje)
- najčešće je potrebna zahtjevna priprema površina za lijepljenje (mehaničko i kemijsko čišćenje)
- upotrebljivost do 200 °C
- nisu postojani pri dinamičkim opterećenjima
- javljaju se efekti starenja i puzanja
- prilikom izvođenja mogu biti potrebni uređaji za stezanje i zagrijavanje
- vrijeme do postizanja pune čvrstoće spoja može biti dugo.

Vrste ljepila su:

- **Fizikalno vezujuća ljepila** (kaučuk, umjetne smole) je rastopljeno u otapalu. Prilikom lijepljenja, često uz snažni pritisak, otapalo ishlapi. Nosivost spoja je srednja (5...10 N/mm²). Fizikalno vezujuća ljepila nisu pogodna za spajanje dva metala jer se onemogućava hlapljenje otapala, ali su dobra ako je barem jedan metal porozan.
- **Kemijski vezujuća ljepila** (reakcijska ljepila) – to su dvokomponentna ljepila: prva komponenta – duromeri (epoksidna, fenolna, poliesterna smola) koji su tekući, kao pasta ili u obliku filma, druga komponenta – otvrdivač (katalizator).

Dolazi do povezivanja makromolekula, često uz djelovanje povišene temperature i vlage, i nastaje tvar koja se ne može niti rastopiti niti rastaliti. Ova ljepila su veoma čvrsta i pogodna za metal, staklo, keramiku i polimere u raznim kombinacijama. Topla kemijski vezujuća ljepila postižu vezna svojstva brže od hladnih (od nekoliko minuta na više pri temperaturama do 200 °C), ali su neprikladna za spajanje većih ili toplinski osjetljivih dijelova. Potrebna je aparatura – sušionici, ploče s grijačima, naprave. Toplim ljepilima se postiže veća čvrstoća spoja nego hladnim. Kod nekih hladnih kemijski vezujućih ljepila je za postizanje veznih svojstava potrebno i do nekoliko dana. Minimalno je potrebna sobna temperatura. Za izdržljivost lijepljenog spoja jako je važno stanje površine koja se lijepi. Adhezijske sile su djelotvorne samo ako je površina prijanjanja čista, ohrapavljena i odmašćena. Hrapavljenje metalnih površina koje se obavlja finim četkama, brusnim papirom ili pjeskarenjem povećava površinu prijanjanja stvaranjem udubljenja i uzvišenja. Površine obrađivane silikonskim pastama ili sredstvima se ne mogu lijepiti. Čišćenje i odmašćivanje se obavlja trikloretilenom, acetonom, lužinama i dr. Sloj ljepila treba biti što tanji jer su adhezijske sile najčešće veće od kohezijskih, a čvrstoća spoja opada s porastom debljine sloja ljepila.

Pri oblikovanju spojeva općenito vrijede iste smjernice kao i za lemljene spojeve. Budući da su vlačna i smična čvrstoća lijepljenog sloja bitno manje od čvrstoća metala, potrebna je razmjerno velika površina lijepljenja. Lijepljeni spojevi su naročito osjetljivi na ljuštenje pa takva naprezanja kao i savijanje treba izbjegavati, ali se izbjegavaju i vlačna naprezanja.

Spojevi aluminijskih dijelova daju najveće čvrstoće, a zatim slijede spojevi čeličnih, Cu i mjedenih dijelova. Najveća čvrstoća postiže se slojem ljepila debljine 0.1 ... 0.3 mm, dok pri debljini od 1 mm čvrstoća pada na cca. 60%. Čvrstoća se smanjuje tijekom vremena i zbog starenja ljepila i okolnih utjecaja može pasti i na 50% početne.

8.6. PITANJA ZA PROVJERU ZNANJA

1. Koje su karakteristike korištenja vijaka i zakovica pri spajanju materijala?
2. Zašto se izvodi uplitanje, stiskanje i omatanje vodova?
3. Kako se ostvaruje varenje materijala?
4. Kako se definira lemljenje?
5. Koji su sve načini lemljenja?
6. Što je područje taljenja materijala – lema?
7. Koje su prednosti lemljenja?
8. Koji su nedostaci lemljenja?
9. Navedite sve postupke lemljenja.
10. Koji materijali se koriste za meko lemljenje?
11. Koji materijali se koriste za tvrdo lemljenje?
12. Koji materijali se koriste za visokotemperaturno lemljenje?
13. Kako se definira lijepljenje?
14. Fizički princip spajanja materijala temelji se na čemu?
15. Koje su prednosti lijepljenja?
16. Koji su nedostaci lijepljenja?
17. Koje su vrste ljepila i za što se koriste?
18. Kako se priprema materijal prije lijepljenja?
19. O čemu ovisi čvrstoća lijepljenog spoja?

9. OSTALI MATERIJALI

Inovacije u konstrukcijskom oblikovanju proizvoda i u procesima proizvodnje bitno su određene svojstvima tehničkih materijala. Iskustva iz najrazvijenijih zemalja pokazuju da se primjenom novih materijala i pripadnih visokih tehnologija ostvaruju vrlo značajne prednosti na tržištu. Istraživanje, razvoj i primjena novih materijala te pripadnih tehnologija spada – uz genetiku i biotehnologiju, informatiku i komunikacije, u “generičke” discipline znanosti i tehnike. Znanost i inženjerstvo materijala stvara vrlo velik broj inovacija, bitnih za niz drugih grana tehnike. Primjena suvremenih materijala izaziva razvoj proizvoda poboljšanih karakteristika, naročito u sljedećim industrijskim granama:

- **Industrija strojeva i alata** – za klasične metalne materijale razvijaju se nove tehnologije oblikovanja na gotovo konačan oblik – metalurgija praha, injekcijsko prešanje metala, istiskivanje u tjestastom (semi-solid) stanju, precizno i tlačno lijevanje i dr. Za alate i dijelove izvrtnute trošenju rabe se oksidne i sve više neoksidne vrste tehničke keramike. Postupci modificiranja i prevlačenja dijelova strojeva i alata omogućuju bitno povećanje trajnosti (otpornosti na trošenje i korozijske postojanosti).
- **Industrija vozila** – u težnji da automobili i druga vozila imaju što manju masu, što veću sigurnost i uz to što nižu cijenu, raste udio primjene čelika povišene čvrstoće (HSLA), polimernih materijala, aluminijskih i magnezijjskih legura, tehničke keramike i dr.
- **Energetska i procesna postrojenja, industrija nafte i plina** – u primjenu ulaze modificirane vrste martenzitnih, austenitnih i duplex čelika povišene mehaničke otpornosti pri visokim temperaturama, bolje otpornosti na posebne oblike korozije (interkristalnu, jamičastu i napetosnu) te otpornosti na visokotemperaturnu oksidaciju. Ni i Co-superlegure omogućuju povišenje radne temperature plinskih turbina i stupnja djelovanja.
- **Zrakoplovna industrija** – istražuje se veća primjena Al-Li legura i novih Ti-legura. Za borbene zrakoplove udio kompozita je u zadnjih 30-tak godina povećan od oko 2% na preko 40%. Za lopatice plinske turbina rabi se monokristali superlegura nikla, te toplinska zaštita s keramičkim prevlakama. Tehnička keramika i keramički kompoziti nalaze svoje mjesto u toplinski najopterećenijim dijelovima pogonskih sustava.
- **Kućanski aparati** – polimerni materijali omogućili su velikoserijsku, sve jeftiniju, proizvodnju lakših i estetski atraktivnijih aparata. Uz to, ključne prednosti u odnosu na druge skupine materijala su: dobra kemijska postojanost, izolacijska svojstva i dobro prigušenje vibracija.
- **Sportski rekviziti i industrija zabave** (npr.: skije, bicikli, daske za jedrenje, igračke i sl.) – polimerni materijali i njihovi kompoziti gotovo su potpuno potisnuli iz primjene drvo i metalne materijale.
- **Medicina** – nove vrste nehrđajućih čelika, Ti-legura, Co-legura i pametnih legura rabe se za implantate i fiksatore, istražuju se i primjenjuju polimerni materijali za medicinske aparate, krvne žile, umjetnu kožu. Vanjski fiksatori i proteze izrađuju se od polimernih kompozita itd.
- **Elektronika i komunikacije** – npr. silicij je omogućio razvoj današnjih računala, a očekuje se njihov još nagliji razvoj primjenom nanocijevčica ugljika. Također su staklena vlakna izazvala revoluciju u načinu i brzini prijenosa informacija.
- **Optika i optoelektronika** – npr. postupcima modificiranja površina dobivaju se ultratanki slojevi na različitim podlogama, koji imaju posebna svojstva.
- **Nova područja**, kao npr. mikrosistem tehnika, senzorika, bionika, mikroelektronika, adaptronika...

Današnji razvoj materijala odvija se primjenom **znanstvenih pristupa**, interdisciplinarnom suradnjom fundamentalnih i primijenjenih disciplina, kvantitativnih metoda i računala, a ne kao nekad na osnovi vještina i empirije. Tako su npr. mikrolegirani čelici, čelici povišene čvrstoće i korozijske postojanosti, Ti-legure, Ni i Co-superlegure, poluvodiči, legure s efektom prisjetljivosti oblika, kompozitni materijali, tehnička keramika, intermetalni spojevi i drugi današnji materijali razvijeni znanstvenim istraživanjima. U pravilu nema više slučajnosti u otkrivanju novih materijala, nego je to posljedica smišljenog i kontinuiranog djelovanja. Prema nekim tvrdnjama u posljednjih 60-tak godina u primjenu je ušlo toliko vrsta materijala koliko u svim prethodnim stoljećima! Procjene govore da danas raspolažemo s 70 000 do 100 000 različitih vrsta tehničkih materijala.

9.1. "PAMETNI" MATERIJALI

Pod pojmom "pametni" misli se na materijale koji mijenjaju svoju mikrostrukturu i svojstva pod djelovanjem okolnih uvjeta (temperature, mehaničkog naprezanja, kemijskog djelovanja, električnog ili magnetnog polja, svjetlosti i dr.). Za prirodne materijale to nije novost – drvo npr. je sposobno samo ojačati pod djelovanjem mehaničkog opterećenja ili ozdraviti ako dođe do oštećenja. Oko 100 godina poznat Hadfield-ov čelik s 1% C i 12% Mn je prvi umjetan pametan materijal. Kod ovog relativno mekog austenitnog čelika dolazi do otvrdnuća uslijed lokalne transformacije u martenzit, a zbog visokih specifičnih pritisaka pri trenju ili udaranju. Sličan fenomen je poznat kod polipropilena gdje na vršku mikropukotine dolazi do plastičnog preustroja molekula i zaustavljanja rasta pukotine. Slijedeća faza razvoja obuhvaća materijale za senzore i aktuatore. Materijali za senzore su sposobni transformirati neku veličinu u drugo lakše mjerljivo svojstvo. Aktuatori mogu izvesti pomake i/ili izazvati (podnijeti) opterećenje, a mogu biti aktivirani promjenama magnetnog i električnog polja ili temperature.

Feroelektrični (FE) i feromagnetni (FM) materijali zajedno s legurama s efektom prisjetljivosti oblika (Shape Memory Alloy – SMA) imaju fazne transformacije pri nižim temperaturama povezane s promjenom volumena i oblika kao i formiranjem domene strukture. Piezoelektrični materijali (PE) su prikladni za senzore u uvjetima mehaničkog opterećenja i deformacija. Razvoj SMA legura započinje s legurama tipa Ni-Ti a kasnije se otkrivaju ternarne legure na bazi Cu: Cu-Al-Ni, Cu-Zn-Al i Cu-Al-Be (+ 0.5 %Si i male dodatke Cr, V, Mn ili Ti), kao i ostale legure na bazi željeza. Za aktuatore se najčešće rabe SMA s dvosmjernim efektom jer promjena oblika nastupa pri ugrijavanju i pri ohlađivanju. Kod legura FeNiCoTi i FeMnSi fazne transformacije su povezane sa značajnom promjenom volumena. One se koriste za primjene s jednosmjernim efektom, kao što su npr. cijevne spojnice, elementi za prigušenje vibracija, ali ne za aktuatore gdje su nužne opetovane transformacije.

U Japanu se je pojavio nehrđajući Cr-Ni-Mn-Si čelik s efektom prisjetljivosti oblika za koji se predviđa primjena za spojnice cijevi, kvačice, zatvarače, opruge i temperaturne senzore, u agresivnoj okolini. Danas se sve više istražuju i umreženi **polimeri** gdje se efekt pamćenja oblika ostvaruje preko formiranja dvostruke mreže molekularnih lanaca. U primjenu su najviše uvedene SMA legure i to za: električne spojnice i prekidače, termostate, opruge, spojnice cijevi za visoke tlakove, spajanje kompozitnih materijala, mobilne telefonske antene, ortodonske naprave, podupirače (stentove) unutar krvnih žila i prostate, vodeće žice katetera, fiksatore kralježnice.

Naredni cilj je izvedba **inteligentnih struktura** (konstrukcija) sa zadaćom obavljanja posebnih funkcija pod utjecajem vanjskih podražaja - npr. pametni senzori i aktuatori ugrađeni u mostove ili krila zrakoplova, lopatice rotora helikoptera, gdje mogu reagirati na prekomjerne deformacije ili pojavu pukotina, ili kao dijelovi različitih biomedicinskih pomagala (npr. umjetna šaka) i sl.

9.2. AEROGELOVI

Aerogelovi su visokoporozni materijali s ekstremno malom gustoćom, koja je normalno između 30 i 300 kg/m³. Dok je veličina pora kod standardnih poroznih materijala, kao što su spužve ili pjene za izoliranje, u mikrometrima ili milimetrima, kod aerogelova se šupljine mjere u nanometrima. U načelu se radi o nanostrukturiranim materijalima. Aerogelovi se mogu sastojati 99 % od zračnih kanala, što rezultira velikom unutarnjom specifičnom površinom. Klasični postupci stvaranja aerogelova, poznati su već 60 godina, proizlaze iz tzv. sol-gel procesa kod kojeg iz tekuće mješavine (sol) raste amorfnu, čvrstu mrežu (gel). U tako nastaloj gel mreži uskladištena je još tekućina koja ekstrahira u nadkritičnom stanju, pri visokom tlaku i temperaturi. Pri tome struktura gela ostaje nepromijenjena. U međuvremenu su se razvile vrlo sigurne varijante postupaka, koje omogućuju veću proizvodnju tih materijala.

Pored najraširenijih aerogelova iz kremenog stakla, koji se baziraju na silicij-oksidu, danas se rabe drugi osnovni materijali kao što su aluminij-oksidi, titan-oksidi ili miješani oksidi. Prije nekoliko godina je uspjela proizvodnja organskih aerogelova koji su u usporedbi s keramičkim gelovima manje porozni i bolje zadržavaju toplinu. Osim toga zagrijavanjem bez dovoda zraka (piroliza) mogu se preoblikovati u ugljične aerogele koji provode struju. Njihov razvoj još je u relativno ranoj fazi. Praktično sve mogućnosti za uporabu aerogelova baziraju se na njihovoj vrlo poroznoj nanostrukтури. Ona je odgovorna za nizak indeks loma, nizak modul elastičnosti, nisku akustičnu impedanciju i malu vodljivost topline. U pojedinim slučajevima je korisna i visoka optička transparentnost.

Aerogelovi imaju u budućnosti posebne izgleda kao materijal za izoliranje topline. Pošto silicij-oksidi aerogelovi teško gore i smiju se reciklirati, pogodni su kao nadomjestak za izolacijske pjene koje sadržavaju freone, npr. za frižidere. Prikladni su za pasivno korištenje sunčane energije na zidovima kuća ili kao krovni prozori jer propuštaju svjetlo. Brzina zvuka u aerogelovima znatno niža nego u zraku i može se mijenjati variranjem proizvodnih parametara. Taj efekt se može iskoristiti kod podešavanja akustične impedancije na graničnim područjima (akustični antirefleksni slojevi). Zbog velike specifične površine i lake ugradnje katalitički aktivnih supstanci, aerogelovi imaju ogroman potencijal kao nosioci katalizatora za kemijske procese. U svemirskom prometu može se koristiti kao lagani medij za spremanje goriva. Atraktivna je i mogućnost ugljičnih aerogelova kod izgradnje super kondenzatora s ekstremnom gustoćom vodljivosti. Slaba strana aerogelova je relativno visoka osjetljivost na okolne utjecaje. Tako se moraju silicijoksidni aerogelovi čuvati od vlage, jer je njihova mreža (kostur) zbog kemijske strukture takva da upija vodu.

9.3. DIJAMANTI

Zbog kovalentne veze **dijamant** je izuzetno tvrd i kemijski postojan. Istovremeno je optički transparentan i ima malu sposobnost stlačivosti i visoku toplinsku vodljivost. Sve značajnije je neposredno prevlačenje površina dijamantnim slojem. Tu se radi o raznim varijantama CDV – postupaka (Chemical Vapour Deposition) kod kojih se ugljik iz plinskih ugljičnih spojeva, kao što je metan ili acetilen, izdvaja pomoću atomarnog vodika i na odgovarajućoj podlozi nastaju dijamantni slojevi. Jedini uvjet je da se substrat može ugrijati na temperaturu višu od 600°C. Razvoj takvih postupaka danas se koncentrira na daljnja poboljšanja teorijskog razumijevanja kao i povećanja brzine taloženja i sniženje temperature procesa. Na tržištu je već cijeli niz proizvoda prevučenih CVD – dijamantnim slojem. U to spadaju npr. membrane zvučnika, rezni alati, te kuglični ležaji. Dijamant je pogodan i za optičku uporabu zbog svoje visoke transparentnosti kroz široko područje valnih duljina. Glavna primjena dijamantnih slojeva u elektronici je njihovo korištenje za snižavanje temperature elektroničkih sklopova. Zbog dobre kombinacije kemijske postojanosti i visoke toplinske vodljivosti, dijamant je zanimljiv za elektroničke dijelove i senzore, koji se mogu rabiti u agresivnim medijima pri znatno višim radnim temperaturama nego što je to slučaj kod silicijskih komponenti.

Ovdje se krije velik tržišni potencijal. U usporedbi sa silicijem i drugim poluvodičkim materijalima (galijev arsenid, indijev fosfid), dijamant ima niz boljih svojstava, što omogućuje izradu integriranih krugova na osnovi monokristalnih slojeva dijamanta s najvećom čvrstoćom i probojnim naponom, kao i temperaturnim otporom iznad 700 °C (silicij do 200 °C). Pored toga takav dotirani dijamant ima jako dobru pokretljivost atoma i praznina (nasuprot galijevom arsenidu), dok čisti dijamant ima dobra izolacijska svojstva. Tako se mogu zajedno sa izvanrednom toplinskom vodljivošću realizirati brze, visoko integrirani sklopovi do najvećih frekvencija.

9.4. FULERENI I NANOCJEVČICE

Fulerenima se označuju velike molekule koje se sastoje isključivo od ugljika, a imaju prostorne, u sebi zatvorene kuglaste strukture. Najvažniji je predstavnik molekula C_{60} (Buckminster) u obliku nogometne lopte sastavljena od 12 peterokuta i 20 šesterokuta. Ovaj fullerene ima promjer oko 0.7 nm a unutrašnjost je prazna. **Fulerenske nanocjevčice** (tzv. "nanotubes") promjera 1...10 nm i dužine do 1000 nm pokazuju impresivna mehanička i električna svojstva. Vlačna čvrstoća je oko 10 puta viša od čvrstoće ugljičnih vlakana a gustoća pola manja. Električna vodljivost je kao u bakra, a toplinska vodljivost tako visoka kao kod dijamanta. Za buduća istraživanja novih materijala, na osnovi fulerena, zanimljivo je formiranje kaveza u koji bi se dodavali različiti elementi i njihovi spojevi. Molekula C_{36} se istražuje kao osnova za supravodiče. Široke varijacije svojstava mogu se ostvariti tijekom postupka proizvodnje a potencijalne primjene su za kemijske senzore, ultračvrste kompozite, za tanke mreže za prijenos informacija u bioničkim materijalima itd. Stručnjaci IBM-a intenzivno rade na primjeni nanocjevčica u gradnji novih vrsta procesora, ali prve primjene očekuju za 10-tak godina. NASA smatra da bi istraživanja u smjeru dobivanja uporabivih nanocjevčica mogla dovesti do revolucionarnih primjena u različitim područjima.

9.5. TITANIJEVE LEGURE

Titanijeve legure su vrlo čvrste, imaju malu gustoću, otporne su na koroziju i kompatibilne su s novim kompozitnim materijalima. Nedostatak je njihova uvijek visoka cijena (10 - 20 puta viša u odnosu na aluminij) i, nešto manje, što nisu pogodne za visokotemperaturne namjene. Zbog svega navedenog najviše se koriste (do 99%) u zrakoplovnoj industriji i proizvodnji različitih projektila. Superiornije su od nekih novih kompozitnih materijala, jer ravnomjerno i izotropno raspodjeljuju naprezanja. Osim navedenog, koriste se za izradu lopatica kompresora i dijelove mlaznih motora, za dijelove autoklava za izradu izmjenjivača topline. Zbog otpornosti na djelovanje morske vode, sve se više primjenjuju u brodogradnji, prvenstveno za vojne brodove i podmornice.

Od titanijevih legura se izrađuju lopatice kompresora, mlaznice, glavine, kućišta motora i dr., ali i visokopterećeni dijelovi drugih letjelica primjerice helikoptera. Upotrebljavaju se za dijelove motora i elemente konstrukcija izložene povišenim eksploatacijskim temperaturama do maksimalno 550 °C. Materijali na bazi titanija s vlačnom čvrstoćom do 1200 N/mm² podesni su za izradu velikog broja raznih dijelova od malih zatezača, koji teže svega nekoliko grama, pa sve do nosača krila koji teže do tonu. Zahvaljujući osnovnim prednostima, maloj masi u kombinaciji s izuzetnom pouzdanošću i korozijskom postojanošću, ovi se materijali danas rabe u izradi primarnih konstrukcijskih elemenata kao što je trup vojnih i putničkih zrakoplova. Uporaba titanovih legura u zrakoplovnoj industriji svakim danom je sve veća. Primjerice kod Boeinga 777 ovi su materijali zastupljeni s oko 10 % mase zrakoplovne konstrukcije. Zrakoplov Blackbird je bio prvi avion u cijelosti načinjen od titanijevih legura. Krila i trup ovog zrakoplova prekriveni su oplatom u potpunosti izvedenom od lakih i čvrstih titanijevih legura.

Materijali na bazi titanija teško su obradivi odvajanjem čestica, jer su vrlo žilavi, a javlja se i opasnost od zapaljenja strugotine. Zbog kristalne građe ograničeno su hladno oblikovljivi i bolje toplo oblikovljivi. Sve vrste legura su dobro zavarljive u zaštitnoj atmosferi ili u vakuumu. Proizvodni troškovi i naročito troškovi prerade danas su još uvijek vrlo visoki, što u velikoj mjeri određuje primjenu.

Čisti titanij je sjajan, bijel metal koji se javlja u dvije alotropske modifikacije: alfa-titanij guste heksagonske kristalne strukture koji pri temperaturi 880 °C polako prelazi u beta-titanij s prostorno centriranom kubičnom strukturom. Titanij se odlikuje malom gustoćom (upola manjom od čelika), visokim talištem, niskim toplinskim koeficijentom rastezanja, te otpornošću prema koroziji i djelovanju morske vode zbog čega se upotrebljava za izradu dijelova brodova i zrakoplova. Na nižim temperaturama dosta je krhak, a zagrijan daje se kovati i to samo ako u njemu nema kisika. Dobar je vodič električne struje. Otporan je prema hladnim kiselinama (osim fluorovodične), prema hladnim i zagrijanim otopinama lužina i zlatotopcima. S kisikom reagira tek zagrijan do crvenog žara, a s klorom pri temperaturi 550 °C. Titanij je jedini element koji može izgarati u dušiku.

9.6. POSTUPCI MODIFICIRANJA I PREVLAČENJA POVRŠINA

Postupci modificiranja i prevlačenja površina primjenjuju se zbog povišenja **otpornosti na trošenje, korozijske i kemijske postojanosti, radi dekorativnih razloga**. Moguće je nanositi različite metale, legure, keramičke spojeve (karbide, nitride i okside) i sasvim nove kombinacije materijala, u jednom ili više slojeva na metalne i nemetalne substrate. Koristeći višekomponentne prahove dobivaju se sasvim neočekivana svojstva površinskih slojeva. Osim za prevlačenje alata i dijelova strojnih elemenata, područja primjene nalazimo u elektronici – senzorika, folije, optoelektronici – solarne ćelije, foto i laserske diode, optici, medicinskoj tehnici itd. U primjeni su najzastupljeniji postupci za nanošenje tankih slojeva taloženjem iz parne faze – PVD (preko 50%), zatim kemijskim taloženjem iz parne faze – CVD. U budućim se primjenama očekuje porast udjela modificiranja u plazmi i implantacije iona. Glavna primjena PVD tehnologije je prevlačenje alata od tvrdih metala (u Europi se više od 10% tih alata prevlači s TiC ili TiN), a očekuje se i znatno proširenje primjene na drugim alatima. Ponegdje je i preko 50% reznih pločica obrađeno na taj način. Od postupaka toplinskog naštrcavanja očekuje se i dalje najveća zastupljenost nanošenja u plazmi, zatim naštrcavanja u struji oksigoriiva velike brzine (HVOF) i naštrcavanja žicom s pomoću električnog luka. Velika pozornost se poklanja optimiranju parametara procesa u plazmi kao i automatiziranju cijelog postupka. Za debljine od 0,05 do 1 mm rabi se naštrcavanje u plazmi, a za veće debljine navarivanje prahom u plazmi uz dodatnu volfram elektrodu. Osim atmosferskog plazma naštrcavanja sve se više uvodi vakuumsko plazma naštrcavanje, ponajprije za oplemenjivanje materijala osjetljivih na kisik (npr. Ti). Reaktivno naštrcavanje u vakuumu koristi se za sintezu materijala ali i za modificiranje površina (npr. ojačavanje NiCr slojeva s TiC). Od nedavno ovim se postupkom dobivaju **DLC (Diamond Like Carbon)** slojevi pomoću Ar/H₂ plazme, (DC plazma) koja se uvodi u struju metana. Laser se koristi za: površinsko kaljenje, otvrdnjavanje sitnjenjem strukture, otvrdnjavanje rastaljivanjem, površinsko legiranje i stapanje toplinski nanesenih prevlaka ili traka.

9.7. MOGUĆNOSTI RAZVOJA MATERIJALA U HRVATSKOJ

Hrvatska je gotovo potpuno uvezno ovisna o materijalima za potrebe industrijske proizvodnje. Skroman je asortiman vlastite proizvodnje čeličnih cijevi i aluminijskih i njegovih legura, te nekih vrsta polimera. Značajni siroviniski potencijali i široko polje uporabe postoje u proizvodnji anorganskih nemetalnih materijala – nove vrste betona, stakla, tehničke keramike, i naročito kod proizvoda od drva. Stoga je brzo i ciljano praćenje razvoja novih materijala osnova je uključivanje u globalnu proizvodnju, i to naročito preko malih i srednjih poduzeća koja mogu najbrže usvajati ta saznanja i

Iako se prilagođavati promjenama. Smatramo da se za **nova poduzeća** u Hrvatskoj otvaraju mogućnosti na sljedećim područjima bavljenja materijalima:

- Razvoj, ispitivanje i proizvodnja polimera i naročito njihovih kompozita. Na ovom području je moguća kooperacija s inozemnim proizvođačima vozila, zrakoplova, malih brzih brodova, sportskih naprava i sl., uz relativno mala ulaganja u opremu;
- Proširenje asortimana vrsta aluminijskih legura i poluproizvoda uvođenjem novih proizvodnih postupaka. Širenje tržišta je moguće u automobilske industriji, gradnji brodova, graditeljstvu, industriji ambalaže itd.
- Usvajanje i primjena suvremenih postupaka za modificiranje i prevlačenje površina kojima se povisuje trajnost dijelova. Izuzetne su mogućnosti suradnje s automobilske industrijom, industrijom nafte i plina, poljoprivrednih, građevinskih i rudarskih strojeva, proizvodnje medicinskih pomagala i implantata;
- Razvoj, ispitivanje i proizvodnja anorganskih nemetalnih materijala, posebno za potrebe domaćeg graditeljstva;
- Veće iskorištenje drva kao konstrukcijskog materijala preradom i oplemenjivanjem u proizvode višeg stupnja oblikovanja i obrade, kao i drugih prirodnih obnovljivih materijala – npr. biljnih vlakana, dlake, vune.
- Uvođenje novih postupaka za oblikovanje dijelova na gotovo konačan oblik;
- Računalno modeliranje i simulacije u razvoju i primjeni materijala i pripadnih tehnologija;
- Smišljeno recikliranje materijala i obnavljanje proizvoda, ali i razvoj procesa i opreme za recikliranje materijala.

Preduvjet za brzo uvođenje navedenih materijala i tehnologija u mala i srednja poduzeća je formiranje mreže **centara** za prijenos znanja, za uvođenje tehnologija i permanentno obrazovanje. Ovi bi centri trebali biti vezani s fakultetima i postojećim centrima za transfer tehnologija te opremljeni najsuvremenijom opremom i postupcima za istraživanja, uvođenje postupaka u praksu i vježbanje korisnika. Naime, danas niti jedno malo i srednje poduzeće u Hrvatskoj nema dovoljno snage za vlastiti razvoj na području materijala, pa bi takvi centri preuzeli ulogu, praćenja i prenošenja najnovijih saznanja iz svijeta u tuzemnu proizvodnju.

MJERENJA U ELEKTROTEHNICI

1. UVOD U MJERNU TEHNIKU

1.1. DEFINICIJE I POJMOVI

U mjernoj se tehnici upotrebljava cijeli niz pojmova koji opisuju različite pojave, sredstva i postupci s kojima se susrećemo pri mjerenju. Mjerenja su neizostavna u postupku konstrukcije, proizvodnje i održavanja uređaja i sklopova. Da bi mjerenje bilo uspješno i točno, potrebno je dobro poznavati načelo rada i karakteristike mjernih instrumenata i mjerne metode koje se koriste tijekom postupka mjerenja.

Osnovni pojmovi o mjerenju su:

- **Mjerna veličina** je fizikalna veličina kojoj mjerenjem određujemo vrijednost.
- **Mjerenje** je skup djelovanja radi određivanja vrijednosti fizikalne veličine.
- **Električna mjerenja** su mjerenja fizikalnih veličina koje nastaju uslijed djelovanja elektromagnetskih pojava kao što je jakost električne struje, električni napon, količina elektriciteta, električni otpor, električna snaga, električna energija, električni kapacitet i dr.
- **Mjerni instrument** je naprava ili uređaj kojim se provodi postupak mjerenja fizikalne veličine.
- **Električni mj. instrument** je naprava kojim se provodi postupak mjerenja električne veličine.
- **Mjerilo** je naprava ili instrument kojim provodimo mjerenje (npr. vaga ili omometar).
- **Mjera** je element koji utjelovljuje neku mjernu veličinu (npr. uteg).
- **Mjerna jedinica** je odgovorna jedinična količina fizikalne veličine s kojom se uspoređuje mjerna veličina kako bi se saznala njezina vrijednost. Možemo je definirati kao odgovorom prihvaćenu posebnu veličinu koja služi za kvantitativno iskazivanje veličina iste dimenzije.
- **Mjerna metoda** je način kojim se u postupku mjerenja dolazi do vrijednosti mjerne veličine. Možemo je definirati kao logički općenito opisan slijed djelovanja, koji se rabi za provedbu mjerenja.
- **Mjerni rezultat** je brojčana vrijednost koja opisuje koliko je puta mjerna veličina veća ili manja od mjerne jedinice.

Mjerenja fizikalnih veličina mogu se mjeriti na dva načina: **izravno** ili **posredno**. Pri izravnoj metodi mjerenja koristi se instrument sa izravnim očitanjem mjerene veličine, uspoređujući je sa svojom jedinicom. Posredno mjerenje fizikalnih veličina postiže se primjenom mjernih metoda (postupaka) gdje je određivanje mjerene veličine neposredno (npr. U-I metoda mjerenja, mosni spojevi i dr.)

Mjerne jedinice možemo razvrstati u slijedeće skupine:

- **Jedinice Međunarodnog sustava** (jedinice SI):
 - osnovne
 - izvedene s posebnim nazivima i znakovima
 - izvedene bez posebnih naziva i znakova
 - iznimno dopuštene jedinice izvan SI
- **Decimalne jedinice** (tvore se pomoću decimalnih predmetaka)
 - od jedinica SI, osim Celzijeva stupnja i kilograma
 - od iznimno dopuštenih jedinica izvan SI, a to su: litra, bar, teks, elektronvolt i var
- **Složene izvedene jedinice**
 - od izvedenih i osnovnih SI jedinica (npr. A/m, F/m, $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ i dr.)

Međunarodni sustav mjernih jedinica (fr. *Système International d'Unités* – SI) je zakonski regulirani sustav mjernih jedinica, a temelji se na sedam osnovnih mjernih jedinica: **metar** za duljinu, **kilogram** za masu, **sekunda** za vrijeme, **amper** za jakost električne struje, **kelvin** za temperaturu, **sekunda** za vrijeme, **mol** za količinu tvari i **kandela** za svjetlosnu jakost.

Izvedene SI jedinice nastale su množenjem i dijeljenjem osnovnih SI, a takve dobivaju posebne nazive i znakove. Nazivi mjernih jedinica dobiveni su uglavnom prema prezimenima znanstvenika koji su proučavali fizikalne pojave, te ih definirali.

Definicije osnovnih SI jedinica	
METAR	– duljina koju svjetlost prijeđe u vakumu za $\frac{1}{299792458}$ - ti dio sekunde.
KILOGRAM	– masa međunarodne pramjere mase (primjerak se čuva u Seversu kod Parisa).
SEKUNDA	– trajanje 9 192 631 770 perioda elektromagnetskog zračenja koje nastaje pri prijelazu elektrona između dvaju hiperfina razina osnovnog stanja atoma cezija 133.
AMPER	– vodičem teče struja od 1 A ako se kroz presjek vodiča prenosi naboj od jednog Coulona u sekundi, odnosno struja od 1A odgovara prolazu $6.2 \cdot 10^{18}$ elektrona u sekundi kroz presjek vodiča.
KELVIN	– 273.16 – ti dio termodinamičke temperature vode u trojnom stanju.
MOL	– količina tvari onog sustava koji sadrži onoliko elementarnih jednakih tvari koliko ima atoma u 0.012 kg najčešćeg ugljikovog izotopa C_{12} . U jednom molu izotopa ugljika C_{12} ima $6.022 \cdot 10^{23}$ atoma (Avogadrov broj).
KANDELA	– svjetlosna jakost u danom smjeru koju emitira izvor jednobojnog svjetla koja ima frekvenciju $540 \cdot 10^{12}$ Hz i čiji intenzitet zračenja u tom smjeru iznosi $\frac{1}{683}$ W/sr (vata po sterodijanu).

Tablica 1.1-1 Definicije osnovnih jedinica SI

Tablica 1.1-2 Pregled osnovnih jedinica SI

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

Decimalne mjerne jedinice su decimalni višekratnici ili dijelovi mjernih jedinica sa posebnim nazivima i znakovima. Naziv decimalne mjerne jedinice tvori se sastavljanjem **međunarodno dogovorenog predmetka** ispred naziva mjerne jedinice, a znak decimalne mjerne jedinice tvori se stavljanjem znaka predmetka ispred znaka mjerne jedinice.

Predmetak	Znak	Vrijednost
Deci	d	10^{-1}
Centi	c	10^{-2}
Mili	m	10^{-3}
Mikro	μ	10^{-6}
Nano	n	10^{-9}
Piko	p	10^{-12}
Femto	f	10^{-15}
Ato	a	10^{-18}
Zepto	z	10^{-21}
Jokto	y	10^{-24}

Predmetak	Znak	Vrijednost
Deka	da	10
Hekto	h	10^2
Kilo	k	10^3
Mega	M	10^6
Giga	G	10^9
Tera	T	10^{12}
Peta	P	10^{15}
Eksa	E	10^{18}
Zeta	Z	10^{21}
Jota	Y	10^{24}

Tablice 1.1-3 Predmetci za tvorbu umanjanih i uvećanih decimalnih jedinica

1.2 POGRJEŠKE MJERENJA

Osnovni cilj mjerne tehnike je da se eksperimentalnim putem odredi prava vrijednost mjerene veličine s određenom (ili potrebnom) točnošću u određenim (postojećim) okolnostima. Međutim i uz primjenu najtočnijih mjernih metoda i instrumenata (uređaja) nije moguće potpuno točno odrediti pravu vrijednost mjerene veličine. Kod svakog mjerenja imamo neku pogrešku mjerenja zbog nesavršenosti mjerne opreme, mjernog postupka, mjernog objekta, te pogrešaka samog izvršitelja mjerenja. Tada rezultat pojedinog mjerenja odstupa od prave vrijednosti mjerene veličine, a odstupanje nazivamo pravom pogreškom mjerenja. Pod pravom vrijednošću smatramo onu koja se u danom trenutku može izmjeriti najtočnijim postupkom.

Općenito kažemo da dolazi do stanovitog odstupanja između prave i izmjerene vrijednosti mjerene veličine. Ta odstupanja nazivamo **apsolutnim pogreškama mjerenja**, a različito ih definiramo ovisno o tome da li su to pogreške mjerenja ili pogreške mjera. Pogreške mjerenja mogu se podijeliti po iznosu kao:

- Apsolutne pogreške mjerenja
- Relativne pogreške mjerenja

Apsolutna pogreška (p_a) je razlika između izmjerene vrijednosti (X_{mj}) i prave vrijednosti (X_p) mjerne veličine, a računa se prema izrazu:

$$p_a = X_{mj} - X_p$$

Apsolutna pogreška može imati pozitivan i negativan predznak, a iskazuje se u fizikalnoj jedinici kojom izražavamo mjerni rezultat.

Pri ocjenjivanju točnosti mjerenja najviše je zanimljiva **relativna pogreška** koja je omjer apsolutne pogreške i prave, odnosno naznačene, vrijednosti mjerene veličine. Relativna pogreška se računa prema izrazu:

$$p = \frac{p_a}{X_p} = \frac{X_{mj} - X_p}{X_p}$$

Relativna pogreška može imati pozitivan i negativan predznak, a iskazuje se brojem bez mjerne jedinice.

Ako relativnu pogrešku izrazimo u postocima dobivamo **postotnu pogrešku**, koja se računa se prema izrazu:

$$p\% = \frac{p_a}{X_p} \cdot 100\% = \frac{X_{mj} - X_p}{X_p} \cdot 100\%$$

Postotna pogreška može imati pozitivan i negativan predznak, a iskazuje se brojem i znakom % bez mjerne jedinice.

Da bi smanjili pogrešku mjerenja vrlo često koristimo korekciju, odnosno ispravak. **Korekcija** je neki iznos koji dodajemo izmjerenoj vrijednosti mjerene veličine kako bi smanjili pogrešku mjerenja. Korekcija ima istu apsolutnu vrijednost kao i apsolutna pogreška ali je suprotnog predznaka kao što je vidljivo iz izraza:

$$I = -p_a \quad ; \quad X_i = X_{mj} + I$$

Prema uzroku nastajanja mjerne pogreške možemo podijeliti na:

- Grube pogreške
- Slučajne pogreške
- Sistemske pogreške

Grube pogreške nastaju nepažnjom ili neznanjem ispitivača, izborom neodgovarajućeg mjernog postupka ili zbog neuočavanja uzroka pogreške. Primjeri grube pogreške su: na instrumentu s više skala položaj kazaljke je očitao sa krive skale, ili ispitivač je odabrao pogrešnu mjernu metodu, pogrešni mjerni instrument i td.

Slučajne pogreške nastaju zbog neizbježnih promjena koje nastaju u mjerilima, mjerama, mjernom objektu, te zbog promjena utjecaja okoline i ispitivača. Primjeri slučajne pogreške su: utjecaj vanjskog magnetskog polja na mjerne objekte i uređaje, promjena temperature u okolini i td. Slučajne pogreške nastaju zbog vrlo mnogo uzroka istovremeno, a svaki od tih uzroka izaziva malu pogrešku slučajnog iznosa i predznaka i čini mjerni rezultat nesigurnim, odnosno netočnim. Boljom izolacijom od okoline i savršenijim uređajem mogu se smanjivati slučajne pogreške do granica tehnoloških mogućnosti. Bez obzira na to radimo li sa manje ili više savršenim uređajem i njegovom okolinom, moramo razmatrati slučajne pogreške koje su preostale. One se unutar jednog mjernog ciklusa razlikuju po smjeru i iznosu. Ponavljanjem mjerenja one se mogu matematički obraditi i odrediti tražene granice unutar kojih se najvjerojatnije nalazi prava vrijednost fizikalne veličine koji tražimo.

Prema metodi najmanjih kvadrata (Gauss, 1795.g.) **najvjerojatnija vrijednost mjerene veličine je aritmetička sredina** pojedinačnih mjernih rezultata, a dobiva se prema izrazu:

$$X_{mj} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n X_i$$

Sistematske ili sustavne pogreške nastaju zbog nesavršenosti mjerila, mjera, mjernog postupka, mjernog objekta, utjecaja okoline i samog utjecaja ispitivača. Ove pogreške uvijek imaju isti iznos i isti predznak, tako da ih je analizom mjernog procesa moguće ustanoviti i ispraviti. Ako mjerna vrijednost nije ispravljena (korigirana) mjerni rezultat je *neispravan*, odnosno ima sistematsku pogrešku. Osim poznatih sistemskih pogrešaka, koje se mogu otkloniti korekcijom, postoje još i nepoznate sistemske pogreške. Njih ne možemo obuhvatiti korekcijom, pa stoga dolazi do povećanja mjerne nesigurnosti.

Mjerni postupak je precizniji ako je rasipanje mjernih vrijednosti mala. **Mjerna nepouzdanost mjernog postupka** stoga služi za međusobnu usporedbu raznih mjernih uređaja i postupaka. Ona se izražava pomoću jednostruke ili višestruke vrijednosti *standardne devijacije* s , koja je dana izrazom:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_{mj})^2}{n-1}}$$

Postotna standardna devijacija pojedinog mjerenja ili mjerne vrijednosti:

$$Sx\% = \frac{s_x}{X} \cdot 100\%$$

Standardne devijacije funkcija:

Standardna devijacija zbroja i postotne standardne devijacije više mjerenja ili mjernih vrijednosti (npr. serijski spoj otpornika):

$$S_x = \sqrt{s_1^2 + s_2^2 + \dots + s_n^2} \quad ; \quad S_{x\%} = \frac{\sqrt{X_1^2 s_{1\%}^2 + X_2^2 s_{2\%}^2 + \dots + X_n^2 s_{n\%}^2}}{X_1 + X_2 + \dots + X_n}$$

Standardna devijacija razlike i postotne standardne devijacije više mjerenja ili mjernih vrijednosti:

$$S_x = \sqrt{s_1^2 + s_2^2 + \dots + s_n^2} \quad ; \quad S_{x\%} = \frac{\sqrt{X_1^2 s_{1\%}^2 + X_2^2 s_{2\%}^2 + \dots + X_n^2 s_{n\%}^2}}{X_1 - X_2 - \dots - X_n}$$

Standardna devijacija produkta i postotne standardne devijacije (npr. pri određivanju snage $P = U \cdot I$):

$$S_x = \sqrt{X_2^2 s_1^2 + X_1^2 s_2^2} ; \quad S_{x\%} = \sqrt{s_{1\%}^2 + s_{2\%}^2}$$

Standardna devijacija kvocijenta i postotne standardne devijacije (npr. pri određivanju otpora $R = U/I$):

$$S_x = \sqrt{\frac{s_1^2}{X_2^2} + \frac{X_1^2 s_2^2}{X_2^4}} ; \quad S_{x\%} = \sqrt{s_{1\%}^2 + s_{2\%}^2}$$

Izvod postotne standardne devijacije mjernih vrijednosti (npr. za paralelni spoj dvaju otpornika $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$):

$$S_{x\%} = \frac{\sqrt{X_1^2 s_{2\%}^2 + X_2^2 s_{1\%}^2}}{X_1 + X_2}$$

Ako izvodimo veći broj mjerenja, može se očekivati preciznije određivanje vrijednosti mjerene fizikalne veličine. **Mjera za nepouzdanost mjerenja** je dobivena standardnom devijacijom i brojem izvedenih mjerenja, a još se naziva *standardno odstupanje aritmetičke sredine*, koja je dana izrazom:

$$M_n = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Relativna nepouzdanost dobiva se omjerom nepouzdanosti mjerenja i aritmetičke sredine mjernih rezultata:

$$R_M = \frac{M_n}{X_{mj}} \cdot 100\% ; \quad R_M = \frac{\Delta X}{X_{mj}} \cdot 100\%$$

Rezultati mjerenja iskazuju se u obliku:

$$X = (X_{mj} \pm M_n) ; \quad X = (X_{mj} \pm \Delta X)$$

gdje je ΔX **maksimalna apsolutna pogreška** – najveće odstupanje mjerenog rezultata od aritmetičke vrijednosti ($\Delta X = X_{mj} - X_{pmax}$).

Pri novim, nepoznatim rezultatima pokusa i neiskusanim mjernim postupcima, često je potrebno procijeniti standardnu devijaciju na osnovi malo pojedinačnih mjerenja. Tada se područje pouzdanosti određuje na osnovi **Studentove t-razdiobe**:

$$X_{mj} \pm \frac{t}{\sqrt{n}} s$$

Broj pojedinačnih mjerenja n	P = 68.3 %		P = 95 %		P = 99 %		P = 99.73 %	
	t	$t/\sqrt{n}$	t	$t/\sqrt{n}$	t	$t/\sqrt{n}$	t	$t/\sqrt{n}$
2	1.8	1.3	12.7	9.0	64	45	235	166
3	1.32	0.76	4.3	2.5	9.9	5.7	19.2	11.1
4	1.20	0.60	3.2	1.6	5.8	2.9	9.2	4.6
5	1.15	0.51	2.8	1.24	4.6	2.1	6.6	3.0
6	1.11	0.45	2.6	1.05	4.0	1.6	5.5	2.3
8	1.08	0.38	2.4	0.84	3.5	1.24	4.5	1.6
10	1.06	0.34	2.3	0.72	3.2	1.03	4.1	1.29
20	1.03	0.23	2.1	0.47	2.9	0.64	3.4	0.77
40	1.02	0.19	2.0	0.37	2.8	0.50	3.3	0.60
50	1.01	0.14	2.0	0.28	2.7	0.38	3.1	0.45
100	1.00	0.10	2.0	0.20	2.6	0.26	3.1	0.31
200	1.00	0.07	1.9	0.14	2.6	0.18	3.0	0.22
> 200	1.0	0	1.96	0	2.58	0	3.0	0

Tablica 1.2-1 Zaokružene vrijednosti faktora t i $t/\sqrt{n}$ za različite statičke sigurnosti P

Preciznost postupka mjerenja mjernih rezultata imaju male razlike, ali to nikako ne znači da su točni. Obrada rezultata kao sastavni dio svakog složenog mjerenja može se izvoditi mjernim uređajima te računalnim programima. Takva obrada rezultata još se naziva **statistička obrada rezultata** mjernih veličina. Pojedini mjerni uređaji i instrumenti imaju u sebi ugrađenu memoriju, u svrhu pamćenja većeg broja mjernih podataka, gdje on sam vrši statističku obradu i prikaz rezultata.

Granice pogriješka su najveća odstupanja od prave vrijednosti mjerene veličine. One mogu imati pozitivan i negativan predznak i ne smiju biti preskočene, bez obzira na mjernu nesigurnost koju mjerni rezultat može imati. Možemo ih podijeliti u tri skupine:

- sigurne granice pogriješke
- statističke granice pogriješke
- vjerojatne granice pogriješke

Sigurne granice pogriješka (skraćeno – granice pogriješka) su ugovorena ili garantirana maksimalna odstupanja od naznačene vrijednosti. Sigurne granice pogriješka omogućuju podjelu mjernih uređaja ili mjernih instrumenata na *ispravne* i *neispravne*.

Statističke granice pogriješka određene su uz vrlo malo vjerojatnu pretpostavku da će svi parametri biti izmjereni sa svojom graničnom pogriješkom i da se sve podudaraju po smjeru svog djelovanja (ili sve povećavaju rezultat ili sve umanjuju rezultat). Što je više parametara preko kojih određujemo iznos tražene veličine, to je izračunata sigurna granica pogriješka nerealnija i nevjerojatnija.

Fizičari često koriste **vjerojatne granice pogriješka**, odnosno vjerojatnu pogriješku, kao mjerilo točnosti nekog mjerenja, odnosno neke pojave. Ove granice se određuju tako da će u 50% slučajeva rezultat biti unutar tih granica, a u drugih 50% slučajeva izvan tih granica. Dakle jednako je vjerojatno da je rezultat unutar ili izvan postavljenih granica.

1.3 ANALIZA I PRIKAZIVANJE MJERNIH REZULTATA

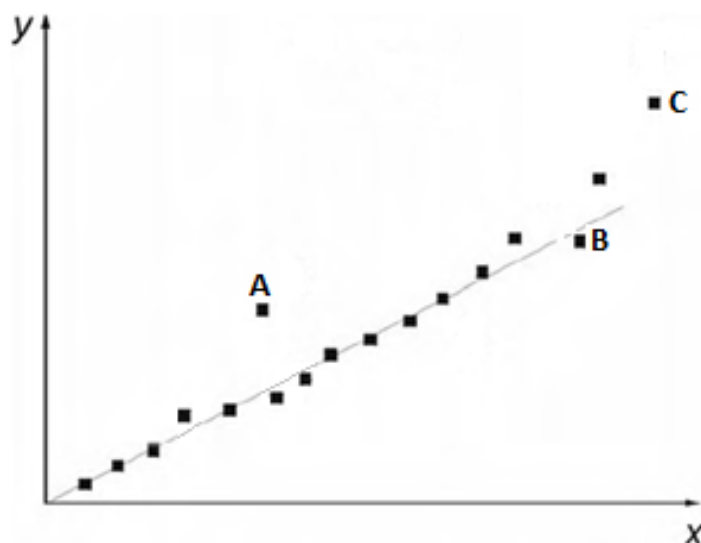
Kod pisanja izvješća, priprema, vježbi i iskazivanju proračuna kao i rezultata mjerenja, potrebno je voditi računa o nekim propisanim tj. uobičajenim pravilima. Time se dobiva da osobe koje čitaju ta izvješća imaju lakše razumijevanje mjernog postupka i provjeru dobivenih rezultata, a po potrebi i ponavljanje pokusa i vježbi. Uvodno treba navesti što se i zbog čega vrši mjerenje, opisati postupke mjerenja, nacrtati električne sheme, iskazati mjerene rezultate i dati na kraju zaključak. Mjerne rezultate potrebno je čitko napisati, a tekst tako složiti da bude pregledan i logički sljediv. Zbog mogućeg ponavljanja mjerenja potrebno je navesti popis svih korištenih instrumenata s njihovim tvorničkim podatcima, raspored mjerne opreme i mjernih objekata.

Iskazivanje mjernih rezultata mora imati mjernu nesigurnost (granice pogriješka), jer bez toga rezultat je nepotpun. Broj decimalnih mjesta ovisi o granicama pogriješka ili mjernoj nesigurnosti, ali u iskazanom mjernom rezultatu ne smije biti prevelik. Da bi se to postiglo predložene su tri razine iskazivanja mjernog rezultata:

- **V RAZINA** ili visoka razina, koristi se u znanstvenim redovima i dokumentima vrhunskog mjeriteljstva. Mjerni rezultati V razine moraju sadržavati sve podatke koji omogućuju upotrebu, provjeru i ponavljanje rezultata kao i njegove mjerne nesigurnosti.
- **S RAZINA** ili srednja razina, koristi se u stručnim radovima, izvještajima industrijskih laboratorijima. Mjerni rezultat treba sadržavati najbolju aproksimaciju mjerene veličine odnosno ispravljenu izmjerenu srednju vrijednost, standardnu mjernu nesigurnost. Prednost ovog skraćenog iskazivanja rezultata jest njena jednostavnost, a opet dovoljno informativna.

- **N RAZINA** ili niska razina, koristi se za svakodnevni rad i mjerenja. Mjerni rezultat iskazuje se brojem i mjernom jedinicom izmjerene vrijednosti, i to s toliko znamenki kako bi nesigurnost zaokruživanja bila što manja. Mjerni rezultat prikazan s velikim brojem znamenki vrlo je nepregledan i daje lažan dojam velike točnosti, dok se zaokruživanje na premalen broj znamenki gubi dio informacije o mjerenoj veličini.

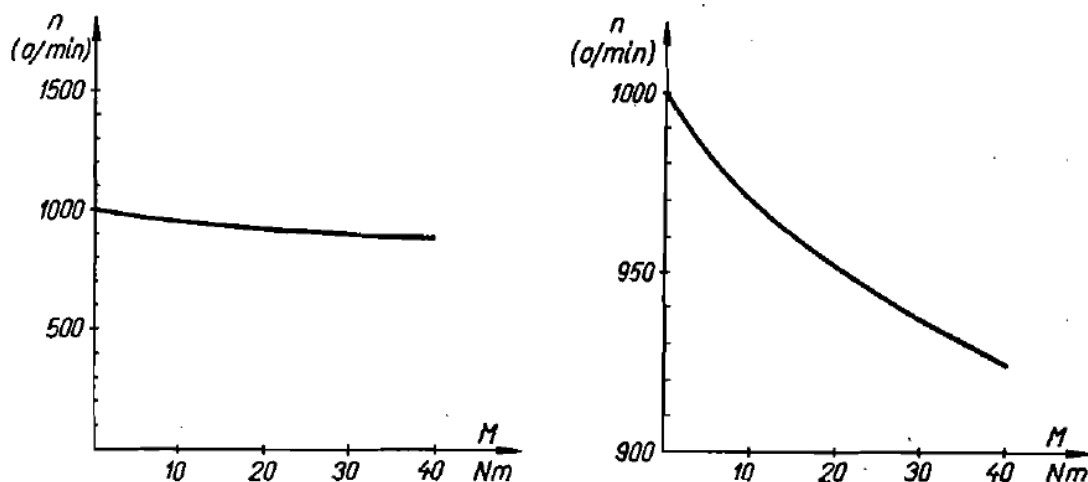
Vrlo važan način prikazivanja rezultata mjerenja je **grafičko prikazivanje**. Vrlo često se provode mjerenja mjernih veličina koje ovise o nekoj promjenjivoj veličini. Zbog veće preglednosti, izmjerene vrijednosti prikazujemo grafički gdje na grafu označavamo točke. Također pri prikazivanju rezultata vrlo je važan pravilan izbor mjerila na koordinatnim osima grafa, jer prevelikim mjerilom gubi se preglednost, a premalim se dobiva ne dovoljna točnost. **Mjerilo** odabiremo tako da imamo što veći raspon između najmanje i najveće mjerene vrijednosti, a skala mora biti takva da jediničnoj mjeri mjerene veličine odgovara višekratnik brojeva 1, 2 ili 5 milimetara na grafu.



Slika 1.3-1 Grafički prikaz rezultata mjerenja

Iz grafičkog prikaza ovih točaka možemo zaključiti u kakvom su odnosu veličine x i y . Također se mogu uočiti nekoliko karakterističnih područja, odnosno točaka:

- **područje linearnosti** od ishodišta do točke B gdje su veličine x i y proporcionalne
- **područje nelinearnost** od točke B do točke C upućuje na različite fizikalne pojave (npr. napon praga kod poluvodičke diode)
- **odstupanje** od pravca (točka B) kao posljedica grubih pogreške u mjerenju
- **rasipanje** točaka od zamišljenog pravca u linearnom dijelu kao posljedica slučajnih pogrešaka prilikom mjerenja



Slika 1.3-2 Neprikladno (lijevo) i prikladno (desno) prikazivanje rezultata mjerenja

1.4 MJERNI SUSTAVI I OPREMA

Mjerni sustav je dio uređaja ili instrumenta koji određuje njegovo načelo rada. **Mjerna oprema** su sredstva koje služe mjerenju. Takva sredstva mogu biti mjerila, mjerni izvori, mjerni pribor i pomoćna oprema.

M J E R N I S U S T A V	
INSTRUMENTI S OTVORENIM MJERNIM SUSTAVOM	INSTRUMENTI SA ZATVORENIM MJERNIM SUSTAVOM
- najjednostavniji mjerni sustavi bez povratne veze - rezultat mjerenja nema utjecaja na ulaznu veličinu instrumenta - proračun pogreške mjerenja - instrumenti s jednodimenzionalnim i dvodimenzionalnim prikazom mjerne veličine	- složeniji mjerni sustav sa povratnom vezom - usporedba nepoznate fizikalne veličine s poznatom, referentnom veličinom - mjerna veličina ovisi o veličini na prikazu instrumenta

Tablica 1.4-1 Osnovna podjela mjernih sustava instrumenata

Mjerni sustavi s više instrumenata povezan i upravljani računalom služi za:

- za ispitivanje složenog sklopovlja (integriranih krugova, tiskanih pločica, električkih i neelektričnih uređaja i naprava, sustava itd.)
- višestruka primjenljivost instrumenata (ako mjerenja ne moraju biti istodobna)
- matrica sklopki (muplekser/demuplekser) – upravljana računalom omogućuje višestruku iskoristivost instrumenata
- instrumenti i računalno povezani su nekom standardnom (normom propisanom) sabirnicom

Mjerni sustav može biti povezan i sa više računala odjednom. Razlog tomu je brzina mjerenja, veliki broj ulaznih podataka (mjernih mjesta odnosno instrumenata), složena obrada različitih podataka, te velika udaljenost među mjernim mjestima.

M J E R I L A			
MJERNI UREĐAJI I INSTRUMENTI	MJERNI SKLOPOVI	MJERKA	AUTOMATIZIRANA MJERILA
- zapisni - pokazni - integracijski - mosni - kompensacijski	- mjerni transformatori - mjerni pretvornici - mjerna pojačala - mjerna djelila, integratori	Standardizirana vrijednost neke veličine (npr. uteg mase 1 kg)	Služi za obradu i pohranjivanje velikog broja podataka pomoću mikroračunala

Tablica 1.4-2 Prikaz vrste mjerila

M J E R N I I Z V O R I		
ISTOSMJERNI IZVORI	IZMJENIČNI IZVORI	ELEKTRONIČKI IZVORI
- kemijski izvori - sunčani izvori - termočlanak - poluvodički ispravljači	- električna mreža - izmjenični generatori	- generator funkcije - signalni generatori - generatori impulsa - sinusni oscilatori - kalibratori - etaloni frekvencije i vremena

Tablica 1.4-3 Prikaz vrste mjernih izvora

Laboratorijski mjerni pribor i pomoćna oprema su svi dijelovi strujnog kruga koji služe kao pomoć pri izvršavanju mjerenja, a sastoje se od:

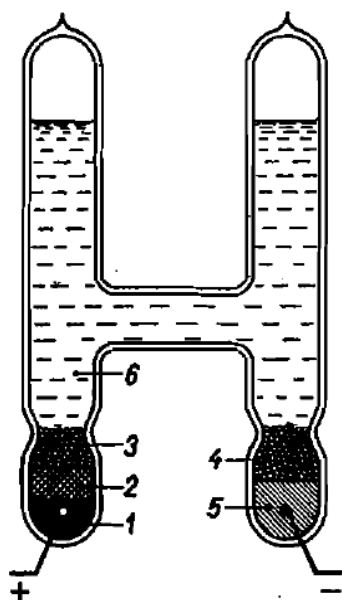
- kliznih (regulacijskih) otpornika
- paralelnih otpornika ili shuntovi – služe za proširivanje strujnog mjernog opsega, a izvode se posredno (preko spojnih vodiča) i neposredno na stezaljke instrumenta (ampermetra)
- otporničkih i kondenzatorskih dekada
- regulacijski transformatori
- sklopki i preklopki – prekidaju ili mijenjaju strujni krug
- spojnih vodiča (npr. izolirane bakrene žice)

1.5 LABORATORIJSKI ELEMENTI

U **laboratorijske elemente** mogu se svrstati svi izvori, etaloni električnih veličina, potencimetri itd. **Laboratorijski izvori** su uređaji koji daju određene vrijednosti napona i struje, a prema valnom obliku kojeg daju na svom izlazu mogu se podijeliti na **istosmjerne** i **izmjenične**. **Laboratorijski izvori struje** koriste se pri mjerenju i ispitivanju, bilo za napajanje mjernog kruga, bilo za dobivanje pomoćnih napona potrebnih u raznim mjernim instrumentima, uređajima i sklopovima. Zbog toga imamo zahtjeve za razne vrijednosti napona, frekvencije, snage i valnog oblika. **Laboratorijski izvori napona** imaju napon koji je točno poznat i ne mijenja se s vremenom. Takvi izvori još se nazivaju **etaloni napona**. Kao etaloni napona upotrebljavali su se kemijski izvor vrlo stabilnog napona, Westonov etalonski članak, dok se danas koristi elektronički etalon sa Zener diodom.

Istosmjerni laboratorijski izvori	Izmjenični laboratorijski izvori
• Westonov etalonski članak • Poluvodički etalon napona – etalon napona sa Zenerovom diodom • Primarni i sekundarni galvanski članci • Pretvarači istosmjernog napona • Poluvodički ispravljači • Istosmjerni generatori • Elektronički istosmjerni izvori	• Električna mreža • Izmjenični generatori • Sinusni oscilatori • Sintetizatori frekvencije • Generatori funkcija • Signalni generatori • Generatori impulsa • Generatori promjenjive frekvencije • Etaloni frekvencije i vremena • Kalibratori izmjeničnih napona

Tablica 1.5-1 Popis laboratorijskih izvora



Westonov etalonski članak je kemijski izvor vrlo stabilnog napona iznosa 1.01865 V pri temperaturi od 20 °C. Sastoji se od pozitivne elektrode izrađene od čiste žive iznad koje se nalazi sloj živina sulfata, dok se negativna elektroda sastoji od kadmijeva amalgama prekrivenog slojem kristala kadmijevog sulfata. Zasićena otopina kadmijeva sulfata u destiliranoj vodi spaja obje elektrode. Ako se temperatura etalonskog članka najprije povisi, a onda smanji na početnu vrijednost, neće se dobiti isti napon kao na početku. Razlog tomu su čestice koje elektrode apsorbiraju iz pregrada smještenih iznad elektroda.

Slika 1.5-1 Westonov etalonski članak

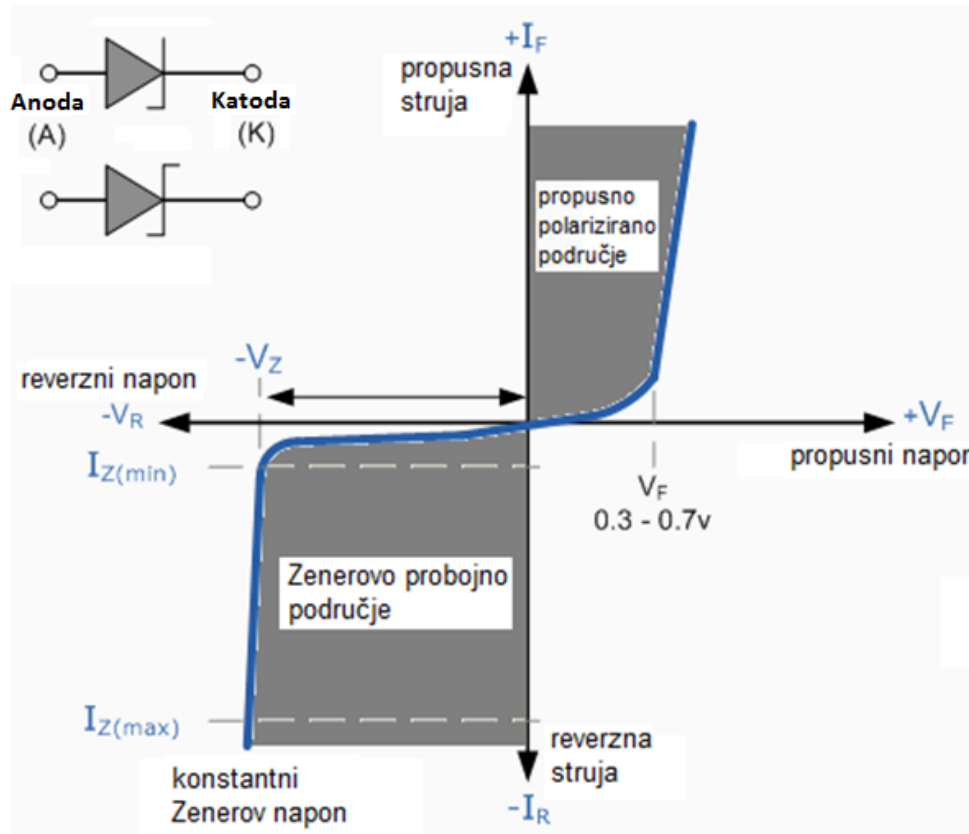
1 – pozitivna elektroda žive, 2 – depolarizacijska pasta s kristalima živina sulfata, 3 i 4 – sloj kristala kadmijeva sulfata, 5 – negativna elektroda od kadmijeva amalgama, 6 – zasićena otopina kadmijeva sulfata

Unutarnji otpor Westonova etalonskog članka može iznositi od 300 do 1 k Ω , dok se kod opterećenja strujom od 1 nA dobiva pad napona od 0.3 do 1 μ V. Njegov glavni nedostatak je u opterećenju sa većim strujama, gdje je nakon korištenja potrebno dugo čekati smanjenje razlike u naponu. Korištenje Westonova članka u uvjetima gdje je temperatura manja od 4 °C ili veće od 40 °C može izazvati njegovo stalno oštećenje.

Temp. °C	Napon V	Temp. °C	Napon V	Temp. °C	Napon V
10	1.018951	16	1.018797	21	1.018608
12	1.018909	17	1.018763	22	1.018565
13	1.018884	18	1.018727	23	1.018520
14	1.018857	19	1.018690	24	1.018473
15	1.018828	20	1.018650	25	1.018424

Tablica 1.5-2 Napon Westonova etalonskog članka ovisnog o temperaturi

Etaloni napona sa Zenerovim diodama ima široku primjenu na svim radnim temperaturama, a time su zamijenili Westonov etalonski članak. Zenerova dioda je poluvodička dioda koja se propusnom području rada ponaša kao dioda, a u zapornom (reverznom) području rada koristi područje proboja. Probojni napon Zenerove diode nazivamo Zenerovim naponom (U_Z ili V_Z). Primjenjuje se kao stabilizator napona gdje u zapornom području rada zadržava stalnu vrijednost napona, u određenim granicama vrijednosti struje. Stabilnost napona malo ovisi o temperaturi, gdje se ona još dodatno smanjuje u odgovarajućim kompenzacijskih spojevima. Time se postiže vrlo mala promjena izlaznog napona u ovisnosti o temperaturi iznosa znatno manjeg nego kod Westonova etalonskog članka.



Slika 1.5-2 Simbol Zenerove diode i strujno-naponska karakteristika rada

Primarni (suhi) galvanski članci ili baterije koriste se kao izvor napajanja u prenosivim mjernim instrumentima. Njihovo korištenje završava kada se istroše jer ne sadrže tekući elektrolit, što bi značilo ponovno punjenje (nabijanje). Njihov unutarnji otpor je relativno visok iznosa od 0.3 Ω do 20 Ω i raste tijekom njihovog pražnjenja, pa stoga napon na bateriji opada porastom i trajanjem struje opterećenja.

Sekundarni (tekući) galvanski članci ili akumulatori odnosno akumulatorske baterije, primjenjuju se u prenosivim mjernim instrumentima i uređajima, te kao dodatni izvor napajanja. Sadrže tekući elektrolit koji im omogućuje ponovno punjenje. Pri preciznim mjerenjima koriste se akumulatori stalnog napona i vrlo malog unutarnjeg otpora. Sekundarni galvanski članci izrađuju se od olova, čelika (željezo-nikal), kadmija (kadmij-nikal) ili srebra (srebro-cink), u paralelnim (naponi od nekoliko stotina volti) ili serijskim spojevima (struje do nekoliko stotina ampera).

Dimenzije galvanskih članaka mjerodavne su za ukupnu *energiju* koju one mogu dati. Energija galvanskog članka mjeri se u vatsatima (Wh), a gustoća energije u Wh/kg. *Kapacitet* galvanskog članka iskazuje se u *ampersatima* (Ah) koje ona može dati prije nego napon na njezinim stezaljkama padne ispod nekog graničnog iznosa. Međutim, to ne znači da galvanski članak kapaciteta 1 Ah može davati struju 1 A tijekom jednog sata, već kapacitet ovisi o struji opterećenja. Za sve vrste galvanskih članaka daju se podatci o vremenu uskladištenja (*shelf life*). Taj podatak određuje vrijeme potrebno da se napon nekorištenog galvanskog članka smanji na izvjesni postotak početnog iznosa (obično 90%). Vrijeme uskladištenja vrlo je ovisno o temperaturi. Što je temperatura viša, gubitak kapaciteta je veći i tijekom jedne godine, ovisno o vrsti galvanskog članka, može biti i više desetaka posto. Galvanski članak se smatra naponskim izvorom. Međutim, stvarni galvanski članak nema značajke idealnog naponskog izvora, jer posjeduje, iako mali, unutarnji otpor. Unutarnji otpor mijenja se u širokim granicama, ovisno o uvjetima upotrebe i starosti samog galvanskog članka.

Naziv galvanskog članka	Vrsta	Anoda	Katoda	Elektrolit	Nazivni napon članka (V)	Gustoća energije (Wh/kg)
Cink – zrak	Primarni	Zn	O ₂ (zrak)	KOH (kadmij hidroksid)	1.1	310
Litij – sumporni dioksid	Primarni	Li	SO ₂	KOH	3.0	275
Litij – manganov dioksid	Primarni	Li	MnO ₂	KOH	3.0	175
Živini	Primarni	Zn	HgO	KOH	1.2	110
Srebrni oksid	Primarni	Zn	Ag ₂ O	KOH	1.5	130
Alkalinski	Primarni	Zn	MnO ₂	KOH	1.5	130
Olovni	Sekundarni	Pb	PbO ₂	H ₂ SO ₄	2.0	50
Nikal – kadmij	Sekundarni	Cd	Ni (OH) ₂	KOH	1.2	50
Nikal – manganin	Sekundarni	H (MH)	Ni (OH) ₂	KOH	1.2	70
Litij ionski	Sekundarni	Li	Li _x CoO ₂	LiPF ₆	3.8	130

Tablica 1.5-3 Pregled galvanskih članaka

Pretvarači istosmjernog napona se koriste u prijenosnim uređajima za postizanje viših istosmjernih napona, umjesto serijskog spoja većeg broja članaka. Pomoću mehaničkog ili električkog prekidača prekida se istosmjerni napon, kako bi se proizveo pulsirajući napon koji se transformira na odgovarajući viši iznos, a zatim se prema potrebi ispravlja i izgladuje.

Poluvodički ispravljači ispravljaaju izmjenični napon dobiven iz električne mreže na oblik istosmjernog napona. Valovitost izmjeničnog napona otklanja se dodavanjem odgovarajućih filtera, kombinacijom kondenzatora i svitka ili kondenzatora i otpornika. Zbog promjena napona izmjenične električne mreže ($\pm 10\%$ od nazivne vrijednosti), tako dobivene istosmjerne napone potrebno je stabilizirati. Stabiliziranje se provodi raznim sklopovima i elementima s nelinearnim karakteristikama, npr., stabilizator sa Zenerovim diodama.

Također za dobivanje istosmjernog napona koriste se **istosmjerni generatori** gdje su potrebne veće snage pri ispitivanju i mjerenju. Za pogon generatora koristi se sinkroni ili asinkroni motor priključen na električnu mrežu.

Elektronički istosmjerni izvori izvode se najčešće kao elektronički regulacijski strujni i naponski izvori ili kao kalibratori. Koriste se za postizanje istosmjernih struja i napona u svrhu napajanja različitih mjernih krugova ili elektroničkih sklopova. **Kalibratori** su izvori vrlo točno poznatog napona koji služe za precizna mjerenja, umjeravanja i ugađanja (kalibriranja) mjernih instrumenata i uređaja. Izrađuju se kao naponski i strujni izvori raznih izlaznih snaga do oko 500 W, za napone od nekoliko volta do nekoliko kilovolta i struje od nekoliko miliampera do više desetaka ampera.

Za laboratorijska ispitivanja i mjerenja često se koristi **električna mreža** nazivnog napona 230 / 400 V (fazni / linijski napon) i nazivne frekvencije 50 Hz. Dopuštene promjene napona mreže iznose $\pm 10\%$, dok promjena frekvencije $\pm 0.5\%$. Instrumenti se napajaju izravno iz mreže, a mjerni krugovi izravno ili preko zakretnih transformatora i regulacijskih (kliznih) otpornika.

Izmjenični generatori struje koriste se pri mjerenju gdje je potrebna snaga veća od otprilike 1kVA, te frekvencije od nekoliko tisuća herca. Za pogon generatora koriste se sinkroni, asinkroni ili istosmjerni motor.

Elektronički izvori izmjeničnog napon i struje mogu se podijeliti prema izvedbi:

- Sinusni oscilatori
- Sintetizatori frekvencije
- Generatori funkcija
- Signalni generatori
- Generatori impulsa
- Generatori promjenjive frekvencije
- Etaloni frekvencije i vremena
- Kalibratori izmjeničnih napona

Za generiranje sinusnih napona frekvencije od nekoliko herca do nekoliko desetina gigaherca koriste se **sinusni oscilatori**. Pojedini oscilatori pokrivaju samo jedan dio tog frekvencijskog područja, dok se najčešće primjenjuje RC-oscilatori. **RC-oscilatori** su oscilatori kod kojih je pozitivna povratna veza ostvarena pomoću više RC mreža. Oscilatori s RC mrežom još se nazivaju oscilatori s faznim pomakom. RC oscilatori na svom izlazu daju sinusni napon u području frekvencija do 200 kHz.

Sintetizatori frekvencije su izvori frekvencije ili generatori signala koji iz jednog ili više izlaza daju veliki broj stabilnih izlaznih frekvencija, koje se mogu točno namještati.

Generatori funkcija su oscilatori odnosno izvori signala različitih valnih oblika (sinusni, trokutasti pilasti i pravokutni) u frekvencijskom opsegu od 0.05 mHz do više od 10 MHz. Primjenjuju se za različita mjerenja i ispitivanja elektroničkih uređaja i opreme. Namještanje (ugađanje) frekvencije i izlaznog napona provodi se slično kao i kod sinusnih oscilatora.

Sinusni oscilatori s mogućnošću amplitudne, frekvencijske, fazne i impulsne modulacije nazivaju se **signalni oscilatori**. Modulacija je postupak u kojem se mijenja neki od parametara (amplituda, frekvencija, faza) prijenosnog signala pod utjecajem analognog ili digitalnog modulacijskog signala koji predstavlja informaciju. Signalni oscilatori obično pokrivaju jedan dio frekvencijskog područja od 10 kHz do 40 GHz.

Generatori impulsa proizvode naponske impulse različitih iznosa, predznaka i trajanja, koji se mogu ponavljati s frekvencijom od oko 0.1 Hz do preko 200 MHz, dok je trajanje impulsa u granicama od 2 ns do nekoliko sekundi. Pojedini generatori imaju mogućnost promjene vremena porasta, odnosno pada napona. Koriste se za ispitivanje impulsnih i digitalnih sklopova.

Generatori promjenjive frekvencije imaju jednoliku promjenu frekvencije izlaznog napona unutar određenog frekvencijskog područja. Promjena frekvencije je sinkronizirana s otklonskim snopom katodne cijevi, tako da se na njenom zaslonu dobiva frekvencijska karakteristika mjerenog sklopa.

Oscilatori sa točno poznatom i vremenski stalnom frekvencijom nazivamo **etaloni frekvencije i vremena**. Takav primarni etalon je cezijev etalon frekvencije u kojem se frekvencija kvarcnog oscilatora kontrolira pomoću cezijeva rezonatora, gdje je frekvencija serijski izrađenih cezijevih rezonatora iznosa 9 192 631 770 Hz i ostaje nepromijenjena za vrijeme života rezonatora. Kao etaloni frekvencije upotrebljavaju se i kvarcni oscilatori, kojima je u rezonantnom krugu kvarcni kristal. Kvarcni kristal je podložan starenju, pa se njegova frekvencija mijenja s vremenom. Oni se koriste kod digitalnih pokazivača vremena sa relativnom pogreškom mjerenja vremena u iznosu od 30s u periodu jedne godine.

Kalibratori izmjeničnog napona su oscilatori koji na izlazu daju napon vrlo točno poznate vrijednosti, te služe za umjeravanje (baždarenje) preciznih instrumenata. U frekvencijskom području od 50 Hz do 20 kHz, postižu visoku točnost namještanja ($\pm 0.02\%$), dok je raspon efektivnih vrijednosti napona od nekoliko milivolta do približno 1kV.

U laboratorijima se također često koriste etaloni otpora ali i razni mjerni otpornici. Neki od tih otpornika moraju imati strogo poznati iznos otpora, dok neki služe za ograničenje struje ili regulaciju jakosti električne struje. **Etaloni otpora** moraju imati strogo poznati iznos otpora, a njegov otpor ne smije se mijenjati s temperaturom, ali ni sa vremenom korištenja tog otpornika. Isto tako njihov iznos se ne smije mijenjati zbog uobičajenog potresanja, laganih udaraca i sl. što se događa kod njihovog korištenja i premještanja. Materijali od kojih se izrađuju ovakvi otpornici moraju imati relativno veliki specifični otpor.

Zahtjevi za izradu mjernih otpornika su:

- veliki specifični otpor - ρ
- neznatni temperaturni koeficijent otpora - α_ρ
- mali kontaktni napon prema bakru – E_k
- velika vremenska postojanost – nepromjenjivost svojstava kroz dugi niz godina
- velika otpornost na udarce i vibracije
- otpornost na koroziju i zapaljivost

Materijal	Specifična masa (g/cm ³)	Maximalna temperatura (°C)	Specifični. el. otpor ρ ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)	Temperaturni koef. otpora α_ρ (1/K)	Kontaktni napon E_k prema bakru (V/K)
Manganin	8,4	60 (300)	0,43	0,000 01	1
Nikelin	8,8	500	0,40 – 0,44	0,000 2	
Konstantan	8,9	500	0,49	-0,000 03	-40
Novokonstantan		400	0,45	$\pm 0,000 002$	-0,3
Izaom		400	1,26 – 1,38	0,000 01	0,5
Izabelin		400	0,5	-0,000 02	-0,2
Karma		200	1,33	0,000 02	20
Kanthal A	7,1	1250	1,44	0,000 015	
Ravnal 1	7,2	1100	1,37	0,000 046	

Tablica 1.5-4 Pregled materijala za etalona otpora / mjernih otpornika

Materijal koji zadovoljava sve spomenute zahtjeve je **manganin**, a etaloni čiji je otpor manji od 0.1 Ω izrađuju se od manganinskog lima, odnosno od manganinske žice. Manganin je u upotrebi već više od 150 godina dok se ostali materijali koriste svega desetak godina.

Za **etalone malih otpora** koriste se izvedbe sa vodljivim trakama, a za veće otpore žice različitih presjeka. Isto tako kod malih iznosa otpora nekog otpornika moramo ga napraviti u takvoj izvedbi da se smanji utjecaj otpora kontakata na rezultat mjerenja.

Mjerni otpornici prema izradi mogu se podijeliti na:

- žičani otpornici
- slojni otpornici
- otporničke dekade
- klizni (promjenjivi) ili regulacijski otpornici

Žičani otpornik sa slike 1.5-3 može imati tijelo izrađeno od raznih materijala (keramika, tinjac, tvrdi papir), a na sebi ima namote otporne legure koja ima neku vrijednost induktiviteta, kao i kapacitet zbog dovoljne blizine susjednih zavoja.

Nadomjesna shema ovakav otpornik prikazana je slikom 1.5-4. Prolaskom istosmjerne struje imamo djelovanje samo otpora, dok kod izmjenične struje na višim frekvencijama imamo utjecaj induktiviteta i kapaciteta. Induktivitet se izračunava prema izrazu:

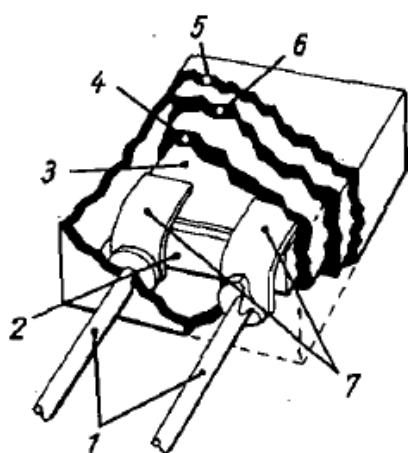
$$L = \frac{N \cdot \Phi_{sr}}{I} = \frac{N^2}{R_{mag}}$$

gdje je magnetski otpor dan izrazom:

$$R_{mag} = \frac{l_{sr}}{\mu \cdot S_{\emptyset}}$$

Žičani otpornici izrađeni od *konstantana* (legura bakra i nikla) imaju toleranciju 5% ili 10%, a koriste se za veće snage. Vrlo precizni žičani otpornici izrađeni od *manganina* (legura bakra-manganina-nikla) imaju toleranciju 0.01% ili 1%, za manje snaga do 2W u mjernoj i regulacijskoj tehnici.

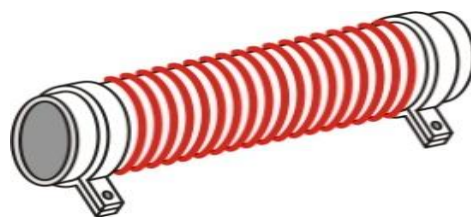
Slojni otpornici mogu imati tijelo izrađeno od raznih materijala (stakla, keramike ili porculana), a na samo tijelo se nanosi tanki slojevi ugljika, metala ili metalnih oksida. Ovakvi otpornici imaju veliku stabilnost i malu vremensku konstantu, pa se stoga koriste kod VF uređaja. Neka svojstva slojnih otpornika su: mali naponski i (negativni) temperaturni koeficijent, veliki vlastiti šum, te lako može doći do mehaničkih oštećenja samih otpornika. Pomoću slojnih otpornika moguće je ostvariti otpore od 1Ω do 100 MΩ, dok je nazivna snaga od 0.05 W do 100 W. Primjer jednog takvog otpornika je



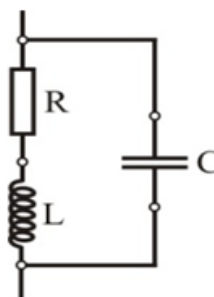
Vishay – otpornik koji ima vrlo mali temperaturni koeficijent i odličnu vremensku postojanost otpora. Takav otpornik ima na staklenu podlogu nanesen kompaktni metalni sloj, gdje se jetkanjem dobiva mreža serijskih i paralelnih strujnih staza, a koja služi za ugađanje otpornika na točan iznos otpora.

Slika 1.5-5 Vishay – otpornik s kompaktnim metalnim slojem
1 – priključnice, 2 – staklena podloga, 3 – jetkani kompaktni metalni sloj, 4 – zaštitni silikonski omotač od udaraca, 5 – epoksidan kutija, 6 – epoksidni sloj za zaštitu od vlage, 7. fleksibilne spojne trake

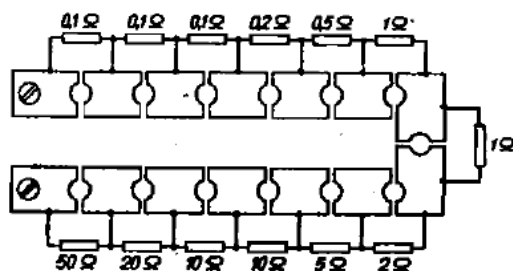
U laboratorijskim mjerenjima mogu se upotrebljavati **otporničke dekade** izvedene kao niz preciznih otpornika smještenih u zajedničku kutiju. Mogu se izvoditi kao skupina otpornika s čepovima ili s preklopkama. **Otpornici s čepovima** izvode se spajanjem otpornika na valjkaste čepove, gdje se može pomoću većeg broja otpornika dobiti potrebne vrijednosti otpora od 0.1 Ω do 100 Ω, u koracima po 0.1 Ω kao na slici 1.5-6. Nedostatak ovakve izvedbe je nezgodno rukovanje sa otpornicima i njihovim brojem, stoga se danas više koriste izvedbe s preklopkama. **Slogovi otpornika s preklopkama** sastoje se od jedne ili više dekada otpora kao na slici 1.5-7.



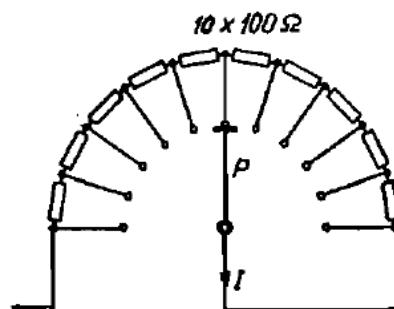
Slika 1.5-3 Žičani otpornik



Slika 1.5-4 Nadomjesna shema otpornika



Slika 1.5-6 Skupina otpornika s čepovima



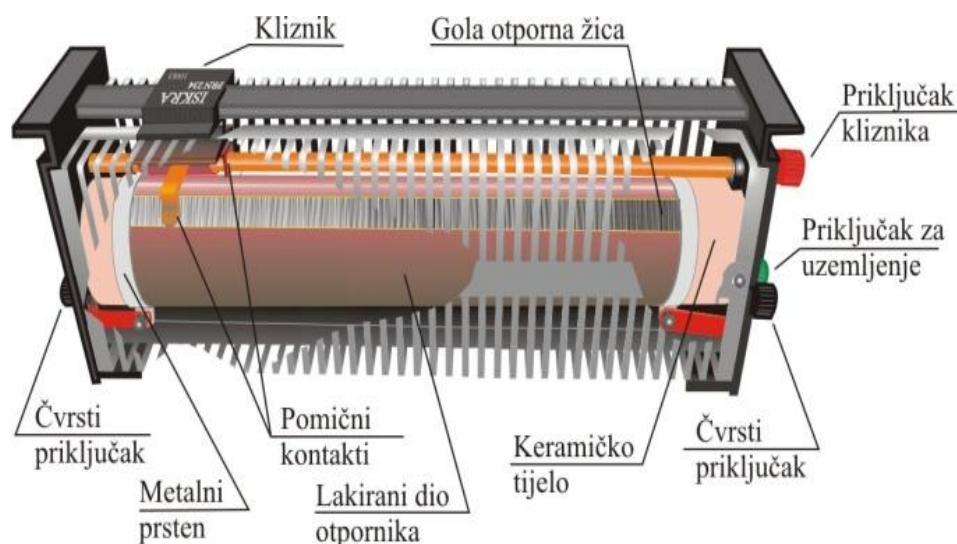
Slika 1.5-7 Otpornici s preklopkama

Okretanjem preklopke P mogu se postići svi otpori od 100 Ω do 1000 Ω, u koracima po 100 Ω. Mogu se ugraditi i do šest takvih serijski spojenih dekada u jedno zajedničko kućište, a vrijednost otpornika svake iduće dekade deset je puta manja od prethodne. Stoga su izvedbe otpornika s preklopkama prikladnije za rad od otpornika s čepovima. Utjecaj kontaktnog otpora može se zanemariti ako se otporničke dekade pravilno koriste, gdje on iznosi 50 μΩ kod kontakta s čepovima, a kod najboljih preklopki otprilike 0.2 mΩ.

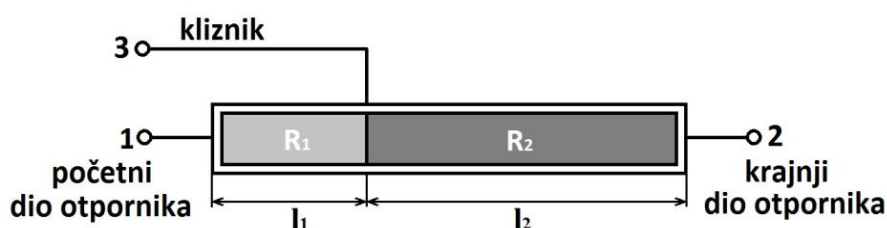
Uz otpornike konstantnog iznosa otpora (žičani, slojni i dekade) u laboratorijima se za mjerenja vrlo često koriste otpornici promjenljivog iznosa otpora. Takvi otpornici još se nazivaju klizni (promjenjivi) ili **regulacijski otpornici**, koji služe samo za promjenu otpora u strujnom krugu – tj. za regulaciju struje. Često ih se koristi u tzv. potenciometerskom spoju kad se pomoću njih regulira napon.

No *potenciometrima* nazivamo konstrukcije koje se od ove razlikuje po tome što je otporna žica namotana na izolacijsku traku, a koja je savinuta u krug. Regulacijski otpornik pomoću kliznika dijeli svoj ukupni otpor (R_r) na dva dijela, gdje je omjer tih otpora razmjeran omjeru udaljenosti kliznika od krajeva otpora:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{l_1}{l_2} \quad ; \quad R_r = R_1 + R_2$$

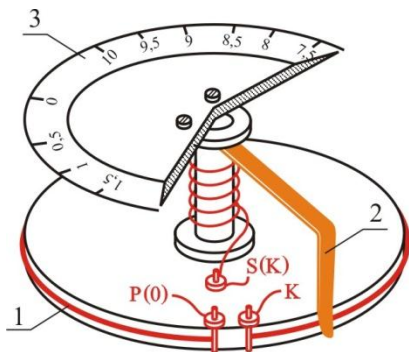


Slika 1.5-8 Dijelovi regulacijskog (kliznog) otpornika



Slika 1.5-9 Regulacijski otpornik

Ako takav otpornik smjestimo u valjkasto kućište, a umjesto pravocrtnog pomicanja kliznika imamo putanju po luku zakretanjem odgovarajuće ručice, dobit ćemo manji utjecaj parazitnog induktiviteta.



Slika 1.5-10 Unutarnja građa kružnog kliznog otpornika Slika 1.5-11 Kućište kružnog kliznog otpornika
1 – otporna žica, 2 – kliznik, 3 – skala

Za posebne namjene izrađuju se klizni otpornici s logaritamskom, sinusnom ili nekom drugom izlaznom funkcijom, s jednim ili više izvoda itd. Kakvoća, preciznost i područje primjene žičanih kliznih otpornika ovisit će o ukupnom otporu, apsolutnom minimalnom otporu, temperaturnom koeficijentu otpora, razlučivosti, snazi, linearnosti, itd. Neke značajke takvih otpornika su:

- **Ukupni ili nazivni otpor** je istosmjerni otpor između krajnjih stezaljki kliznog otpornika, kada je kliznik u jednom od krajnjih položaja. Taj otpor može biti od nekoliko oma do nekoliko megaoma. Tolerancije nazivnog otpora otpornika manjih snaga iznose 3 %, 5 % i 10 %, a većih 10 % i 20 %.
- **Apsolutni minimalni otpor** je najmanji otpor između kliznika i jednog kraja otpornika i ponajviše ovisi o konstrukcijskom ograničenju ili prijelaznom otporu kliznog kontakta. Obično se navodi se najveća vrijednost tog otpora, npr. $0,5 \Omega$ ili 1 % od ukupnog otpora.
- **Temperaturni koeficijent otpora** pokazuje najveću promjenu ukupnog otpora prouzročenu promjenom temperature okoliša. Temperaturni koeficijent materijala koji se koristi za izradu otporne žice reda je veličine $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$, no zbog utjecaja temperature na protezanje supstrata oko kojega je žica namotana temperaturni koeficijent otpora kliznog otpornika i do pet je puta veći, tj. iznosi oko $5 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$. Do promjene otpora može doći i uslijed samozagrijavanja otporne žice strujom koja kroza nju prolazi.
- **Razlučivanje** je najmanja promjena izlaznog napona ili otpora s pomakom kliznika. Raspon razlučivanja može biti od 0,01 % do 1 % od ukupnog otpora.
- **Nazivna snaga** kliznog otpornika je određena najvećom toplinom koja može biti disipirana (izgubljena) u određenim uvjetima. Nazivne snage malih žičanih kliznih otpornika su u opsegu od 2 W do 20 W.
- **Linearnost** kliznog otpornika opisuje dozvoljeno odstupanje stvarnog otpora na poziciji kliznika od linearne krivulje (pravca) ovisnosti otpora o pomaku kliznika. Linearnost se iskazuje u najvećem dozvoljenom relativnom odstupanju izlaznog napona u odnosu na ulazni napon, a kreće se u rasponu od 0,05 % do 1 %.

Slično kao i kod mjernih otpornika tako i kod **mjernih kondenzatora** tražimo da je njihov kapacitet točno poznat, da se vremenom ne mijenja, da ne ovisi o temperaturi, kao i o iznosu priključenog naponu i njegovoj frekvenciji. Također je poželjno da kondenzatori imaju vrlo veliki izolacijski otpor između elektroda, male gubitke u dielektriku, te neznatni vlastiti induktivitet. Fazni pomak između napona i struje je u idealnom slučaju točno 90° , gdje struja prethodi naponu. Realni mjerni kondenzatori imaju različit pomak od 90° , gdje struja kondenzatora stvara magnetsko polje oko elektroda i u samom kondenzatoru, pa svaki kondenzator ima malu vrijednost induktiviteta L . Vrijednost induktiviteta L na nižim frekvencijama može se zanemariti, stoga najčešće kondenzatore prikazujemo pojednostavljenom nadomjesnom shemom, sa serijskim ili sa paralelnim spojem

odgovarajućih kapaciteta i omskih otpora prema slici 1.5-12. Takav kapacitet i otpor izračunavaju se prema izrazima:

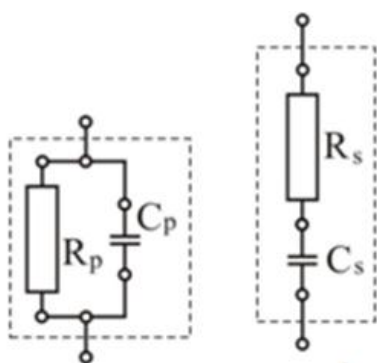
$$C_p = \frac{\epsilon \cdot S}{d} ; R_p = \frac{\rho \cdot d}{S} ; C_s = C_p \cdot (1 + \operatorname{tg}^2 \delta)$$

Gubitci u kondenzatoru rastu s kvadratom napona i frekvencije:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \rho = U \cdot I \cdot \sin \delta \approx U^2 \cdot C \cdot \omega \cdot \delta$$

Kut gubitaka ovisi o frekvenciji, temperaturi i naponu, a može se također dobiti izrazom:

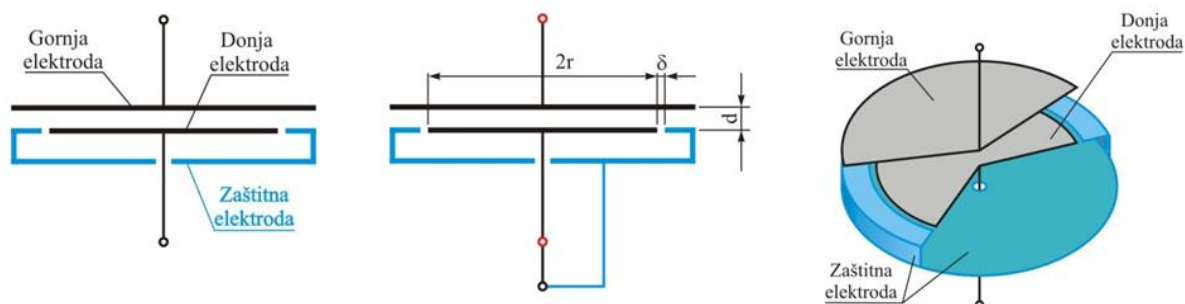
$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{R_p C_p \omega} = R_s \cdot C_s \cdot \omega$$



Slika 1.5-12 Nadomjesna shema serijskog i paralelnog spoja kondenzatora na niskim frekvencijama

U praksi najčešće koristimo papirnate kondenzatore (papir kao dielektrik). Mjerni kondenzatori se također izrađuju kao kapacitivne dekade, na kojima se vrijednost kapaciteta određuje pomoću preklopke.

Pri **etalonima kapaciteta** iznos kapaciteta može odrediti računskim putem na osnovu njihovih dimenzija. To je na primjer moguće za najjednostavniji oblik pločastog kondenzatora bez dielektrika (između ploča je zrak), ali on ipak mora imati zaštitnu elektrodu za dobivanje jednolikog (homogenog) električnog polja kako bi se izbjegli rubni efekti. Gornja elektroda je ravna, vrlo glatka i okrugla ploča, nešto većeg promjera od donje elektrode. Oko donje elektrode nalazi se zaštitna elektroda, koja je odvojena vrlo uskim zračnim rasporom. Pri mjerenju donja i zaštitna elektroda nalaze se na gotovo istom potencijalu, pa se postiže gotovo homogeno električno polje između gornje i donje elektrode.



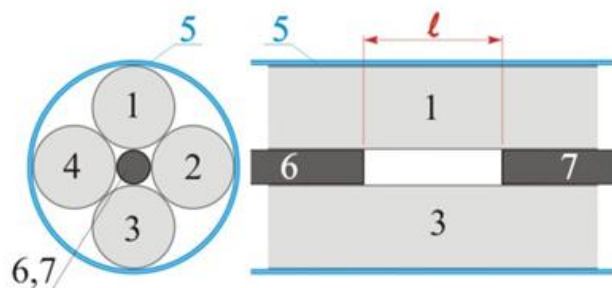
Slika 1.5-13 Prikaz pločastog kondenzatora sa zaštitnom elektrodom

Za ovakav kondenzator može se pisati da je njegov kapacitet:

$$C = \epsilon_0 \cdot \frac{(2r + \delta)^2 \pi}{4d}$$

Mnogo manje pogreške postižu se izradom etalona kapaciteta na temelju teoretskih razmatranja D.G. Lamparda. Takav etalon napravio je A.M. Thompson 1956. godine. Danas se on naziva **Thompsonov računski etalon kapaciteta**. Kod simetričnog rasporeda valjaka kapacitet između valjaka 1 i 3, odnosno 2 i 4 ovisi samo o razmaku pomoćnih valjaka 6 i 7. Svi valjci su metalni i smješteni u metalnu cijev. Ako se s vrhunskom točnošću izmjeri spomenuti razmak (npr. interferencijskom metodom) onda relativna pogreška srednje vrijednosti kapaciteta $C = (C_{1,3} + C_{2,4}) / 2$ neće odstupati više od $5 \cdot 10^{-8}$ od vrijednosti koju dobijemo prema izrazu:

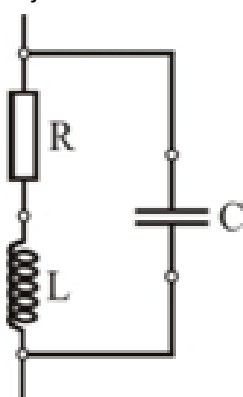
$$C_{1,3} = C_{2,4} = \epsilon_0 \cdot \frac{l \cdot \ln(2)}{\pi}$$



Slika 1.5-14 Prikaz Thopsonova računskog etalona kapaciteta

1, 2, 3, 4 – jednaki metalni valjci
5, 6 – pomoćni metalni valjci
7 – uzemljena metalna cijev

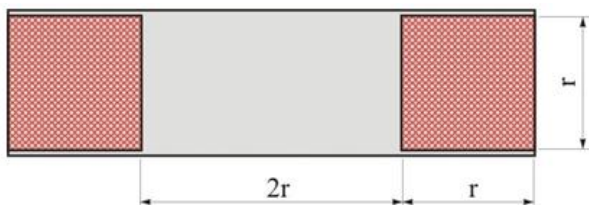
U mjerenju sa izmjeničnom strujom često se koriste **mjerni svitci**, dok manje kod istosmjernih. No za induktivitet moramo koristiti svitak (a za međuinđuktivitet čak dva svitka) obično bakrene žice, koji će sigurno imati neki omski otpor. Između susjednih zavoja imamo razliku potencijala, koja stvara električno polje, a to znači da imamo neki parazitski kapacitet. Osim ovih neželjenih pojava (R , C), također želimo da svitak ne ovisi o temperaturi, frekvenciji, jačini struje, vanjskim magnetskim poljima i td.



Otpor i kapacitet se mogu smanjiti ako se svitak radi u obliku torusa na feromagnetskom prstenu. No ovakve konstrukcije su nepoželjne ako želimo imati linearne odnose, jer kod željeza i drugih feromagnetika imamo nelinearnu krivulju magnetiziranja (promjenljiv μ_r), gubitke uslijed histereze i vrtložnih struja. Zato se za precizna mjerenja najčešće koriste mjernim svicima bez feromagnetske jezgre.

Slika 1.5-15 Nadomjesna shema induktiviteta

Etaloni induktiviteta mogu biti izvedeni kao **računski etaloni samoinduktiviteta** tj. mjerni svitci čiji je samoinduktivitet određen računski pomoću broja zavoja i vrlo precizno izmjerenim dimenzijama. Najčešće se izrađuju kao jednoslojni svitak namotan na cijev (cilindar - valjak) izrađenu od kvarca, mramora, steatita i td, kako bi se izbjegle pojave kapaciteta. Na ovom tijelu (valjku) ureže se spiralni utor u koji se stavi tanka bakrena žica. Uz pažljiv rad i ispravno mjerenje dimenzija, tijela, promjera zavoja, kao i njihovog razmaka relativna pogriješka izračunatog induktiviteta može biti reda veličine $2 \cdot 10^{-6}$. Računski etaloni induktiviteta su skupi i koriste se u posebnim metrološkim ustanovama (laboratorijima koje se koriste isključivo za vrhunska mjerenja i za kontrolu mjernih jedinica). U ostalim laboratorijima koriste se uglavnom **uporabni etaloni induktiviteta**. Ovi etaloni su višeslojni svitci kružnog oblika, a pravokutnog presjeka. Izrađuju se tako da im je unutarnji promjer dva puta veći od dimenzija presjeka svitka.



Slika 1.5-16 Uporabni etalon samoinduktiviteta

S takvim odnosom dimenzija postiže se najveći induktivitet uz najmanji utrošak bakra – pa time i relativno najmanji parazitski omski otpor svitka R , odnosno najveća vremenska konstanta L/R . Induktivitet ovakvog svitka dobiva se izrazom:

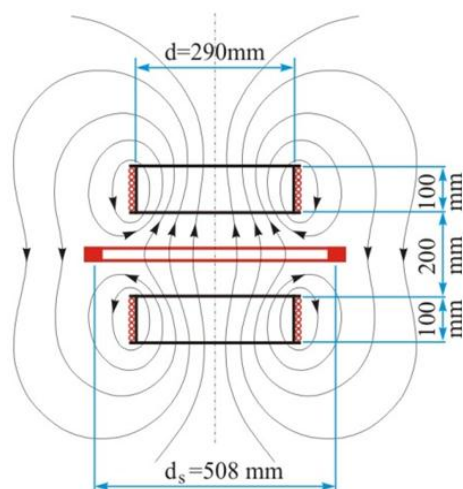
$$L = 25.5 \cdot N^2 \cdot r \cdot 10^{-7}$$

gdje je N – broj zavoja svitka, r – unutarnji polumjer, L – induktivitet (samoinduktivitet)

Na keramičko tijelo svitka namotana je žica (za više frekvencije) koja je isprepletena od mnogo izoliranih niti, gdje se gotov namot u vakuumu impregnira parafinom. Stezaljke svitka nalaze se na vanjskoj strani svitka (na vanjskom rubu) gdje je magnetsko polje najslabije, a moraju biti što manjih dimenzija zbog vrtložnih struja (za više frekvencije). Za područja visokih frekvencija izrađuju se posebni etaloni induktiviteta s tijelom najčešće od porculana, a ponekad i mramora. Vrš se poseban način namatanja kod kojeg se posebno izbjegava da zavoji koji su na većoj potencijalnoj razlici budu međusobno blizu. Ovakvi etaloni su osjetljivi na vanjska strana magnetska polja, dok sami proizvode snažna magnetska polja koja se prostiru oko njih.

Etaloni međui nduktiviteta možemo također podijeliti na računске i uporabne. Oblik **računskih etalona međui nduktiviteta** također se odabiru tako da one dimenzije koje utječu na međui nduktivitet mogu što preciznije izmjeriti kako bi se odredio točni međui nduktivitet računskim putem. Poznat je računski etalon međui nduktiviteta po Campbelu koji se sastoji od dvije jednoslojne zavojnice namotane na tijelo od kvarca. Svaka zavojnica ima 100 zavoja i promjer od 290 mm, a namotana je golom bakrenom žicom promjera 0,6 mm, pri čemu su susjedni zavoji međusobno razmaknuti 1 mm. Zavojnice su međusobno razmaknute 200 mm i spojene u seriju tako da im se magnetski tokovi podudaraju. Na sredini između ove dvije zavojnice nalazi se treća višeslojna zavojnica sa 495 zavoja bakrene žice promjera 0,5 mm. Srednji promjer ove zavojnice je 508 mm, a presjek svitka iznosi 150 mm². Kako se srednja zavojnica nalazi u prostoru gdje je magnetsko polje najslabije to je pogreška mjerenja dimenzija ove zavojnice zanemariva, a dvije jednoslojne zavojnice se mogu vrlo točno izmjeriti. Uz pažljiv rad postiže se relativna pogreška manja od $2 \cdot 10^{-6}$.

Slika 1.5-17 Računski etalon međui nduktiviteta



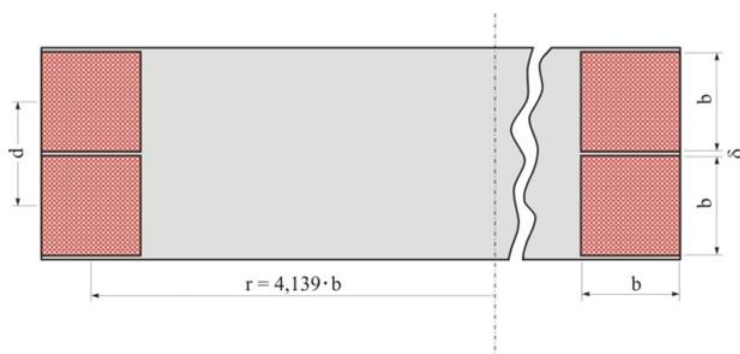
Uporabni etaloni međui nduktiviteta su gotovo istog oblika kao i uporabni etaloni induktiviteta, ali imamo dva svitka čiji međui nduktivitet je magnetska veza između tih svitaka. Uglavnom se izrađuju tako da se uzmu dvije žice i namotaju zajedno. U takvom slučaju oba svitka imaju isti iznos induktiviteta i imeđui nduktiviteta. No ovakva izvedba daje velik parazitski kapacitet između ta dva svitka. Zbog toga su ovakvi etaloni koriste samo na vrlo niskim frekvencijama ili kod istosmjernih struja kod tzv. balističkih mjerenja. Uporabni etalon međui nduktiviteta koji se češće koristi izrađuje se sa oba svitka jednakih dimenzija i broja zavoja stavljena jedan do drugog s vrlo malim međusobnim razmakom. Njihov međui nduktivitet možemo izračunati prema izrazu:

$$M = 4 \cdot \pi \cdot r \cdot N^2 \cdot \left(\ln \frac{8r}{d} - 2 \right) \cdot 10^{-7}$$

Ako se ovakvi svitci naprave sa srednjim radijusom koji je približno 4,139 puta veći od stranice pravokutnog presjeka svitka b, odnosno s unutarnjim promjerom koji je 7,279 puta veći od stranice pravokutnog presjeka svitka b, onda se postiže maksimalni međui nduktivitet uz minimalni utrošak bakra. Tada međui nduktivitet i induktivitet svakog svitka iznose:

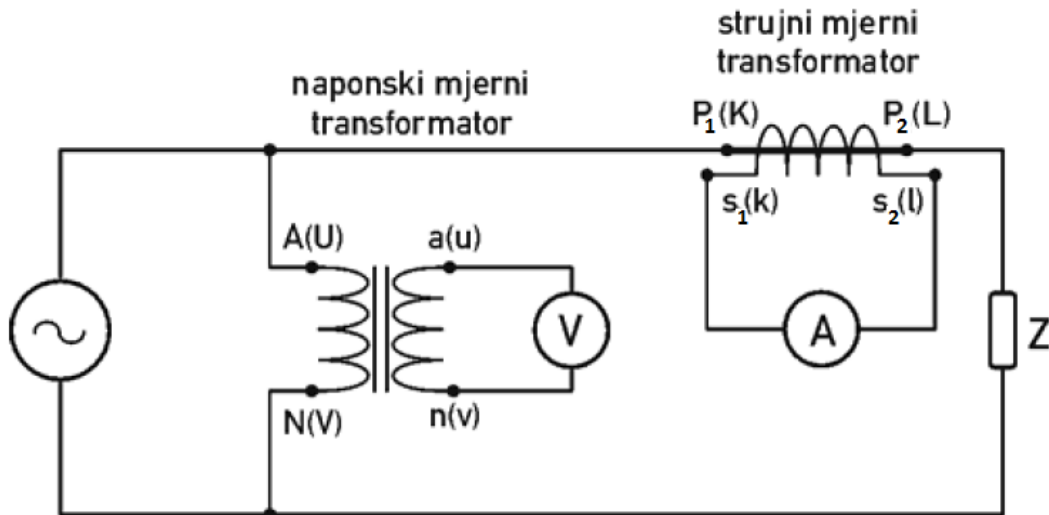
$$M = 78 \cdot b \cdot N^2 \cdot 10^{-7}$$

$$L = 120 \cdot b \cdot N^2 \cdot 10^{-7}$$



Slika 1.5-18 Uporabni etalon međui nduktiviteta

Mjerni transformatori su laboratorijski elementi koji se koriste za proširenje mjernog opsega instrumenta i za sigurno odvajanje mjerila (zaštita uređaja od visokog napona), te omogućuju daljinsko mjerenje, jer se mjerni signal može prenositi s dvije žice (do 100 m), a to je slučaj u praksi. Sastoje se od 3 elementa: primarni i sekundarni namot (međusobno su izolirani) i magnetske jezgre. Primarni se namot priključuje u mjerni krug, a na sekundarni se priključuje mjerni instrumenti ili zaštita. Strujni služe za mjerenje struje, a naponski za mjerenje napona.



Slika 1.5.19 Spajanje mjernih transformatora u mjerni krug

Prednosti koje se postižu korištenje mjernih transformatora su:

- mjerene struje i naponi različitih iznosa transformiraju se na uvijek iste normirane vrijednosti (struje od 1 A ili 5 A, napone od 57.73 V, 100 V, 115.47 V ili 200 V), čime je omogućena ujednačena uporaba mjernih, zaštitnih i regulacijskih uređaja
- mjerni se instrumenti i uređaji izoliraju od visokih napona u mjernome krugu pa rukovanje njima postaje manje opasno
- dobiva se mogućnost galvanskog odvajanja strujnih krugova, a time i prostornog udaljavanja mjernih instrumenata i uređaja od mjernoga strujnog kruga, čime se ujedno sprječava utjecaj često snažnih magnetskih i električnih polja na rad uređaja
- posebnim se izvedbama mjernih transformatora zaštićuju mjerni instrumenti i uređaji od štetnoga dinamičkog i termičkog učinka struja kratkog spoja u mjerjenome strujnom krugu.

Strujni transformatori transformiraju izmjenične struje na vrijednosti prikladne za mjerenje, dok u visokonaponskim mrežama služi za izoliranje. Uključuje se serijski s trošilom, gdje jedna stezaljka sekundara treba biti uzemljena. Uvjeti rada strujnog transformatora su približno jednaki radu idealnog transformatora u uvjetima kratkog spoja, a to znači slijedeće:

- struja magnetiziranja je jednaka nuli
- nema padova napona, jer magnetska jezgra ima beskonačnu magnetsku vodljivost
- vodiči namota imaju beskonačnu električnu vodljivost
- nema rasipnih tokova između primara i sekundara

Kod idealnog transformatora u kratkom spoju broj primarnih zavoja jednak je broju sekundarnih. Za idealni kratki spoj vrijedi:

$$I_1 N_1 = I_2 N_2 \quad ; \quad k_n = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

gdje je k_n omjer transformacije, N_1 broj namota na primaru transformatora, N_2 broj namota na sekundaru transformatora, I_1 struja primara, I_2 struja sekundara.

Sekundarna struja I_2 je razmjerna primarnoj i gotovo je u fazi s njom. Odstupanje od nazivnog omjera transformacije k_n i fazna odstupanja su vrlo mala. Strujna pogreška je pogreška koju strujni transformator unosi u mjerenje efektivne vrijednosti, a izračunava se prema izrazu:

$$p = \frac{\Delta I}{I} 100\% = \frac{k_n I_2 - I_1}{I_1} 100\%$$

gdje su struje I_1 i I_2 efektivne vrijednosti.

Naponski transformatori smanjuju visoke izmjenične napone na vrijednosti prikladne za mjerenje. Priključuju se paralelno trošilu čiji napon želimo mjeriti. Primarna struja treba biti što manja s obzirom na struju kroz trošilo, slično kao i kod voltmetra. Razlikujemo induktivne i kapacitivne. Naponski transformator radi u približno idealnim uvjetima praznog hoda. **Induktivni naponski transformator** se sastoji od magnetske jezgre, primarnog i sekundarnog namota koji su međusobno izolirani. Primarni namot se spaja na točke između kojih se želi mjeriti napon. Sekundarni namot se spaja na mjerilo i zaštitne uređaje. Radi približno u uvjetima praznog hoda. Kod struja primara i sekundara gotovo da nema faznog pomaka. Naponi primara i sekundara razmjerni su broju zavoja i među njima gotovo da nema faznog pomaka, a gdje je omjer transformacije jednak:

$$k_n = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Naponska pogreška je pogreška koju naponski transformator unosi u mjerenje efektivne vrijednosti napona prema izrazu:

$$p = \frac{\Delta U}{U} 100\% = \frac{k_n U_2 - U_1}{U_1} 100\%$$

Kapacitivni naponski transformatori se sastoje od kapacitivnog dijelila i elektromagnetske jedinice. Elektromagnetska jedinica se sastoji od naponskog transformatora i prigušnica. Osjetljiviji su na promjene frekvencije, no smije varirati – kod transformatora za mjerenje $\pm 1\%$, a kod transformatora za zaštitu od $\pm 2\%$ do $\pm 4\%$. Upotrebljavaju se za mjerenje visokih pogonskih napona.

1.6 PITANJA ZA PROVJERU ZNANJA

1. Što je mjerna veličina?
2. Zašto se izvršavaju mjerenja?
3. Što su električna mjerenja?
4. Što je mjerni instrumenti?
5. Što je mjerna jedinica?
6. Što je mjerna metoda?
7. Što je mjerni rezultat?
8. Kako se mogu sve mjeriti fizikalne veličine?
9. Nabrojite sve osnovne mjerne jedinice SI sustava.
10. Navedite sve osnovne fizikalne veličine SI sustava.
11. Što nam iskazuje apsolutna pogreška mjerenja?
12. Što nam iskazuje relativna pogreška mjerenja?
13. Što nam iskazuje postotna pogreška mjerenja?
14. Kada koristimo korekciju mjerenja?
15. Kada nastaju grube pogreške u mjerenju?
16. Kada nastaju slučajne pogreške u mjerenju?
17. Kada nastaju sustavne pogreške u mjerenju?
18. Zašto se koristi mjerna nepouzdanost mjernog postupka?
19. Kako se dobiva nepouzdanost mjerenja i relativna nepouzdanost?
20. Na koji način se iskazuju rezultati mjerenja?
21. Što je statistička obrada mjernih rezultata?
22. Što su sigurne granice pogrešaka?
23. Što su statističke granice pogrešaka?
24. Što nam govore vjerojatne granice pogrešaka?
25. Kako se iskazuju mjerni rezultati?
26. Koje su razine iskazivanja mjernog rezultata?
27. Kako se grafički prikazuju rezultati mjerenja?
28. Kakovo mora biti mjerilo grafičkog prikaza rezultata?
29. Što je mjerni sustav?
30. Što je mjerna oprema?
31. Koje su sve vrste mjernih sustava?

32. Navedite sva mjerila.
33. Navedite sve vrste mjernih izvora.
34. Što su sve laboratorijski elementi?
35. Što su laboratorijski izvori?
36. Navedite sve istosmjerne i izmjenične laboratorijske izvore.
37. Pojasnite primarni i sekundarni galvanski članak.
38. Pojasnite karakteristike električne mreže.
39. Navedite sve elektroničke izvore izmjeničnog napona i struje.
40. Pojasnite generatore funkcija.
41. Pojasnite etalone otpora.
42. Pojasnite izvedbu žičanih otpornika.
43. Pojasnite izvedbu slojnih otpornika.
44. Pojasnite izvedbe otpornike dekade.
45. Pojasnite izvedbe kliznih otpornika.
46. Koje su najvažnije značajke kliznih otpornika?
47. Kako se izvode mjerni kondenzatori?
48. Pojasnite etalone kapaciteta.
49. Kako se izvode mjerni svitci?
50. Pojasnite etalone induktiviteta.
51. Pojasnite etalone međuinaktiviteta.
52. Što su mjerni transformatori?
53. Koje su prednosti korištenja mjernih transformatora?
54. Pojasnite strujne transformatore.
55. Pojasnite naponske transformatore.

1.7 ZADATCI

1. Mjerenja se provode pomoću raznih naprava ili instrumenata. Zaokružite sve one koji nisu mjerila:

a) omometer	b) uteg	c) štoperica	d) električna struja
-------------	---------	--------------	----------------------
2. Zaokružite sve one instrumente koji mjere izravno električnu struju:

a) voltmetar	b) ampermetar	c) omometer	d) multimetar
--------------	---------------	-------------	---------------
3. Zaokružite sve osnovne SI jedinice:

a) Pa	b) m	c) K	d) mol
-------	------	------	--------
4. Zaokružite sve osnovne SI jedinice:

a) A	b) V	c) Ω	d) W
------	------	-------------	------
5. Zaokružite sve osnovne SI jedinice:

a) cd	b) N	c) s	d) kg
-------	------	------	-------
6. Zaokružite sve one instrumente koji mjere izravno napon:

a) omometer	b) uteg	c) štoperica	d) multimetar
-------------	---------	--------------	---------------
7. Vrijednost **35 mA** jednaka je:

a) 3.5 A	b) 0.035 A	c) 350 A	d) 35 000 A
----------	------------	----------	-------------
8. Vrijednost **18.5 μ H** jednaka je:

a) 1850 H	b) 0.00185 H	c) 0.0000185 H	d) 185000 H
-----------	--------------	----------------	-------------
9. Vrijednost **0.57 mV** jednaka je:

a) 570 μ V	b) 0.0057 V	c) 570 V	d) nema rješenja
----------------	-------------	----------	------------------
10. Vrijednost **79.93 nF** jednaka je:

a) 7993 pF	b) 0.007993 F	c) 79930000 mF	d) 0.07773 μ F
------------	---------------	----------------	--------------------
11. Vrijednost **82.13 pA** jednaka je:

a) 82130 nA	b) 0.08213 mA	c) 0.00008213 μ A	d) nema rješenja
-------------	---------------	-----------------------	------------------
12. Vrijednost **45.72 mH** jednaka je:

a) 45720 H	b) 0.04572 μ H	c) 45720000 pH	d) nema rješenja
------------	--------------------	----------------	------------------
13. Vrijednost **35 mA** jednaka je:

a) 3.5 A	b) 0.035 A	c) 350 A	d) 35 000
----------	------------	----------	-----------
14. Vrijednost **10.44 kW** jednaka je:

a) 0.01044 Ω	b) 10440 Ω	c) 1044 Ω	d) 0.1044 Ω
---------------------	-------------------	------------------	--------------------

15. Vrijednost **0.092 k Ω** jednaka je:
 a) 0.000092 Ω b) 920000 Ω c) 0.92 Ω d) 92 Ω
16. Vrijednost **5.7 MHz** jednaka je:
 a) 57000 Hz b) 57 Hz c) 0.0057 GHz d) 0.0057 kHz
17. Vrijednost **6.09 GW** jednaka je:
 a) 6090 W b) 0.00000609 W c) 0.00609 MW d) 6090000 kW
18. Vrijednost **0.00288 T Ω** jednaka je:
 a) 0.00000288 M Ω b) 288000000 k Ω c) 2.88 G Ω d) Nema rješenja
19. Vrijednost **100 kW** jednaka je:
 a) 1000 W b) 100000000 mW c) 0.0001 W d) 0.0000100 MW
20. Vrijednost **50 Hz** jednaka je:
 a) 5000 mHz b) 50000 kHz c) 0.050 kHz d) 0.0050 mHz
21. Vrijednost **90 cm** jednaka je:
 a) 0.09 m b) 9 dm c) 0.009 mm d) 9000 m
22. Vrijednost **17.6 mm** jednaka je:
 a) 1760 m b) 1.76 dm c) 0.0176 m d) 176 cm
23. Vrijednost **2.4 km** jednaka je:
 a) 240 mm b) 24000 cm c) 2400 m d) 0.0024 dm
24. Vrijednost **780 dm** jednaka je:
 a) 0.0780 km b) 780000 m c) 0.00780 mm d) 78 cm
25. Vrijednost **5.9 cm²** jednaka je:
 a) 59 mm² b) 0.59 dm² c) 5900 mm² d) 0.059 dm²
26. Vrijednost **0.125 m²** jednaka je:
 a) 125 dm² b) 12.5 cm² c) 1250 cm² d) 0.00125 km²
27. Vrijednost **340 mm²** jednaka je:
 a) 0.34 cm² b) 340000 m² c) 34 cm² d) 0.034 dm²
28. Vrijednost **0.0065 km²** jednaka je:
 a) 0.000000065 dm² b) 65000 dm² c) 6500 m² d) 0.00000065 m²
29. Zaokružite sve one odgovore kod kojih može doći do pogreške u mjerenju zbog nesavršenosti:
 a) ampermetar b) otpornik c) štoperica d) električno kuhalo
30. Apsolutna pogreška mjerenja dobiva se pomoću izmjerene i prave vrijednosti mjerene veličine ako izračunamo njihovu:
 a) umnožak b) zbroj c) razliku d) omjer
31. Zaokružite sve one pogreške mjerenja kod kojih možemo imati pozitivnu i negativnu vrijednost kao rezultat:
 a) apsolutna b) relativna c) postotna d) gruba
32. Relativna pogreška mjerenja dobiva se pomoću apsolutne pogreške i prave vrijednosti mjerene veličine ako izračunamo njihovu:
 a) umnožak b) zbroj c) razliku d) omjer
33. Korekcija mjerenja ima istu vrijednost kao i:
 a) pozitivna vrijednost b) negativna vrijed. c) negativna vrijednost d) pozitivna vrijed.
 apsolutne pogreške apsolutne pogreške relativne pogreške relativne pogreške

34. Zaokružite onu pogrešku mjerenju koja je nastala nepažnjom ispitivača:
- a) apsolutna b) relativna c) sistemska d) gruba
35. Zaokružite onu pogrešku mjerenju koja je nastala zbog nesavršenosti multimetra:
- a) slučajna b) relativna c) sistemska d) gruba
36. Zaokružite onu pogrešku mjerenju koja je nastala promjenom temperature u okolini:
- a) slučajna b) relativna c) sistemska d) gruba
37. Obrada rezultata mjerenja računalnim program naziva se:
- a) dinamička obrada b) statistička obrada c) sistemska obrada d) digitalna obrada
- rezultata rezultata rezultata rezultata
38. Zaokružite sva rješenja koja su unutar granice pogreške od $\pm 10\%$ vrijednosti otpora 55Ω :
- a) 55.5Ω b) 56Ω c) 50Ω d) 54.8Ω
39. Rezultat mjerenja je nepotpun u njegovom iskazivanju bez:
- a) točnih vrijednosti b) korištenja osnovnog c) grafičkog prikaza d) mjerne nesigurnosti
- instrumenata SI sustava
40. N razina iskazivanja rezultata koristi se za:
- a) stručne radove b) znanstvene radove c) laboratorijske vježbe d) instrumente
41. V razina iskazivanja rezultata koristi se za:
- a) stručne radove b) znanstvene radove c) laboratorijske vježbe d) instrumente
42. S razina iskazivanja rezultata koristi se za:
- a) stručne radove b) znanstvene radove c) laboratorijske vježbe d) instrumente
43. Grafičko prikazivanje mjernih rezultata mora biti u mjerilu gdje skala odgovara višekratniku brojeva mjerene veličine:
- a) 1 b) 2 c) 5 d) 10
44. Zaokružite sva sredstva koja služe mjerenju:
- a) baterija b) vodiči c) mjerni otpornici d) voltmetar
45. Zaokružite sve karakteristike instrumenata s otvorenim mjernim sustavom:
- a) bez povratne veze b) s povratnom vezom c) proračun pogreške d) upotreba računala
46. Zaokružite sve karakteristike instrumenata s zatvorenim mjernim sustavom:
- a) bez povratne veze b) s povratnom vezom c) proračun pogreške d) usporedba veličina
47. Zaokružite sve karakteristike instrumenata s otvorenim mjernim sustavom:
- a) bez povratne veze b) s povratnom vezom c) proračun pogreške d) upotreba računala
48. Istosmjerni laboratorijski mjerni izvori su:
- a) poluvodički b) Westonov etalonski c) generatori d) električna mreža
- ispravljači napona članak promjenjive frekven.
49. Istosmjerni laboratorijski mjerni izvori su:
- a) etalon napona sa b) sinusni oscilatori c) generatori funkcije d) sekundarni galvanski
- Zenerovom diodom članci
50. Izmjenični laboratorijski mjerni izvori su:
- a) poluvodički b) Etaloni frekvencije i c) Sintetizatori d) Primarni galvanski
- ispravljači napona vremena frekvencije članci
51. Energija galvanskog članka mjeri se u:
- a) voltima (V) b) vatsatima (Wh) c) vatima (W) d) ampersatima (Ah)
52. Zenerova dioda kao stabilizator napona radi u:
- a) propusnom b) zapornom području c) frekvencijskom d) temperaturnom
- području rada rada području rada području rada

53. Koja tvrdnje su točne ako neelektrolitsku bateriju priključimo u strujni krug:

- | | | | |
|-------------------------|------------------------|----------------------|-------------------------|
| a) unutarnji otpor bat. | b) unutarnju otpor | c) napon na bateriji | d) napon baterije raste |
| opada pražnjenjem | bat. raste pražnjenjem | opada tijekom rada | tijekom rada |

54. Kapacitet galvanskog članka mjeri se u:

- | | | | |
|--------------|-------------------|-----------------|---------------------|
| a) volta (V) | b) vatsatima (Wh) | c) faradima (F) | d) ampersatima (Ah) |
|--------------|-------------------|-----------------|---------------------|

55. Zaokružite sve primarne galvanske članke:

- | | | | |
|----------|---------------|-----------|--------------------|
| a) živin | b) alkalinski | c) olovni | d) litijско ionski |
|----------|---------------|-----------|--------------------|

56. Zaokružite sve sekundarne galvanske članke:

- | | | | |
|-----------|--------------------|--------------------------------|--------------------|
| a) olovni | b) srebrno oksidni | c) litijски – MnO ₂ | d) litijско ionski |
|-----------|--------------------|--------------------------------|--------------------|

57. Pretvarači istosmjernog napona koriste se za:

- | | | | |
|-------------------|-------------------|------------------------|---------------------|
| a) pretvaranje AC | b) pretvaranje DC | c) povećanje amplitude | d) povećanje |
| napona u DC | napona u AC | DC naponu | amplitude AC naponu |

58. Poluvodički ispravljači napona koriste se za:

- | | | | |
|-------------------|-------------------|------------------------|--------------------|
| a) pretvaranje AC | b) pretvaranje DC | c) povećanje amplitude | d) povećanje |
| napona u DC | napona u AC | DC naponu | amplitude AC napon |

59. Zaokružite sve odgovore za koje se može koristiti kalibratorski izvor:

- | | | | |
|----------------------|----------------|---------------------|----------------|
| a) precizno mjerenje | b) umjeravanje | c) ugađanje mjernog | d) umjeravanje |
| | voltmetra | uređaja | ampermetra |

60. Jednofazni napon električne mreže iznosi:

- | | | | |
|----------|----------|----------|----------|
| a) 110 V | b) 220 V | c) 230 V | d) 134 V |
|----------|----------|----------|----------|

61. RC oscilatori najčešće se primjenjuju kao:

- | | | | |
|------------------|------------------------|--------------------|-----------------------|
| a) sintetizatori | b) signalni oscilatori | c) generatori | d) sinusni oscilatori |
| frekvencije | frekvencije | promjenjive frekv. | |

62. Zaokružite sve valne oblike koje može dati na svom izlazu generator funkcije:

- | | | | |
|---------------|------------|---------------|------------|
| a) pravokutni | b) pilasti | c) trokutasti | d) sinusni |
|---------------|------------|---------------|------------|

63. Cezijevom etalonu frekvencije se:

- | | | | |
|--------------------------|-------------------|--------------------------|------------------------|
| a) frekvencija mijenja s | b) frekvencija ne | c) frekvencija mijenja u | d) frekvencija mijenja |
| porastom napona | mijenja | vremenu | uz stalan napon |

64. Kvarcnom oscilatoru se:

- | | | | |
|--------------------------|-------------------|--------------------------|------------------------|
| a) frekvencija mijenja s | b) frekvencija ne | c) frekvencija mijenja u | d) frekvencija mijenja |
| porastom napona | mijenja | vremenu | uz stalan napon |

65. Etaloni otpora moraju imati:

- | | | | |
|-------------------------|------------------------|-------------------|----------------------|
| a) strogo poznati otpor | b) veliki temperaturni | c) malu vremensku | d) malu otpornost na |
| | koeficijent otpora | postojanost | vibraciju |

66. Materijal koji se najviše koristi pri izradi etalona otpora je:

- | | | | |
|---------------|-------------|-------------|------------|
| a) konstantan | b) manganin | c) keramika | d) nikelin |
|---------------|-------------|-------------|------------|

67. Žičani otpornici kod izmjeničnih struja imaju nepovoljan utjecaj:

- | | | | |
|------------------|----------------|-----------|---------------|
| a) induktiviteta | b) frekvencije | c) napona | d) kapaciteta |
|------------------|----------------|-----------|---------------|

68. Materijal koji se najviše koristi pri izradi žičanih otpornika za veće snage je:

- | | | | |
|---------------|-------------|-------------|------------|
| a) konstantan | b) manganin | c) keramika | d) nikelin |
|---------------|-------------|-------------|------------|

69. Jednofazni napon električne mreže iznosi:

- | | | | |
|----------|----------|----------|----------|
| a) 110 V | b) 220 V | c) 230 V | d) 134 V |
|----------|----------|----------|----------|

70. Zaokružite sva svojstva slojnih otpornika:

- | | | | |
|------------------------|-------------------|--------------------|------------------------|
| a) veliki vlastiti šum | b) mala vremenska | c) veliki naponski | d) velika otpornost na |
| | konstanata | koeficijent | mehanička oštećenja |

71. U laboratorijskim mjerenjima koriste se otporničke dekade koje su izvedene kao:

- | | | | |
|-------------------------------|----------------------------|------------------------------------|--------------------------|
| a) otpornici s
preklopkama | b) otpornici s
čepovima | c) promjenjivi žičani
otpornici | d) otpornici s kliznikom |
|-------------------------------|----------------------------|------------------------------------|--------------------------|

72. Ukupni otpor kliznog otpornika ostvaruje se kada je položaj kliznika na:

- | | | | |
|---------------|---------------|-------------|---------------------|
| a) na sredini | b) na početku | c) na kraju | d) na 1/3 otpornika |
|---------------|---------------|-------------|---------------------|

73. Regulacijski otpornici služe za:

- | | | | |
|----------------------|------------------------------|---|---|
| a) regulaciju napona | b) regulaciju
frekvencije | c) regulaciju struje u
mjernom krugu | d) regulaciju otpora u
serijskom krugu |
|----------------------|------------------------------|---|---|

74. Najmanji otpor kliznog otpornika je:

- | | | | |
|------------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| a) 100% od ukupnog
otpota | b) 50% od ukupnog
otpota | c) 0% od ukupnog
otpota | d) 1% od ukupnog
otpota |
|------------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|

75. Razlučivanje kliznog otpornika je:

- | | | | |
|---|--|---|--|
| a) najveća promjena
otpota s pomakom
kliznika | b) najmanja promjena
otpota s pomakom
kliznika | c) srednja promjena
otpota s pomakom
kliznika | d) postotna promjena
otpota s pomakom
kliznika |
|---|--|---|--|

76. Zaokružite sva svojstva mjernih kondenzatora:

- | | | | |
|--------------------------------|---|---------------------------------------|--|
| a) neovisnost o
temperaturi | b) neovisnost o
priključenom naponu i
frekvenciji | c) točno poznat i stalan
kapacitet | d) veliki izolacijski
otpor između
elektroda |
|--------------------------------|---|---------------------------------------|--|

77. Kut gubitaka mjernih kondenzatora ovisi o:

- | | | | |
|----------------|----------------|-----------|------------------|
| a) frekvenciji | b) temperaturi | c) naponu | d) induktivitetu |
|----------------|----------------|-----------|------------------|

78. Iznos kapaciteta kod etalona može se odrediti pomoću:

- | | | | |
|------------------------|--------------------|-----------------------|----------------|
| a) priključenog napona | b) naboja na njemu | c) njegovih dimenzija | d) dielektrika |
|------------------------|--------------------|-----------------------|----------------|

79. Izračun kapaciteta kod Thompsonova računskog etalona kapaciteta postiže se pomoću:

- | | | | |
|------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| a) asimetričnog
rasporeda ploča | b) simetričnog
rasporeda ploča | c) asimetričnog
rasporeda valjaka | d) simetričnog
rasporeda valjaka |
|------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|

80. Zaokružite sve odgovore o kojima induktivitet svitka ovisi:

- | | | | |
|----------------|----------------|-----------|-----------|
| a) temperatura | b) frekvencija | c) naponu | d) struja |
|----------------|----------------|-----------|-----------|

81. Vrijednost računskih etalona samoinduktiviteta određuju se pomoću:

- | | | | |
|-----------------|----------------------|------------------------|----------------|
| a) broja zavoja | b) dimenzija svitaka | c) priključenog napona | d) frekvencije |
|-----------------|----------------------|------------------------|----------------|

82. Dobri etaloni induktiviteta imaju:

- | | | | |
|--|--|---|--|
| a) mali parazitski omski
otpor svitka | b) veliki parazitski
kapacitet svitka | c) mali prarazitski
kapacitet svitka | d) veliki parazitski
omski otpor svitka |
|--|--|---|--|

83. Etaloni međuinduktiviteta mogu biti:

- | | | | |
|------------|-------------|-------------|-------------|
| a) strujni | b) računski | c) naponski | d) uporabni |
|------------|-------------|-------------|-------------|

84. Etaloni međuinduktiviteta imaju:

- | | | | |
|-----------------|---------------|---------------|------------------|
| a) jedan svitak | b) dva svitka | c) tri svitka | d) četiri svitka |
|-----------------|---------------|---------------|------------------|

85. Uporabni etaloni međuinduktiviteta koriste se:

- | | | | |
|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| a) na vrlo niskim
frekvencijama | b) na vrlo visokim
frekvencijama | c) kod istosmjernih
struja | d) kod izmjeničnih
struja |
|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|

86. Mjerni transformatori mogu biti:

- | | | | |
|------------|-------------|-------------|-------------|
| a) strujni | b) računski | c) naponski | d) uporabni |
|------------|-------------|-------------|-------------|

87. Mjerni transformatori su elementi koji se koriste za:

- | | | | |
|---|-----------------------------|---------------------------------|---|
| a) zaštitu uređaja od
visokog napona | b) daljinsko
upravljanje | c) sigurno odvajanje
mjerila | d) proširenje mjernog
opsega instrumenta |
|---|-----------------------------|---------------------------------|---|

88. Zaokružite sve dijelove mjernog transformatora:

- a) voltmetar b) primarni namot c) magnetska jezgra d) trošilo

89. Zaokružite sve dijelove mjernog transformatora:

- a) sekundarni namot b) ampermetar c) trošilo d) električna mreža

90. Strujni transformatori uključuju se u strujni krug:

- a) paralelno trošilu b) serijski trošilu c) izravno na trošilo d) umjesto trošila

91. Naponski transformatori uključuju se u strujni krug:

- a) paralelno trošilu b) serijski trošilu c) izravno na trošilo d) umjesto trošila

92. Naponski transformatori mogu po vrsti biti:

- a) induktivni b) kapacitivni c) frekvencijski d) omski

93. Otpornik je označen bojama (s lijeva na desno): crvena, zelena, crvena i zlatna. Odredite vrijednost otpora i toleranciju. Napišite njegovu minimalnu i maksimalnu dopuštenu vrijednost.

94. Umjeravanjem ampermetra s pet puta točnijim digitalnim multimetrom utvrđeno je da ampermetar na području od 2 A pri struji od 1.5 A pokazuje 1.6 A. Koliko iznosi apsolutna, relativna i postotna pogreška ovog instrumenta?

95. Digitalnim multimetrom izvršeno je mjerenje napona u iznosu od 5 V. Umjesto digitalnog multimetra spojili smo analogni voltmetar i očitali 4.7 V. Koliko iznosi apsolutna, relativna i postotna pogreška mjerenja? Napišite rezultat mjerenja sa ispravkom.

96. Analognim omometrom izvršeno je pet puta mjerenje otpora nazivne vrijednosti 1 k Ω $\pm$ 10%. Rezultati mjerenja pokazala su: 1000.15 Ω , 999.95 Ω , 1000.07 Ω , 1000.01 Ω , 999.89 Ω . Koliko iznosi aritmetička sredina mjerenja?

97. Dužina cijevi izmjerena je 10 puta ($l_1 = 10.8$ cm, $l_2 = 10.3$ cm, $l_3 = 10.5$ cm, $l_4 = 10.2$ cm, $l_5 = 10.2$ cm, $l_6 = 10.4$ cm, $l_7 = 10.7$ cm, $l_8 = 10.5$ cm, $l_9 = 10.6$ cm, $l_{10} = 10.6$ cm). Koliko iznosi srednja vrijednost, standardna devijacija, nepouzdanost mjerenja, ukupni rezultat mjerenja te relativnu nepouzdanost mjerenja?

98. Wheatstoneovim mostom izmjereno je pet mjerenja jednog otpora pod istim okolnostima. Dobivene su vrijednosti: 483, 478, 482, 485 i 480 Ω . Kolika je najvjerojatnija vrijednost mjerenog otpora, standardna devijacija i standardna devijacija aritmetičke sredine (nepouzdanost mjerenja)?

99. Deset otpornika iste nazivne vrijednosti standardne devijacije 0.5% potrebno je složiti u serijski spoj. Koliko iznosi standardno odstupanje aritmetičke sredine?

100. Kroz jedan duži period izvršeno je mjerenje gubitaka transformatorskog lima. Mjerni uređaj je izvršio šest mjerenja, a dobiveni podatci su: 9.495 W, 9.33 W, 9.765 W, 9.45 W, 9.545 W, 9.55 W. Potrebno je izračunati nepouzdanost mjerenja mjernog postupka uz mjernu nesigurnost $P = 95\%$.

101. Otpornici od 22 Ω imaju standardnu devijaciju 0.5%, a otpornici od 82 Ω standardnu devijaciju 1%. Koliko iznosi postotna standardna devijacija paralelne kombinacije takva dva otpornika?

102. Kondenzatori kapaciteta 1 μ F imaju standardnu devijaciju 1%, a kondenzatori od 0.5 μ F standardnu devijaciju 5%. Koliko iznosi postotna standardna devijacija paralelne i serijske kombinacije takva dva kondenzatora?

103. Whettonov etalonski članak unutarnjeg otpora 500 Ω , opterećen sa strujom 1 μ A na temperaturi od 19 $^{\circ}$ C, priključili smo na trošilo. Koliki će napon pokazivati digitalni voltmetar koji je priključen paralelno trošilu?

104. Kolika je frekvencija mreže ako je priključeni napon jednak $u(t) = 325.26 \sin(314.15 t)$. Izračunajte efektivnu vrijednost napona. Kolika može biti minimalna i maksimalne promjena napona i frekvencije električne mreže?

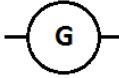
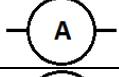
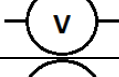
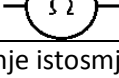
105. Mjerni otpornik izrađen od manganina radi na temperaturi od $35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Koliko iznosi njegov otpor ako je poznato da je na sobnoj temperaturi od $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ imao $1\text{ k}\Omega$.
106. Izračunajte temperaturni koeficijent vodiča koji na temperaturi od $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ima otpor $1.5\text{ k}\Omega$, a za promjenu temperature od $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ima otpor $1.506\text{ k}\Omega$. O kojem se materijalu radi?
107. Izračunajte utjecaj induktiviteta na žičanom otporniku protjecan izmjeničnom strujom jakosti 4 mA . Žičani otpornik ima tijelo izrađeno od keramike, a na sebi ima 500 namota (zavoja) otporne legure. Magnetski tok kroz zavojnicu iznosi 2 mWb .
108. Regulacijski otpornik $10\text{ k}\Omega$ ima postavljen kliznik na udaljenosti $1/4$ od početnog dijela. Koliko iznosi otpor R_2 ?
109. Regulacijski otpornik ima postavljen kliznik na udaljenosti $1/3$ od krajnjeg dijela gdje je izmjeren otpor $R_2 = 2\text{ k}\Omega$. Koliko iznosi ukupni otpor regulacijskog otpornika?
110. Mjerni kondenzator između svojih ploča ploštine 0.4 cm^2 ima sloj papira ($\epsilon_r = 2$, $\rho = 5 \cdot 10^{13}\text{ }\Omega\text{m}$) debljine 0.6 mm . Ako mjerni kondenzator priključimo u spoj koji koristi električnu mrežu, koliko iznose gubitci u kondenzatoru i kut gubitaka?
111. Koliko iznosi kapacitet etalona kapaciteta ako smo izmjerili: polumjer donje elektrode 2 cm , duljina zračnog raspora 0.1 mm , razmak između ploča 1.12 mm .
112. U Thompsonovom računskom etalonu kapaciteta izmjeren je vrlo precizno razmak između pomoćnih valjaka iznosa 1.58 cm . Odredite kapacitete simetričnih metalnih valjaka.
113. Koliko iznosi vrijednost uporabnog etalona induktiviteta ako ima 1000 zavoja i unutarnji polumjer 40 cm ?
114. Uporabni etalon međuinuktiviteta ima zavojnice sa 650 zavoja, promjera $r = 300\text{ mm}$, a namotana je golom bakrenom žicom promjera $d = 0.5\text{ mm}$. Koliko iznosi njihov međuinuktivitet?
115. Idealni transformator ima 500 zavoja na primaru i 100 zavoja na sekundaru. Koliko iznosi omjer transformacije?
116. Idealni transformator priključimo na napon mreže, koliko iznosi napon na sekundaru ako su mu namoti u omjeru 4:1?
117. Strujni transformator spojen na mrežu $100\text{ V} / 1\text{ A}$ ima struju sekundara 0.485 A i omjer namota 2:1. Koliko iznosi strujna pogreška?
118. Naponski transformator spojen na električnu i omjer namota 3:1. Voltmetrom je na sekundaru izmjeren napon 78 V . Koliko iznosi naponska pogreška?

2. MJERNI INSTRUMENTI

2.1 PROPISI I STANDARDI MJERNIH INSTRUMENATA

Električni mjerni instrumenti služe za neposredno mjerenje električnih veličina kao što su: napon, struja, snaga, otpor, faktor snage, frekvencija, kapacitet i slično. Karakteristične osobine mjernih instrumenata su:

- vrsta struje ili napona,
- električna veličina koja se mjeri,
- preciznost, odnosno klasa (razred) točnosti,
- princip djelovanja

Mjerna veličina	Naziv instrumenta	Simbol
Struja i napon	Galvanometar	
Struja	Ampermetar	
Napon	Voltmetar	
Snaga	Vatmetar	
Energija	Brojilo	
Otpor	Omometar	

Tablica 2.1-1 Osnovni prikaz mjernih instrumenata za mjerenje istosmjernih veličina

U mjernim metodama koriste se **električni mjerni instrumenti** koji mogu biti:

- analogni s neposrednim pokazivanjem
- elektronički
- digitalni
- stupičasti (kvazianalogni)

Mjerni opseg (MO) predstavlja skup vrijednosti mjernih veličina za koje instrument mjeri unutar svog razreda točnosti i unutar definiranih granica pogrešaka. Kod analognih i digitalnih instrumenata odabir mjernog opsega vrši se preklopom ili tipkama, ovisno o izvedbi instrumenta. Na svakom mjernom opsegu navedena je najveća vrijednost koju instrument može mjeriti, odnosno njegov mjerni domet. Ukoliko se prekorači mjerni domet može dovesti do oštećenja instrumenta, stoga je bitno da se krene sa većim vrijednostima mjernog dometa.

Razlučivost instrumenta je sposobnost razlikovanja bliskih vrijednosti. Kod analognih instrumenata razlučivost je iskazana u vrijednostima najmanjeg podjeljka određenog mjernog opsega. Razlučivost digitalnih instrumenata je broj znamenaka (digita) koje može prikazati instrument, a iskazuje se sa $X \frac{1}{2}$ znamenaka, gdje $\frac{1}{2}$ predstavlja parcijalnu znamenku (0,1,2), npr. to znači da instrument sa $3 \frac{1}{2}$ znamenaka na mjernom opsegu od 300mV može prikazivati od 000,0 mV do 299,9 mV.

Točnost instrumenta definira se kao razlika između izmjerene i stvarne vrijednosti mjerne veličine. Prema točnosti dijelimo instrumente u *klase točnosti*. **Klasa točnosti** je postotak dozvoljenog odstupanja instrumenta u odnosu na mjerni opseg na kojem se provodi mjerenje.

Osjetljivost instrumenta (O) definira se kao omjer promjene otklona kazaljke ($\Delta\alpha$) i promjene mjerne veličine (ΔX) prema izrazu:

$$O = \frac{\Delta\alpha}{\Delta X}$$

Konstanta instrumenta (k - koeficijent) je broj koji se dobiva omjerom mjernog opsega (MO) i ukupnim brojem podjela na ljestvici ($\Sigma\alpha$) prema izrazu:

$$k = \frac{MO}{\Sigma\alpha}$$

2.1.1 KARAKTERISTIKE ANALOGNIH INSTRUMENATA

Prije početka mjerenja kazaljka analognog instrumenta s neposrednim pokazivanjem treba biti na ničtici (tzv. *mehanička nula*). Kazaljka elektroničkog analognog instrumenta, kada nije uključeno napajanje instrumenta, mora također biti na ničtici. Nakon uključivanja napajanja instrumenta treba, uz kratko spojene ulazne stezaljke, ugoditi tzv. *električnu nulu*.

Svaki analogni instrument ima **dozvoljene granicu pogrešaka**, stoga redovito nastaju sustavne pogreške zbog nesavršenosti mjernog instrumenta. Dozvoljene granice pogrešaka najčešće se iskazuju kao dozvoljeno postotno odstupanje izmjerene vrijednosti fizikalne veličine od njezine stvarne vrijednosti u odnosu na puni mjerni opseg:

$$p_{kl\%} = \frac{|p_a|}{MD} \cdot 100\% = \frac{|X_{mj} - X_p|}{MD} \cdot 100\%$$

Postupak provjere odnosno umjeravanja instrumenta izvodi se na svim mjernim područjima instrumenta, a na kraju se odabire maksimalno odstupanje (pogrešku). **Umjeravanje** je postupak usporedbe pokazivanja instrumenata koji želimo umjeriti s pokazivanjem instrumenta kojim provodimo umjeravanje na određenom mjernom području. Instrument kojim vršimo umjeravanje mora biti barem za dvije klase točnosti bolji od onog instrumenta nad kojim se provodi umjeravanje. Isti postupak ponoviti ćemo na svim mjernim područjima i na kraju odabrati maksimalnu tako izračunatu pogrešku. Za klasu instrumenta moći ćemo reći da je jedan od standardnih brojeva koji je jednak ili veći od ovako izračunatog najvećeg postotka. Granice pogreške instrumenta određene su njegovom klasom (razredom) točnosti.

Klasa (razred) točnosti instrumenta	Dozvoljene postotne granice pogrešaka	Kategorija instrumenta
0.05	$\pm 0.05\%$	Etalonski i laboratorijski
0.1	$\pm 0.1\%$	Etalonski i laboratorijski
0.2	$\pm 0.2\%$	Etalonski i laboratorijski
0.5	$\pm 0.5\%$	Laboratorijski
1	$\pm 1\%$	Pogonski
1.5	$\pm 1.5\%$	Pogonski
2.5	$\pm 2.5\%$	Pogonski
5	$\pm 5\%$	Pogonski

Tablica 2.1.1-1 Klasa točnosti i dozvoljene granice pogrešaka analognih instrumenata

Kod analognih instrumenata mjeritelj očitavajući sa skale instrumenta pretvara izmjerenu vrijednost u brojčanu (kod digitalnih instrumenata to radi A/D pretvornik), ali dolazi do pogrešaka zbog:

- razlučivosti ljudskog oka ograničena je na 0.07 mm, što znači da ljudsko oko dvije točke na udaljenosti manjoj od 0.07 mm vidi kao jednu,
- kada kazaljka zauzima neki položaj između dva podjeljka gdje mjeritelj mora procijeniti koliki je iznos mjerene veličine (subjektivna procjena)

Velika prednost analognih mjerila u odnosu na digitalne jest njihova preglednost, gdje se jednim pogledom na instrument mogu očitavati nekoliko informacija istovremeno:

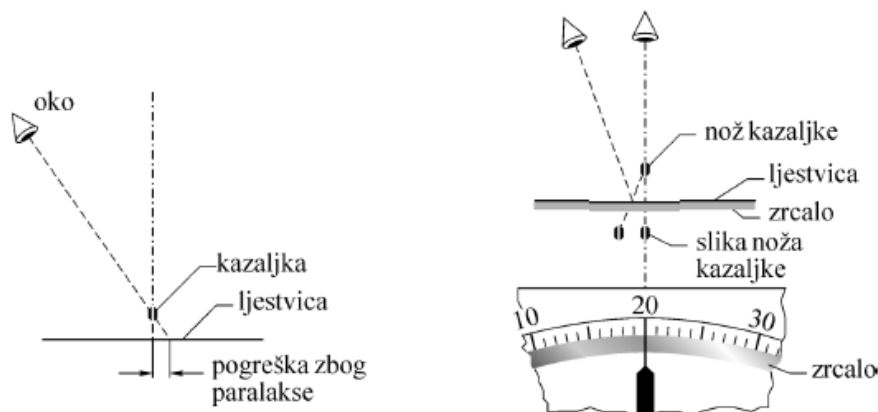
- trenutna vrijednost mjerene veličine
- položaj kazaljke u odnosu na mjerni domet
- rast ili pad signala

Kazaljke (pokazivače) analognih instrumenata možemo podijeliti na pogonske i laboratorijske, a laboratorijske možemo još podijeliti na materijalne i svjetlosne. **Pogonske kazaljke** koriste se u različitim pogonskim postrojenjima. One su grube i debele tako da su jasno vidljive.



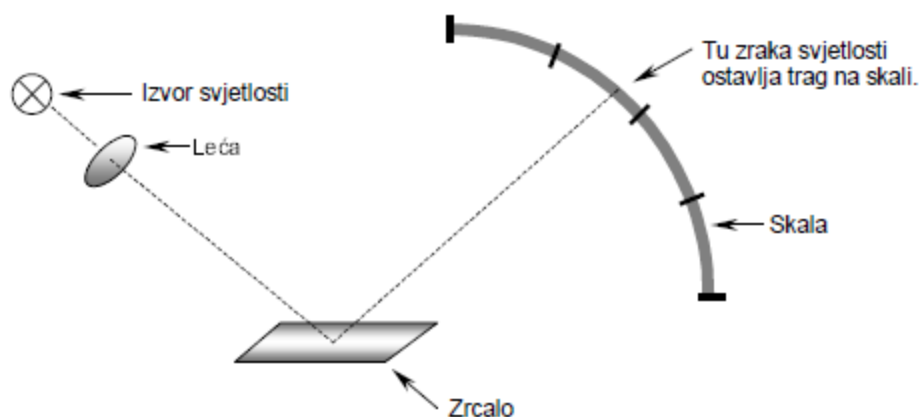
Slika 2.1.1-1 Primjeri pogonskih kazaljki instrumenta

Laboratorijske kazaljke su vrlo tanke i osjetljive jer se koriste kod preciznih mjerenja. Kod ovakvih **materijalnih kazaljki** često nastaje pojava koja se naziva *paralaksa*. Kada mjeritelj zauzme položaj kojim ne gleda okomito na ravninu skale već pod određenim kutom nastaje **pogrješka paralakse**. Takva pogrješka mjerenja eliminira se postavljanjem zrcala gdje će se mjeritelj moći postaviti točno okomito na ravninu skale.



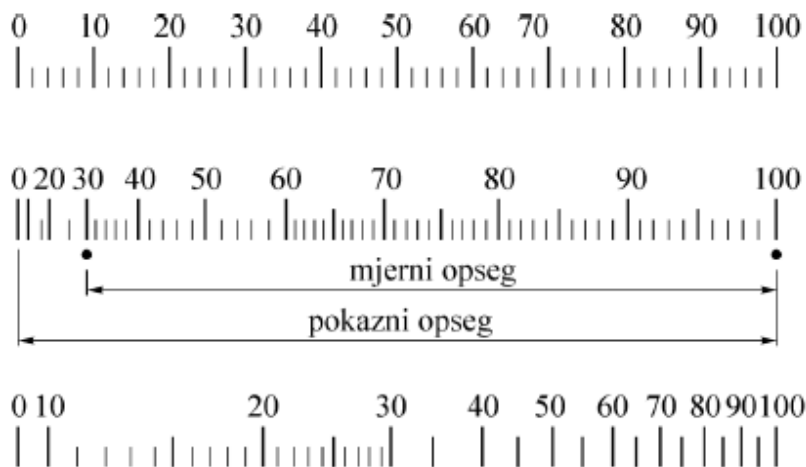
Slika 2.1.1-2 Primjer materijalnih kazaljki instrumenta

Pod **svjetlosnom kazaljkom** podrazumijevamo zraku svjetlosti koju zrcalo reflektira na skalu. Zrcalo je smješteno na pomičnom dijelu instrumenta. Ovakav sustav je jedan od načina eliminiranja pogrješke paralakse.



Slika 2.1.1-3 Primjer svjetlosne kazaljke instrumenta

Radi određivanja položaja nanosena je prikladna podjela (crtice i numeracija), odnosno **ljestvica instrumenta**. Karakteristike ljestvice su – linearna, kvadratična i logaritamska. Mjerni domet je vrijednost koja odgovara gornjoj granici mjernog opsega. Razmak između dviju crtica naziva se **podjeljak** ili dio skale (d.sk.).



Slika 2.1.1-4 Primjer ljestvica analognog instrumenta (linearna, kvadratična i logaritamska)

Osim oznake klase na instrumentima postoji cijeli niz drugih oznaka. One nas govore o kakvom instrumentu se radi, što on mjeri i u kojem položaju i td. Poznavanje ovih oznaka omogućuje lakši, točniji i sigurniji rad s instrumentom, pa je stoga njihovo poznavanje obavezno.

Oznaka	Značenje oznake	Oznaka	Značenje oznake
—	Istosmjerna struja ili napon	⋈	Trofazni mjerni sustav s 1 strujnim i s 1 naponskim svitkom
~	Izmjenična struja ili napon	⋈	Trofazni mjerni sistem s 2 strujna i s 2 naponska svitka
⋈	Istosmjerno ili izmjenično	⋈	Trofazni mjerni sistem s 3 strujna i s 3 naponska svitka

Tablica 2.1.1 - 2 Oznake vrste struja ili napona koju instrument mjeri

Mjerni instrumenti zbog što veće točnosti moraju prilikom mjerenja biti postavljeni u odgovarajući položaj. Zbog toga na instrumentu imamo simbole koje nam ukazuju pravilan položaj instrumenta.

Oznaka	Značenje oznake položaja
┌	Instrument se koristi tako da mu je za vrijeme mjerenja ravnina skale (odnosno kretanja kazaljke) u horizontalnom položaju
└	Instrument se koristi tako da mu je za vrijeme mjerenja ravnina skale (odnosno kretanja kazaljke) u vertikalnom položaju
└ _{70°}	Instrument se koristi tako da mu je za vrijeme mjerenja ravnina skale (odnosno kretanja kazaljke) u položaju koji je pod zadanim kutom prema horizontali – ovdje je to 70°

Tablica 2.1.1 - 3 Značenja oznaka položaja na mjernim instrumentima

Oznaka	Vrsta mjernog sustava / značenje oznake
	Mjerni sustav instrumenta s pomičnim svitkom i permanentnim (trajnim) magnetom . Mjeri srednju aritmetičku vrijednost istosmjerne struje
	Instrument s pomičnim magnetom (kao kod gornjeg instrumenta ali ako se zamijeni položaj svitka i magneta)
	Kvocijentni instrument s pomičnim svitkom i magnetom – mjeri omjer istosmjernih struja
	Elektrodinamički instrument (nastaje ako se kod instrumenta sa zakretnim svitkom i trajnim magnetom, trajni magnet zamijeni elektromagnetom)
	Kvocijentni elektrodinamički instrument – služi za mjerenje faktora snage kod izmjeničnih vrijednosti signala
	Instrument s pomičnim željezom - mjeri efektivnu vrijednost struje odnosno napona
	Indukcijski instrument – najčešće električno brojilo - mjeri samo izmjenične veličine
	Kvocijentni indukcijski instrument – mjeri samo izmjenične vrijednosti, pokazuje smjer okretanja trofaznog polja
	Elektrostatički instrument – elektrometar – kvadrantni elektrometar. Jedina grupa instrumenata koji zakretni moment stvaraju uz pomoć elektrostatičkog polja i stvarno mjere napon
	Instrument s vibracijskim jezičcima – jedan od njih dolazi u rezonanciju s frekvencijom promjene magnetskog polja, a služe za mjerenje frekvencije napona
	Bimetalni instrument – stvarno mjeri efektivnu vrijednost struje bez obzira na njezin valni oblik – koristi toplinski efekt struje
	Instrument s vrućom žicom – još jedan instrument koji mjeri stvarnu efektivnu vrijednost struje bez obzira na njezin valni oblik
	Instrument s pomičnim svitkom, permanentnim magnetom i termo - pretvaračem Izmjenična ili istosmjerna struja grije termopar, koji proizvodi DC napon koji se mjeri
	Instrument s unakrsnim svitcima (kvocijentni instrument) – mjeri odnos dviju struja
	Instrument s pomičnim svitkom i ispravljačem – mjeri izmjenične struje

Tablica 2.1.1 - 4 Oznake i osnovna načela rada mjernih instrumenata

Oznaka	Značenje dodatnih oznaka
	Poluvodički ispravljač
	Neizolirani termo – pretvarač
	Izolirani termo – pretvarač
	Upozorenje da za mjerno područje treba koristiti vanjski paralelni otpornik (šunt)
	Prije korištenja instrumenta obavezno je potrebno pročitati upute! U suprotnom može doći do oštećenja instrumenta, neispravnog mjerenja ili postoji opasnost
ast	Astatička izvedba instrumenta (otporan na utjecaj vanjskih statičkih polja)
	Isprekidana linija kruga govori da se radi o elektrostatičkom kućištu (oklopu) ili zaslonu
	Puna linija kruga govori da se radi o elektrostatičkom kućištu (oklopu) ili zaslonu
	Stezaljka za uzemljenje instrumenta
	Mehaničko ugađanje nule (potenciometar)

Tablica 2.1.1 - 5 Značenja dodatnih oznaka na mjernim instrumentima

Oznaka	Značenje oznaka ispitnih napona
	Instrument sukladno propisima nije ispitan povišenim ispitnim naponom
	Instrument je ispitan jednom minutnim ispitnim naponom od 500 V efektivno. Dopušteno je korištenje ovog instrumenta u strujnim krugovima gdje napon vodiča prema zemlji ne prelazi 40 V
	Instrument je ispitan jednom minutnim ispitnim naponom od 2 kV efektivno. Dopušteno je korištenje ovog instrumenta u strujnim krugovima gdje napon vodiča prema zemlji ne prelazi 650 V
	Instrument je ispitan jednom minutnim ispitnim naponom od 3 kV efektivno. Dopušteno je korištenje ovog instrumenta u strujnim krugovima gdje napon vodiča prema zemlji ne prelazi 1000 V
	Instrument je ispitan jednom minutnim ispitnim naponom od 5 kV efektivno. Dopušteno je korištenje ovog instrumenta u strujnim krugovima gdje napon vodiča prema zemlji ne prelazi 2000 V
	Upozorenje da je visoki napon na instrumentu

Tablica 2.1.1 - 6 Značenja oznaka ispitnih napona na mjernim instrumentima

2.1.2 KARAKTERISTIKE DIGITALNIH INSTRUMENATA

Nakon pretvorbe analogne veličine u digitalnu, **digitalni mjerni instrumenti** pokazuju na prikazniku mjerni rezultat određenim brojem znamenki. Pri očitavanju prikaznika digitalnog instrumenta nema pogreške zbog paralakse, pa se on može očitavati pod većim kutovima (kut očitavanja analognih instrumenata je 0°) i pri lošijim svjetlosnim uvjetima. Ali kod digitalnog prikaza postoje druge vrste **subjektivnih pogrešaka**, kao npr. pogrešno očitavanje grafički sličnih znamenki (npr. 5 i 6, 3 i 8) ili broja s većim brojem ništica. Također, kod digitalnog prikaza promjenjive veličine teže je prepoznati njezin trend i dinamičku promjenu, stoga se digitalni instrumenti primarno koriste za vrlo precizno mjerenje stacionarnih veličina.

Granice pogrešaka digitalnih instrumenata iskazuju se na drugačiji način nego kod analognih, jer su i uzroci pogrešaka drugačiji, na primjer:

- postotkom od očitane vrijednosti (*% of reading*),
- postotkom od mjernog opsega (*% of range*),
- brojem digita, odnosno brojem najmanje značajnih znamenaka (*Less Significant Bit* ili *LSB*) na određenom mjernom području,
- apsolutnom vrijednošću mjerene veličine (volta, oma, ampera ...).

U praksi se koriste razne kombinacije od dva ili tri načina za određivanje granica pogrešaka:

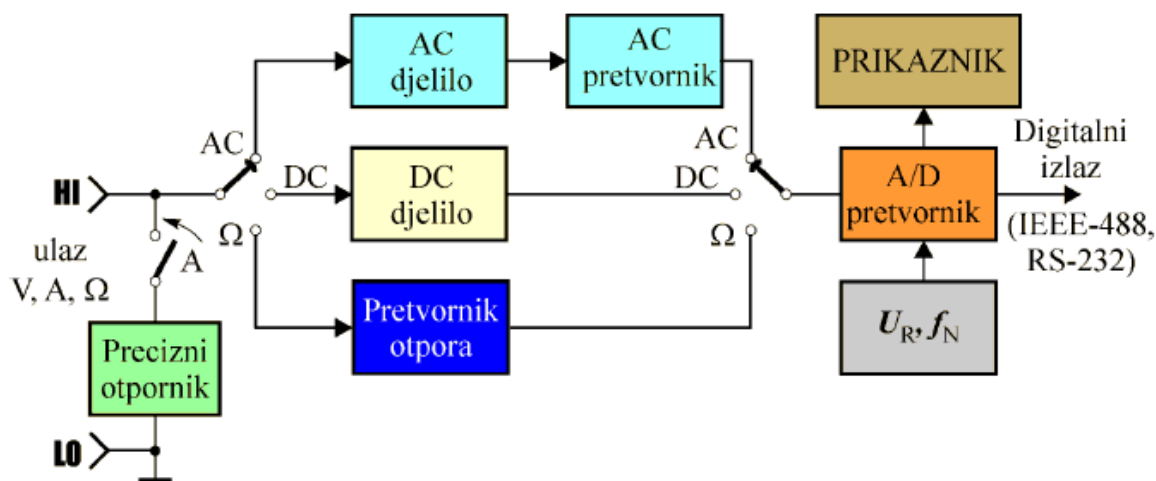
- a+b (npr. 0,1 % od očitane vrijednosti + 0,15 % od mjernog opsega),
- a+c (npr. 0,1 % od očitane vrijednosti + 5 digita)
- a+c+d (npr. 0,1 % od očitane vrijednosti + 2 digita + 0,02 Ω).

Osnovni dijelovi digitalnog instrumenta su:

- ulazno dijelilo i/ili pretpojačalo
- A/D pretvornik
- logički sklopovi i komparatori
- naponska referenca i oscilator
- prikaznik

Ulazni dio digitalnog instrumenta sastoji se od:

- visokoomskog naponskog dijelila (točnost i vremenska stabilnost omjera) – mjerenje napona
- izmjeničnog naponskog dijelila (frekvencija neovisna – kompenzirana)
- ekvivalentne ulazne impedancije digitalnog voltmetra (od $10\text{M}\Omega$ do $10\text{G}\Omega$) – ulazni otpor, ulazni kapacitet i ulazna struja namještanja



Slika 2.1.2-1 Blok shema digitalnog instrumenta (multimetra)

Binarni sustav brojenja koristi jer su potrebne samo dvije znamenke (0 i 1), koje se vrlo lako mogu prikazati pomoću elemenata koji mogu zauzeti dva stanja (npr. sklopka, tranzistor, relej itd.). Mjerni rezultat se prije prikazivanja na instrumentu pretvara u dekadski broj (0-9) koji je prikladniji za očitavanje. Digitalni sustav, od same pretvorbe analognog signala do prikazivanja ili predaje kodiranih vrijednosti, ima osobitu tehniku obrade mjerene veličine. Mjerena veličina u analognom obliku je mjerna veličina s kontinuiranom promjenom, a nosi naziv analogna zato što se lako prikazuju nekim drugim promjenjivim veličinama sa sličnim analognim zakonitostima promjene. Kao takva, analogna mjerena veličina ima neograničen broj vrijednosti. Umjesto neograničenog broja vrijednosti, mjerena veličina u digitalnom obliku ili iz nje stvoreni mjereni signal, može imati samo određene vrijednosti u jednom odsječku promatranog signala. Promjene takve mjerene veličine, određuje skup diskretnih vrijednosti u promatranom odsječku promjenljive veličine. Ključni trenutak u postupku digitalizacije mjerenog signala je njegova pretvorba iz analognog u digitalni. Pretvorba se odvija mjernim pretvornicima, **A/D pretvornicima**, koji pretvaraju vremenski kontinuiranu funkciju $x(t)$ u vremenski diskretnu s kvantiziranim vrijednostima. Kvantiziranjem ulaznog signala nastaje pogreška kvantizacije. Točna vrijednost jednog kvanta A/D pretvornika s naponskim područjem U_v i s n bita iznosi:

$$Q_u = U_v / (2^n - 1) = (U_{u \max} - U_{u \min}) / (2^n - 1) \quad ; \quad P_q = 0,5 / (2^n - 1)$$

Prednosti digitalnih mjerila su velika točnost, velika razlučivost mjerne veličine, jednostavno i brzo očitavanje mjerne veličine, velika brzina mjerenja, prilikom mjerenja nije potrebno paziti na položaj instrumenta, jednostavno i lako spremanje, čuvanje i numerička obrada izmjerenih podataka. **Nedostaci digitalnih mjerila** su relativna skupoća na tržištu, nepreglednost kod velikog broja istovremenih očitavanja i osjetljivost na smetnje, posebno onih koji se napajaju iz mreže.

Danas je uobičajeno da digitalni multimetri pored digitalnog imaju također i **analogno pokazivanje**. Broj znamenki digitalnog pokaznika u nekom mjernom instrumentu je osobina koja omogućava bolju rezoluciju i veću točnost. Uobičajeni su s četiri, ali u upotrebi su i oni s više znamenki. Pri tomu, ako nije neophodno koristiti sve znamenke potpuno koriste se indikatori s naznakom ove nepotpunosti. Primjerice indikator s znamenke $4 \frac{1}{2}$ ima pet decimalnih mjesta, ali je prvo nepotpuno i na njemu se ne može pokazati sve brojeve. Obično se "ogoli" znamenka s najvišim pozicijskim mjestom u korist npr. znakova polariteta (+ ; -). Tada se nepotpuni segmentni indikator vrednuje s pola znamenke (u ovom primjeru na prvom mjestu mogu biti 0 i 1).

2.1.3 KARAKTERISTIKE KVAZIANLOGNIH INSTRUMENATA

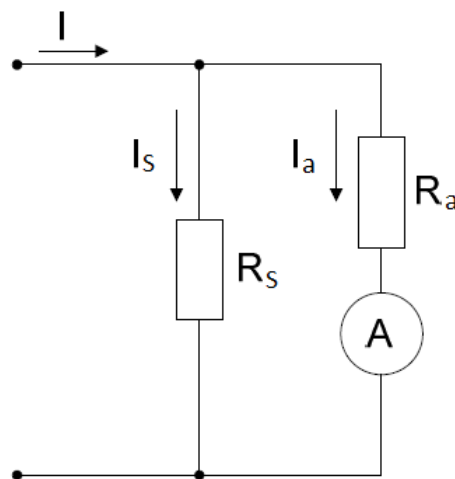
Kvazianalogni instrumenti su elektronički instrumenti na kojima se mjerena veličina očitava duljinom stupca, neprekinutog ili sastavljenog od niza elemenata, u odnosu na ljestvicu. Oni kombiniraju dobre značajke analognih instrumenata (analogno očitavanje) s prednostima digitalnog prikaza (zanemarive pogreške zbog paralakse, mogućnost očitavanja pri slaboj rasvjeti itd.).

2.1.4 PROŠIRENJE MJERNOG OPSEGA INSTRUMENTA

Ukoliko mjerni opseg instrumenta nije dovoljan za mjerenje, potrebno je izvršiti proširivanje mjernog opsega ugradnjom predotpornika (R_p) ili paralelnog otpornika (R_s – shunta). Proširenje strujnog i naponskog mjernog opsega koristi se i kod istosmjernih i izmjeničnih mjernih instrumenata. Proširenje strujnog i naponskog mjernog opsega uz pomoć ugradbenih paralelnih otpornika i predotpornika nudi manje mogućnosti nego korištenje vanjskih elemenata. Uz pomoć ugradbenih paralelnih otpornika i predotpornika proširuje se samo mjerni opseg osnovnog mjernog sustava instrumenta, dok uz pomoć vanjskih elemenata moguće je dodatno proširiti svaki mjerni opseg instrumenta. Također proširenje strujnog i naponskog mjernog opsega moguće je uz pomoć strujnih i naponskih mjernih transformatora.

2.1.4.1 Proširenje strujnog mjernog opsega

Proširenje mjernog opsega ampermetra izvršava se paralelnim spajanjem paralelnog otpornika (R_s) odnosno shunta. Na takav način imat ćemo podjelu struje na dva dijela prema 1. Kirchhoffovom zakonu. Veličina struje (I_s) koja teče kroz paralelni otpornik ovisi o vrijednosti otpora tog otpornika i napona paralelnog spoja. Zbog toga se stavlja paralelni otpornik poznatog iznosa struje koja prolazi kroz njega. Kako bi se izbjegao utjecaj temperature na rad ampermetra, u seriju s njim spaja se kompenzacijski otpornik (R_a). Proširenje strujnog mjernog opsega može se postići također sa nekoliko shuntova, ovisno o mjernom području instrumenta.



Slika 2.1.4.1-1 Proširenje mjernog opsega ampermetru

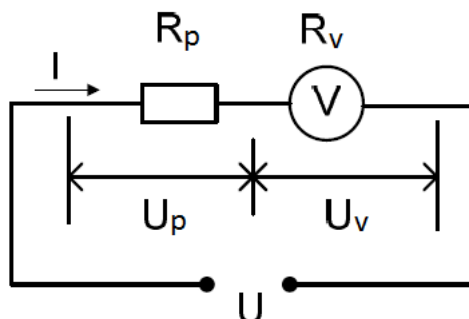
Otpor paralelnog otpornika računa se prema izrazu:

$$R_s = R_a \cdot \frac{I_a}{I - I_a}$$

Ako je $I \gg I_a$ onda vrijedi $R_s < R_a$.

2.1.4.2 Proširenje naponskog mjernog opsega

Proširenje mjernog opsega voltmetra potrebno je serijski spojiti predotpornik (R_p), koji će povećati ukupni otpor strujnom krugu voltmetra. Na takav način sprječava se povećanje struje kroz voltmetar preko dopuštene vrijednosti. Visina napona na predotporniku ovisi o dozvoljenoj struji voltmetra i vrijednosti samog otpornika R_p . Proširenje mjernog opsega temelji se na 2. Kirchhoffovom zakonu za napone u serijskom spoju.



Slika 2.1.4.1-2 Proširenje mjernog opsega voltmetru

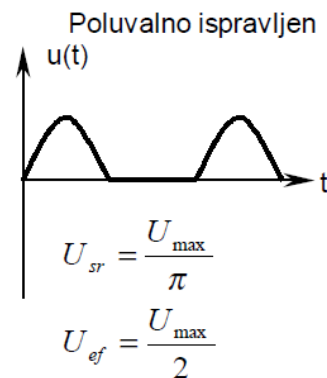
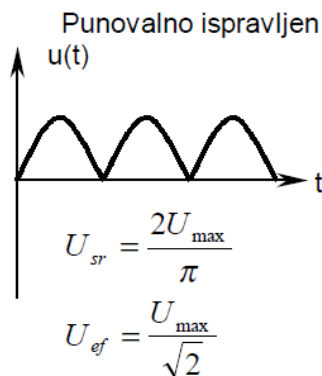
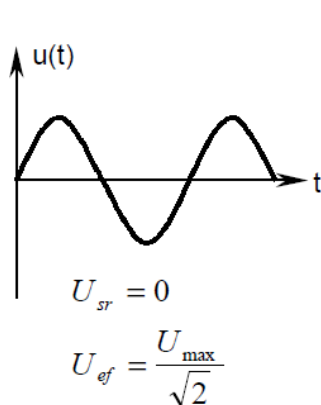
Otpor predotpornika računa se prema izrazu:

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

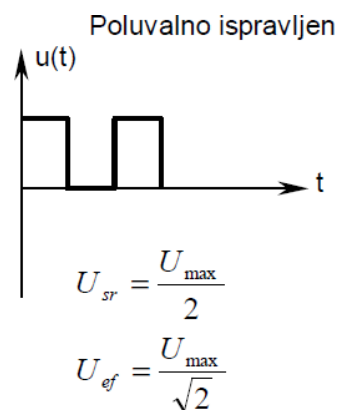
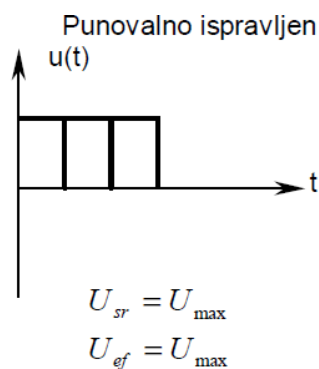
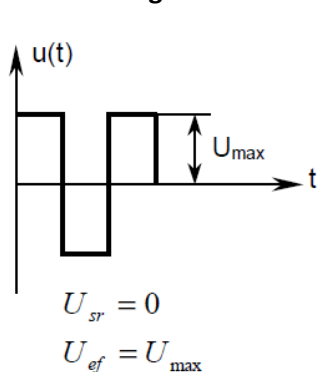
Ako je $U \gg U_v$ onda vrijedi $R_p > R_v$.

2.1.4 SVOJSTVA SIGNALA

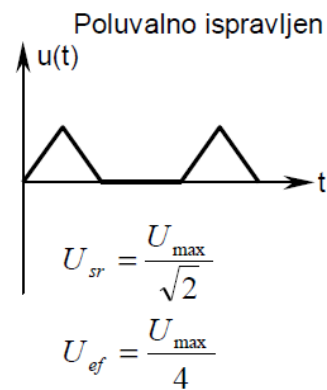
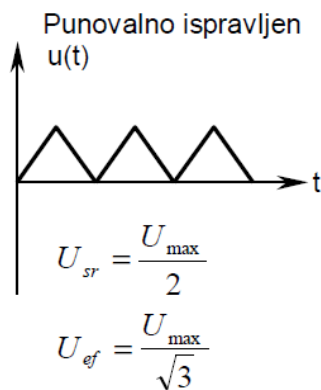
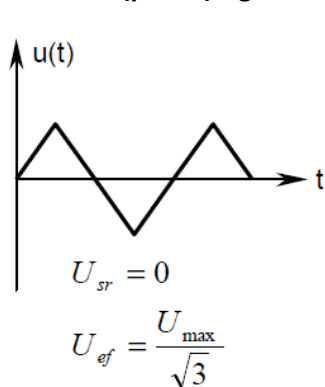
Sinusni signal:



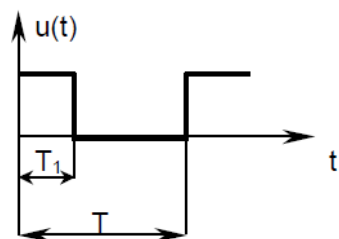
Pravokutni signal:



Trokutasti (pilasti) signal:



Impulsni signal:

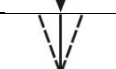


$$U_{ef} = U_{max} \frac{T_1}{T} \quad U_{ef} = U_{max} \sqrt{\frac{T_1}{T}}$$

2.2 ANALOGNI MJERNI INSTRUMENTI S JEDNODIMENZIONALNIM PRIKAZOM

2.2.1 PODJELE ANALOGNIH MJERNIH INSTRUMENATA

Analogne mjerne instrumente možemo podijeliti prema **izvedbi** (elektromehanički tj. klasični i elektronički), **načelu rada** i **načinu prikazivanja**.

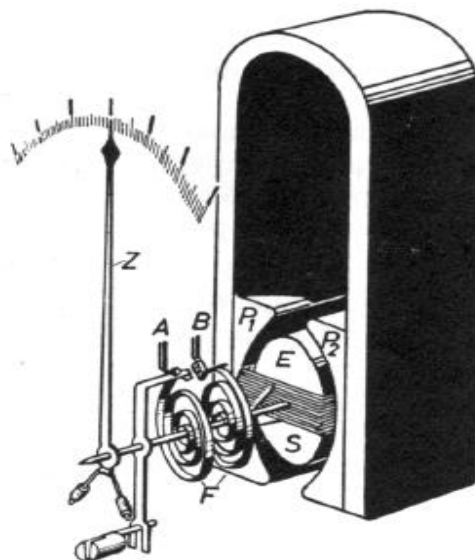
Podjela prema načelu rada	
Simbol	Naziv mjernog instrumenta
	Instrument s pomičnim svitkom i permanentnim (trajnim) magnetom
	Instrument s pomičnim magnetom
	Elektrostatički instrument
	Instrument s pomičnim svitkom i ispravljačem
	Instrument s pomičnim željezom
	Elektrodinamički instrument
	Instrument s unakrsnim svitcima
	Indukcijski instrument
	Termički instrument
	Vibracijski instrument

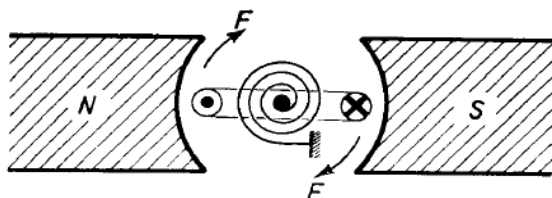
Tablica 2.2.1-1 Podjela analognih elektromehaničkih instrumenata

2.2.2 INSTRUMENTI S POMIČNIM SVITKOM I PERMANENTNIM (TRAJNIM) MAGNETOM

Instrument s pomičnim svitkom i permanentnim magnetom koristi se za mjerenje istosmjernih struja i napona. Znamo da na vodič u magnetskom polju kojim teče električna struja djeluje sila (pravilo lijeve ruke), što ovisi o smjeru struje i indukcije. U stalno magnetsko polje permanentnog (potkovičastog) magneta polnih nastavaka P_1 i P_2 sa jezgrom (E) između polova u obliku valjka od mekog željeza, učvršćen je svitak (S) koji se može okretati. Zračni raspored se odabire tako da magnetska indukcija u njemu bude stalna, tj. da vlada homogeno magnetsko polje. Što je veća indukcija u zračnom rasporedu povećava se i osjetljivost instrumenta. U tom zračnom rasporedu između polnih nastavaka i jezgre nalazi se lagani aluminijski okvir koji se može okretati oko osovine. Svitak je namotan vrlo tankom bakrenom žicom promjera 0.1 mm, dok je kazaljka (Z) mehanički povezana sa svitkom. Struja na svitak dovodi se preko spiralnih opruga (F), te priključaka A i B . Prolaskom struje kroz žicu svitka javlja se zakretni moment koji nastaje zbog pojave magnetske sile. On pomiče kazaljku iz ravnotežnog položaja, a zaustavlja se u onom položaju na ljestvici instrumenta gdje su izjednačeni aktivni mehanički moment i protumoment spiralnih opruga.

Slika 2.2.2-1 Prikaz mjernog sustava instrumenta s pomičnim svitkom i trajnog magnetom





Slika 2.2.2-2 Načelo rada instrumenta s pomičnim svitkom i trajnog magnetom

Svitak protjeran strujom stvara magnetsko polje. Tada dolazi do uzajamnog djelovanja tog magnetskog polja i polja permanentnog magneteta. Stvara se zakretni moment koji otklanja pomični dio instrumenta na koji je spojena kazaljka. Unutar cijelog pokaznog opsega ljestvice otklon je razmjernan struji kroz svitak, zbog toga što je magnetsko polje u zračnom rasporu, gdje se svitak giba konstantno. Silu koju tvori struja kroz svitak (i), magnetska indukcija (B) i ukupna dužina vodiča u magnetskom polju sa brojem zavoja (N) i dužinom stranice svitka (h), zajedno sa visinom svitka (d) tvore zakretni moment M_1 , gdje je još M_2 protumoment spiralnih opruga, k_1 , k_2 , k_3 stalnice, a α otklon kazaljke. Ta se fizikalna pojava može opisati izrazom:

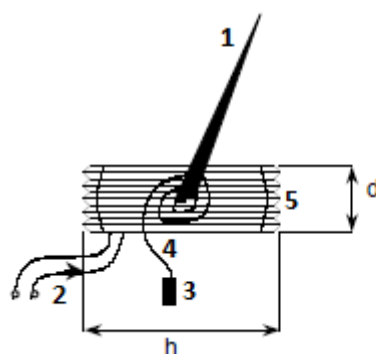
$$M_1 = B \cdot N \cdot i \cdot h \cdot d$$

odnosno imamo

$$M_1 = k_1 \cdot i \quad ; \quad M_2 = -k_2 \cdot \alpha$$

i vrijedi

$$M_2 + M_1 = 0 \quad ; \quad \alpha = \frac{k_1}{k_2} \cdot i = k \cdot i$$



- 1 Kazaljka
- 2 Struja
- 3 Učvršćenje opruge za kućište
- 4 Spiralna opruga
- 5 Svitek

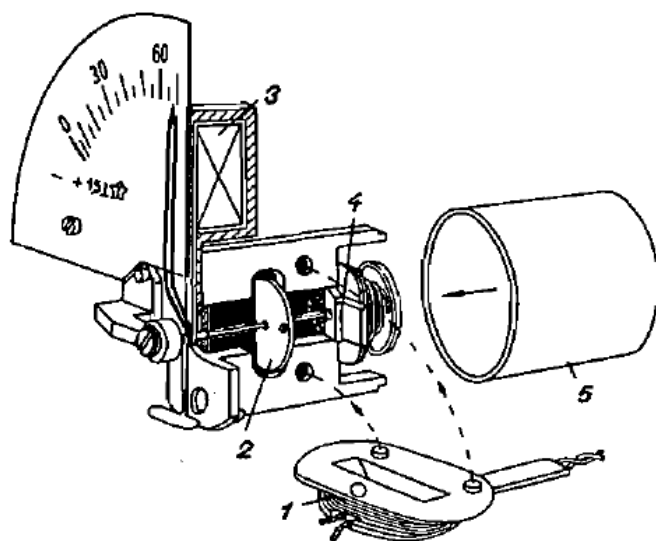
Slika 2.2.2-3 Pokretni dio instrumenta s kazaljkom i zavojnicom

Ako takav instrument ima ljestvicu izraženu u amperima, naziva se **ampermetar** i služi za mjerenje jakosti električne struje, gdje ga se treba **serijski priključiti u strujni krug** tako da mjeri svu struju koja teče tim krugom. Zato ampermetar mora imati vrlo malen električni otpor. Ako opisani instrument ima ljestvicu izraženu u voltima, naziva se **voltmetar** i služi za mjerenje električnog napona. Za razliku od ampermetra, voltmetar ima ugrađen vrlo veliki otpor, a to je zato da bi kroz njega tekla vrlo slaba struja, jer on mora mjeriti samo napon između onih točaka strujnog kruga, na koje je priključen. Zbog toga se voltmetar **paralelno priključuje u strujni krug** odnosno spaja paralelno potrošaču.

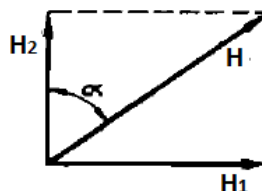
Kao što je već rečeno instrument s pomičnim svitkom i permanentnim magnetom upotrebljava se samo za mjerenje istosmjernih struja i napona. Ako na mjerni sustav tog instrumenta dođe **izmjenična struja**, pomični dio instrumenta suviše je trom da bi mogao pratiti promjenu smjera struje u ritmu frekvencije, pa kazaljka titra oko ravnotežnog položaja. To može dovesti do uništenja instrumenta, jer mjeritelj nema informaciju o jakosti električne struje koja je priključena na svitak. **Prednosti** ovih instrumenta su velika osjetljivost, linearnost ljestvice na cijelom mjernom opsegu i neovisnost o utjecaju stranih magnetskih polja. Zbog toga se mjerni sustav instrumenata s pomičnim svitkom primjenjuje i kao analogni indikator električnih instrumenata.

2.2.2 INSTRUMENTI S POMIČNIM MAGNETOM

Princip rada **instrumenta s pomičnim magnetom** temelji se na djelovanju magnetskog polja na magnetsku iglu koja se postavlja u smjeru magnetskih silnica magneta. Ovakvi instrumenti su jednostavni za primjenu, malih dimenzija u odnosu na druge instrumente iste veličine, te neosjetljivi na vibracije. **Primjenjuju** se za mjerenje istosmjernih struja i napona, za pokazivanje punjenja i pražnjenja akumulatora, za razvodne ploče, prijenosne pogonske i laboratorijske instrumente itd. Instrumenti s pomičnim magnetom sastoje se od jedne male magnetske igle i jednog svitka kroz koji teče mjerena struja, čije polje otklanja iglu. Protumoment stvara drugo magnetsko polje dobiveno pomoću posebnog nepomičnog magneta ili drugog svitka, no također se može koristiti spiralna opruga.



1. Svitak protjecan mjerenom strujom
2. Pomični magnet
3. Lopatica za zračno prigušenje
4. Nepomični magnet
5. Zaštitni željezni oklop



Slika 2.2.2-1 Prikaz instrumenta s pomičnim magnetom

Na magnetsku iglu djeluje jakost polja (H_1) što ga stvara svitak kroz koji protječe mjerena struja i jakost polja (H_2) dobivenog pomoću nepomičnog permanentnog magneta. Magnetska igla će se postaviti u smjeru rezultatne vrijednosti polja H . Promjena mjerene struja uzrokuje promjenu veličine polja H_1 , a time i samu promjenu položaja pomične igle. Zakretni moment razmjernan je jačini struje, a kako je magnetsko polje radialno, ljestvica je linearna. Utrošak snage ovih instrumenta je veći nego kod instrumenta s pomičnim svitkom, a iznosi otprilike od 10 do 100 mW. Uglavnom se izrađuje u klasi 1 do 2.5, ali se može postići i klasa točnosti 0.2.

2.2.3 ELEKTROSTATIČKI INSTRUMENTI

Elektrostatičke instrumente predstavlja kondenzator s jedno ili više nepomičnih ploča, te jednom ili više pomičnih ploča, a koje su povezane sa sustavom za pokazivanje vrijednosti elektrostatskog napona. Kada se na instrument narine mjerni napon, između elektroda dolazi do djelovanja sile (F) koja nastoji povećati kapacitet kondenzatora, odnosno energiju električnog polja. Ploče se pod djelovanjem elektrostatičkog pola pomiču i svoje kretanje prenose na kazaljku koja pokazuje mjernu vrijednost. Sila F , koja djeluje na pomičnu ploču možemo odrediti pomoću izraza:

$$F = \frac{1}{2} U^2 \frac{\Delta C}{\Delta d}$$

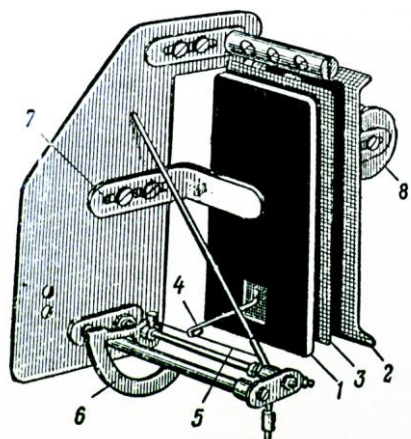
gdje je ΔC – promjena kapaciteta, a Δd – promjena pomaka ploča između kondenzatora

Sila je proporcionalna kvadratu napona, stoga se elektrostatički instrument koristi za mjerenja istosmjernih napona i efektivne vrijednosti izmjeničnih napona. Također postoje izvedbe ovakvih instrumenata gdje se umjesto pomicanja razmaka između ploča mijenja površina (ploština) pomične ploče kondenzatora. **Prednost** elektrostatičkih instrumenata je vrlo niska potrošnja energije, pa se

koristi pri mjerenju gdje ne smije doći do opterećenja naponskog izvora. Ovakvi se instrumenti mogu preoptereti s najviše 50% vrijednosti mjernog opsega, jer kod većih preopterećenja dolazi do proboja izolatora (dielektrika) između ploča kondenzatora. Zbog toga se često u serijskom spoju s mjernim sustavom spajaju zaštitni otpornici, a koji ograničavaju struju kod proboja. Vrijednost otpornika ne smije biti prevelika zbog pada napona koji na njima nastaje prolaskom struje.

Točnost elektrostatičkih instrumenta znatno ovisi o mjernom opsegu, a primjenjuje se najčešće kao pogonski instrumenti razreda točnosti 1.5 i 2.5. U novijim izvedbama za više napone proizvode se i kao laboratorijski instrumenti klase točnosti i do 0.2. Kod ovakvih instrumenata nema utjecaja magnetskog polja na mjerenja, a mogu se koristiti za mjerenja na visokim frekvencijama.

Postoji čitav niz **izvedbi elektrostatičkih instrumenta**, kao što su elektroskop (prvi električni mjerni instrument), pločasti elektrostatički instrument, kvadratni elektrometar, elektrostatički voltmetar. U elektrostatičkim mjerenjima najčešće se primjenjuje elektrostatički voltmetar.



1. i 2. Dvije paralelne nepokretne međusobno izolirane ploče
3. Slobodna pločica
4. Pričvršćeni uteg
5. Tanka žica
6. Upravljačka sprega instrumenta
7. i 8. Priključnice instrumenta

Slika 2.2.3-1 Prikaz elektrostatičkog voltmetra

2.2.4 INSTRUMENTI S POMIČNIM SVITKOM I ISPRAVLJAČEM

Instrumenti s pomičnim svitkom sastoje se od žice namotane na aluminijski okvir u kojem se nalazi željezna jezgra u obliku valjka, a koja služi samo za dobivanje homogenog magnetskog polje pravilom lijeve ruke prema izrazu:

$$F = B \cdot I \cdot l$$

Taj se dio instrumenta nalazi među polovima jakog permanentnog magneta s polnim nastavcima među kojima vlada jako magnetsko polje. Struja se dovodi u svitak od namotane žice preko međusobno izoliranih spiralnih pera. Kada struja poteče svitkom, on će se zakrenuti i nastojati postaviti se okomito na smjer magnetskog polja, ali to sprečavaju spiralna pera. Na osovinu valjka nalazi se kazaljka. Što je struja jača, to je otklon veći. Zbog svojih velikih **prednosti** i dobrih mjernih svojstava instrument s pomičnim svitkom primjenjuje se za mjerenje istosmjernih veličina, dok uz određene prilagodbe njegovom mjernom sustavu služi također za mjerenje izmjeničnih veličina i otpora (univerzalni instrument). Da bi se mogla mjeriti struja sinusnog valnog oblika, potrebno ju je ispraviti prije dovođenja na mjerni sustav. Zato se u instrument ugrađuju **poluvalni ili punovalni poluvodički ispravljači** odnosno Gretzov spoj dioda. Oni omogućuju da na mjerni sustav instrumenta uvijek dolazi (za vrijeme trajanja obaju poluperioda izmjeničnih signala) struja istog smjera. Otklon instrumenta razmjernan je srednjoj vrijednosti izmjenične struje sinusnog valnog oblika, stoga možemo reći da instrument s pomičnim svitkom i permanentnim magnetom, s ugrađenim poluvodičkim ispravljačem ima odziv na srednju vrijednost. No, ljestvica instrumenta umjerava se u efektivnim vrijednostima sinusne veličine faktora oblika ξ_0 . Pri mjerenju nesinusne veličine s faktorom oblika ξ takvim instrumentom nastaje pogreška prema izrazu:

$$p\% = \frac{\xi_0 - \xi}{\xi} \cdot 100\%$$

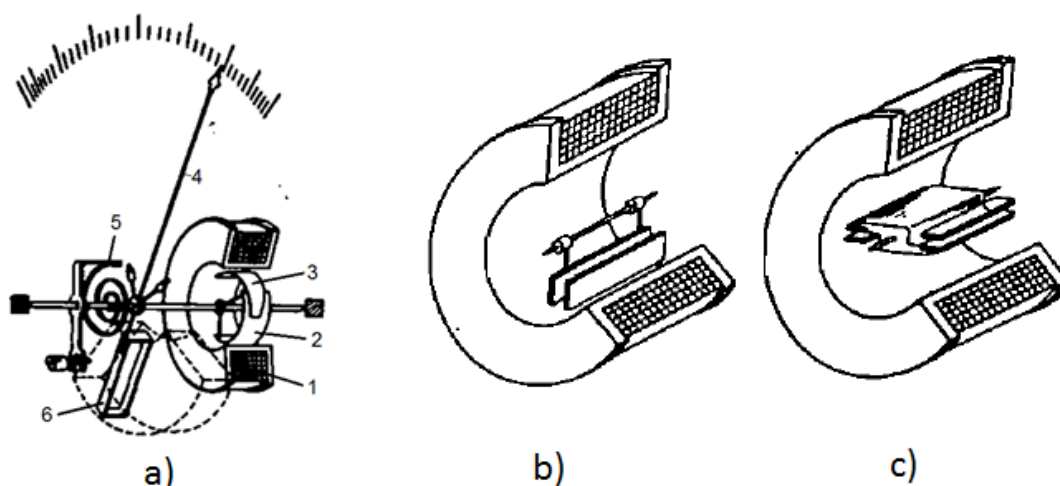
Zato se tijekom izrade mjernog instrumenta na ljestvicu bilježe efektivne vrijednosti izmjerene električne veličine, odnosno srednja vrijednost koju pokaže instrument pomnožena s brojem 1.11.

2.2.5 INSTRUMENTI S POMIČNIM ŽELJEZOM

Instrumenti s pomičnim željezom (ferodinamički instrumenti ili instrumenti s mekim željezom) koriste se za mjerenje izmjeničnih veličina (struje i napona). Prema konstrukciji su najjednostavniji električni instrumenti, a primjenjuju se u pogonskim odnosno laboratorijskim mjerenjima. Instrumenti se proizvode u dvije osnovne izvedbe, a to su:

- Instrument s pomičnim željezom i okruglim svitkom
- Instrument s pomičnim željezom i plosnatim svitkom

2.2.5.1 Instrumenti s pomičnim željezom i okruglim svitkom



Slika 2.2.5.1-1 Instrument s pomičnim željezom i okruglim svitkom a), laboratorijski instrument s pomičnim željezom i okruglim svitkom: b) s jednim parom listića od mekog željeza; c) s dva para listića od mekog željeza

U prstenastom nepomičnom svitku (1) s N zavoja nalaze se dvije pločice od mekog željeza, gdje je jedna pločica (pravokutna i savijena u luk) pomična (2) i učvršćena je na osovinu, a druga (trapezastog ili klinastog oblika) nepomična (3) i učvršćena na stijenku svitka. Kazaljka (4) je učvršćena na osovinu instrumenta, uz spiralnu oprugu (5) i zračnu i gravitacijsku kočnicu (6).

Prolaskom mjerne struje kroz zavoje nepomičnog svitka dolazi do stvaranja magnetskog toka u unutrašnjosti svitka koji je razmjernan toj struji. Magnetski tok magnetizira obje pločice od mekog željeza, a kako su njihovi polovi okrenuti na istu stranu, one se odbijaju silom prema izrazu:

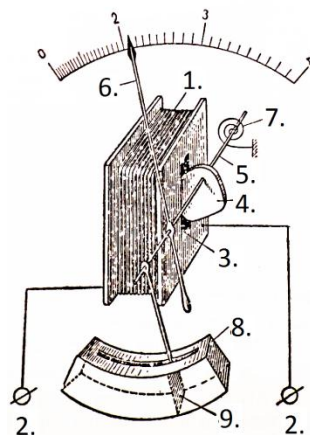
$$F = \frac{1}{2} I^2 \frac{\Delta L}{\Delta d}$$

gdje je ΔL – promjena induktiviteta, a Δd – promjena pomaka pločica

Što se pločice više udaljuju, početna sila pada s kvadratom udaljenosti istoimenih polova, dok raste s kvadratom struje kroz zavoj, pa im odgovara kvadratična ljestvica. Ovakvi mjerni instrumenti mogu imati mješovitu ljestvicu, gdje sa posebnim oblikom pločica prema kraju svakog mjernog opsega dobiva odbojna sila približno proporcionalna struji. Takva ljestvica je na početku mjernog opsega kvadratičnu, a prema kraju linearnu. Kako listići od mekog željeza svojim magnetskim svojstvima lako slijede promjene magnetskog polja svitka, kod ovih instrumenata zakretni moment ne mijenja smjer kod promjene smjera struje. **Primjenjuju** se kod mjerenja istosmjernih veličina i izmjeničnih efektivnih veličina niskih frekvencija, a **proizvode** se kao pogonski i laboratorijski ampermetri i voltmetri razreda točnosti od 1.5 do 2.5, ali su posebnim izvedbama točnosti od 0.2 do 0.5.

2.2.5.2 Instrument s pomičnim željezom i plosnatim svitkom

Instrumenti s pomičnim željezom i plosnatim svitkom se rjeđe koriste jer imaju kvadratičnu ljestvicu, a ona zbog poteškoća kod očitavanja malih vrijednosti nisu poželjne u mjernoj tehnici.



1. Plosnati svitak
2. Priključnice instrumenta
3. Šupljina unutar plosnatog svitka
4. Ekscentrično postavljena pločica od mekog željeza
5. Pokretna osovina instrumenta
6. Kazaljka instrumenta
7. Spiralna opruga
8. Zatvorena kutija
9. Krilca za prigušenje titranja

Slika 2.2.5.2-1 Prikaz instrumenta s pomičnim željezom i plosnatim svitkom

U nepokretni svitak dolazi struja i u njemu se stvara magnetski tok koji magnetizira pločicu od mekog željeza na ulazu u svitak. Svitak djelovanjem polja uvlači magnetiziranu pločicu u šupljinu silom proporcionalno kvadratu struje prema izrazu:

$$M \sim I^2$$

2.2.6 ELEKTRODINAMIČKI INSTRUMENTI

Elektrodinamički instrumenti imaju načelo rada zasnovan na djelovanju sile između dvaju vodiča protjeranim strujom. Ako vodičima teče struja u istom smjeru, sila je privlačna, a odbojna je ako struje teku u suprotnom smjeru. Elektrodinamički se instrumenti **primjenjuju** za mjerenje istosmjernih i izmjeničnih veličina, a koriste se kao ampermetri, voltmetri i vatmetri.

Kod **elektrodinamičkih ampermetra** oba su svitka serijski spojena, a kroz njih istovremeno prolazi mjerna struja I . Oba su svitka izvedena od debele žice. Elektrodinamički ampermetri imaju kvadratičnu ljestvicu jer im je pomični (zakretni) moment razmjernan je kvadratu mjerene struje:

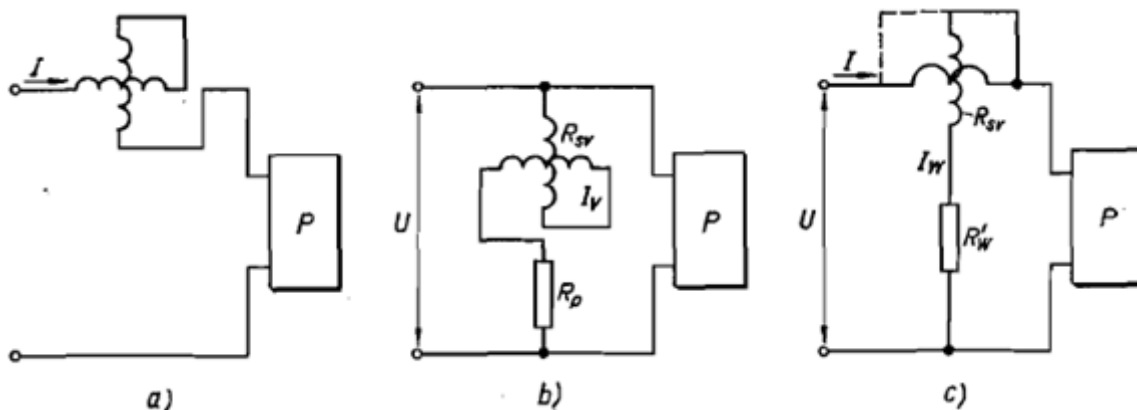
$$M \sim I^2$$

Elektrodinamički voltmetri imaju svitke međusobno spojene serijski, a zajednički su s odgovarajućim predotporom priključeni paralelno s mjestom mjerenja napona (trošilo ili izvor). Oba su svitka namotana s mnogo zavoja vrlo tanke žice i ne smije ih se izravno priključiti na mjereni napon da ne bi došlo do njihovog oštećenja. Naponski svitak potrebno je spojiti preko predotpora, kako kroz njega ne bi potekla prejak struja i uništila ga. Elektrodinamički voltmetri također imaju kvadratičnu ljestvicu jer je pomični moment razmjernan umnošku struja kroz svitke odnosno razmjernan kvadratu mjernog napona:

$$M \sim U^2$$

Elektrodinamički vatmetri se najčešće primjenjuju kao elektrodinamički instrumenti. Jedan svitak namotan je s malo zavoja deblje žice u serijskom spoju, a drugi svitak, namotan s mnogo zavoja tanke žice spojen paralelno mjernom mjestu (izvoru, trošilu ili kombinaciji trošila). Na takav način omogućeno je mjerenje snage izvora ili trošila. Serijskim svitkom teče mjerna struja I , a paralelni struja I_w razmjerna naponu narinutom na svitak. Također naponski svitak potrebno je spojiti preko predotpora, kako kroz njega ne bi potekla prejak struja i uništila ga. Pomični (zakretni) moment razmjernan je umnošku struje kroz strujni svitak i narinutog napona na naponskom svitku instrumenta:

$$M \sim I \cdot U$$



Slika 2.2.6-1 Spajanje svitaka elektrodinamičkog instrumenta: a) za mjerenje struje; b) za mjerenje napona; c) za mjerenje snage

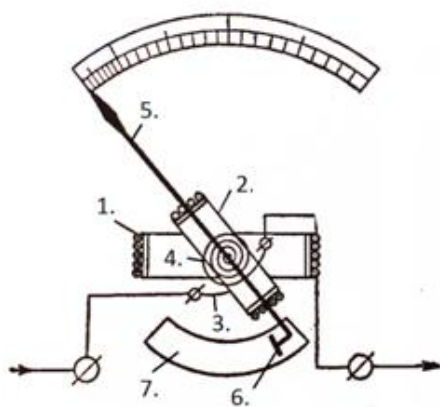
Elektrodinamičke instrumente **prema vrsti** možemo podijeliti na:

- Elektrodinamički instrumenti bez željeza
- Elektrodinamički instrumenti zaštićeni ili zatvoreni željezom
- Astatički elektrodinamički instrumenti

Od svih elektrodinamičkih instrumenata najširu primjenu u laboratorijskim mjerenjima imaju instrumenti bez željeza. Elektrodinamički voltmetri i ampermetri se danas rijetko koriste zbog jednostavnijih i jeftinijih instrumenata s pomičnim željezom. Međutim, elektrodinamički vatmetri prevladavaju kao laboratorijski i pogonski instrumenti za mjerenje snage.

2.2.6.1 Elektrodinamički instrumenti bez željeza

Slika 2.2.6.1-1 Prikaz elektrodinamičkog inst. bez željeza



Elektrodinamički instrumenti bez željeza sastoje se od nepomičnog svitka (1) namotan s manje zavoja deblje žice i pomičnog svitka (2) namotan s mnogo zavoja vrlo tanke žice. Pokretni svitak nalazi se unutar nepomičnog i okreće se na osovinu (3) za koju su učvršćene dvije spiralne opruge (4) i kazaljka (5). Spiralne opruge služe za ostvarenje protumomenta, te za dovod struje zakretnom svitku. Na donjem kraju kazaljke nalazi se krilce (6) koje pokretanjem kroz lučni kanal (7) prigušuje titranje pomičnog sustava. Mjerna struja dovodi se na oba svitka koji mogu biti spojeni serijski, ili svaki od njih posebno u strujni krug. Na stranice obaju svitka, koje su paralelne s osovinom, djeluje sprega elektrodinamičkih sila prema izrazu:

$$F = \mu_0 \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot N_1 \cdot N_2 \cdot \frac{l_1}{l_2}$$

gdje je I_1 – struja kroz nepomični svitak, I_2 – struja kroz pomični svitak, N_1, N_2 – broj zavoja svitaka, l_1, l_2 – duljine nepomičnog odnosno pomičnog svitka po magnetskoj osi.

Sve vrijednosti osim struja određene su isključivo konstrukcijom svitka, pa se stoga mogu unaprijed odrediti i pretvoriti u konstantnu vrijednost k prema izrazu:

$$F = k \cdot I_1 \cdot I_2$$

Iz toga slijedi da je pomični (zakretni) moment razmjeran je umnošku struje kroz svitke i iznosi:

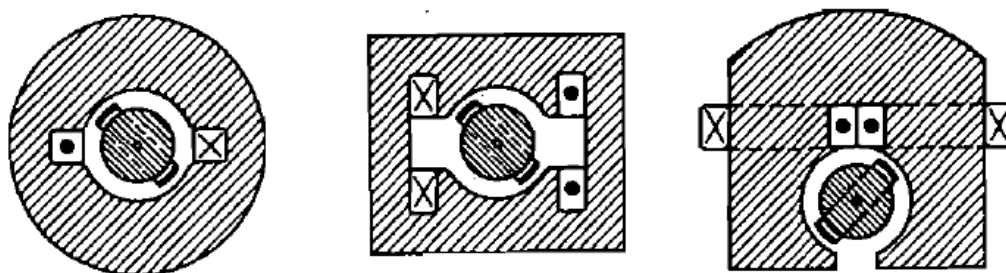
$$M \sim I_1 \cdot I_2$$

Elektrodinamički instrumenti bez željeza izrađuju se gotovo isključivo kao precizni instrumenti (najviše kao vatmetri), gdje im je pokazivanje istosmjernih i izmjeničnih vrijednosti na nižim

frekvencijama gotovo jednako. Male razlike u pokazivanju na izmjeničnoj struji mogu nastati zbog induktiviteta pomičnog svitka i zbog međuinuktiviteta između nepomičnog i pomičnog svitka.

2.2.6.2 Elektrodinamički instrumenti zaštićeni ili zatvoreni željezom

Elektrodinamički instrumenti zaštićeni ili zatvoreni željezom se izrađuju zbog zaštite od utjecaja vanjskih magnetskih polja. Jezgra i jarem su izrađeni od kvalitetnog, tankog i izoliranog magnetskog lima, a sve u svrhu smanjenja gubitaka vrtložnih struja. Nažalost kod ovakvih instrumenata ne može se postići visoka točnost kao kod elektrodinamičkih instrumenata bez željeza. Razlog tomu je ovisnost permeabiliteta magnetskog lima (μ) o jakosti magnetskog polja. Klase točnosti elektrodinamičkih instrumenata kreću se od 0.5 do 1. Uglavnom se koriste na nižim frekvencijama jer imamo gubitke u željezu uslijed zagrijavanja na višim frekvencijama. Zbog limova od mekog željeza još se nazivaju **ferodinamički instrumenti**, a koriste se kao laboratorijski instrumenti.



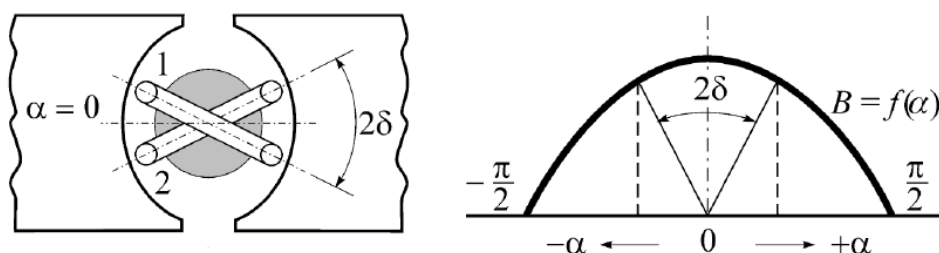
Slika 2.2.6.2-1 Razne izvedbe elektrodinamičkog instrumenta zatvorenim željezom

2.2.6.3 Astatički elektrodinamički instrumenti

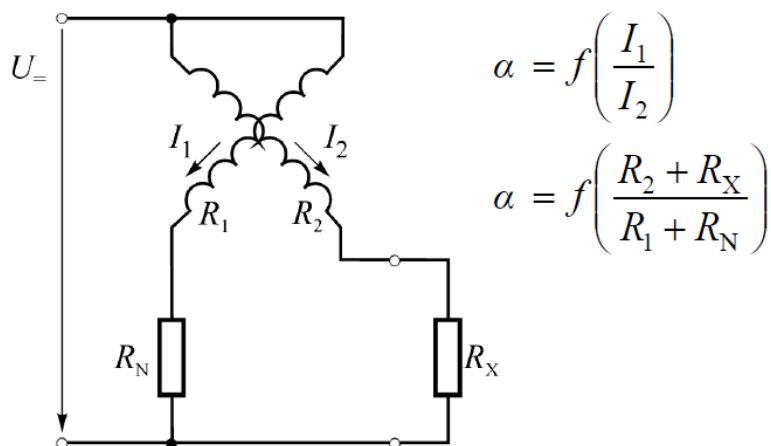
Astatički elektrodinamički instrumenti nisu zatvoreni ili zaštićeni željezom, a pružaju najbolju zaštitu od utjecaja vanjskih magnetskih polja na rezultat mjerenja. Instrument je izveden sa dva mjerna sustava koji su postavljeni na istoj osovinu, kroz koje teku struje suprotnih smjerova. Djelovanjem vanjskog magnetskog polja na instrument, jedan sustav potpomaže, a drugom slabi. Na takav način se eliminira ukupno djelovanje vanjskog magnetskog polja.

2.2.7 INSTRUMENTI S UNAKRSNIM SVITCIMA

Instrumenti s unakrsnim (križnim) svitcima postiže se moment i protumoment pomoću dva vrlo čvrsto povezana svitka koja su međusobno zaokrenuta za kut od 2δ . Svitci se nalaze u zračnom rasporu između polnih nastavaka permanentnih magneta. Zračni raspor je nejednolik, a rezultat toga je negomogeno magnetsko polje. Momenti svitka ne ovise samo o mjernoj struji kroz njih nego i o položaju samih svitaka. Otklon pomičnog (zakretnog) organa je funkcija omjera struja kroz svitak (α), pa se naziva i kvocijentni instrument. Instrumenti s unakrsnim svitcima imaju široku primjenu. Koriste se za mjerenje omjera dviju struja ili napona, napona i struje, odnosno mjerenje otpora. Velika prednost mjerenja otpora pomoću ovih instrumenata proizlazi iz njihove neosjetljivosti na promjene napona napajanja. Utrošak instrumenta s unakrsnim svitcima je nešto veći nego onih s pomičnim svitkom, dok je točnost instrumenta gotovo jednaka. Uzrok toga je nejednolik zračni raspor i veći prostor potreban za smještaj dva svitka.



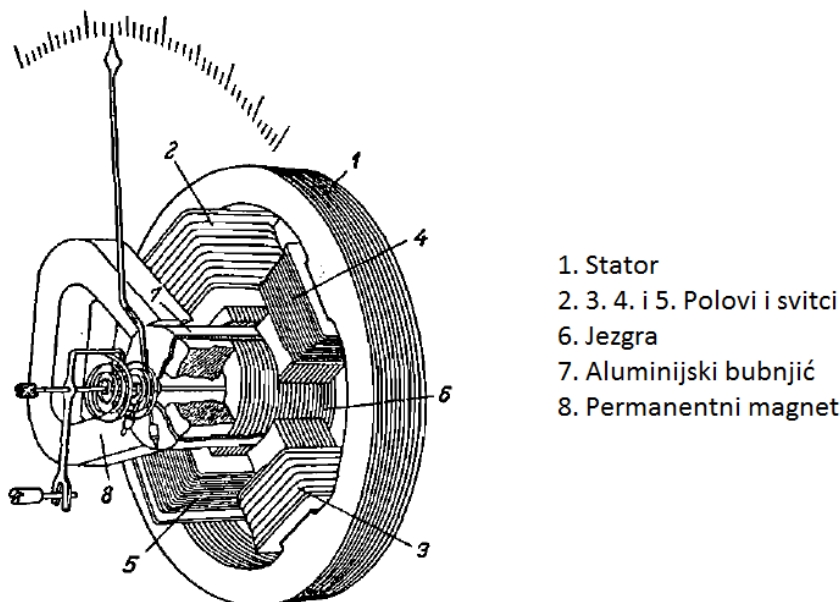
Slika 2.2.7-1 Osnovni prikaz instrumenta s unakrsnim svitcima



Slika 2.2.7-2 Nadomjesna shema instrumenta s unakrsnim svitcima

2.2.8 INDUKCIJSKI INSTRUMENTI

Indukcijski instrumenti slično kao i asinkroni motori imaju okretno magnetsko polje statora koje inducira napon (E) u rotor, a što uzrokuje vrtložne struje i zakretni moment (M). Zakretni moment koji nastaje djelovanjem tih struja zakreće rotor u smjeru okretnog polja.



Slika 2.2.8.-1 Prikaz indukcijskog instrumenta s bubnjićem

Na statoru (1) od transformatorskog lima nalaze se četiri pola okrenuta prema rotoru, a na njima su namotani svitci (2, 3, 4, i 5). Polovi okružuju jezgru (6), koja je također izrađena od transformatorskog lima. U zračnom rasporu između statora i jezgre okreće se aluminijski bubnjić (7). Dva para suprotnih svitaka spojeni su serijski i kroz njih teku izmjenične struje I_1 i I_2 koje stvaraju magnetske tokove ϕ_1 i ϕ_2 , međusobno prostorno pomaknuta za 90° i faznog pomaka ψ . Zakretni moment koji se stvara dan je izrazom:

$$M = k \cdot \phi_1 \cdot \phi_2 \cdot \sin \psi$$

Kada je magnetski tok razmjeran strujama kroz svitke, možemo reći da vrijedi izraz:

$$M = k_1 \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \sin \psi$$

Zakretni moment će postići maksimalnu vrijednost ako je fazni pomak 90° , odnosno ako je $\sin \psi = 1$. Indukcijski instrumenti se koriste za mjerenje izmjeničnih veličina (struja, napona i snage).

Indukcijski ampermetar ima parove suprotnih svitaka spojene paralelno, a time se mjerna struja grana na dva dijela. Da bi se ostvarilo okretno magnetsko polje, potreban je fazni pomak između

struja. Zbog toga se svitcima jednog para polova dodaje u seriju djelatni otpor R , dok se drugi par polova izrađuje tako da ima što veću reaktanciju. Na takav način možemo dobiti zakretni moment koji je proporcionalan kvadratu mjerne struje prema izrazu:

$$M = k \cdot I^2$$

Prema tome induksijski ampermetar ima kvadratičnu ljestvicu (skalu) prikazivanja rezultata.

Indukcijski voltmetar ima jedan par svitaka priključen na mjerni napon preko djelatnog otpora R , koji je spojen u seriju, a drugi par polova preko induktivne reaktancije X (prigušnice). Tako teku struje koje su međusobno pomaknute za fazni pomak od gotovo 90° , a što je uvjet za dobivanje maksimalnoga zakretnog momenta prema izrazu:

$$M = k \cdot U^2$$

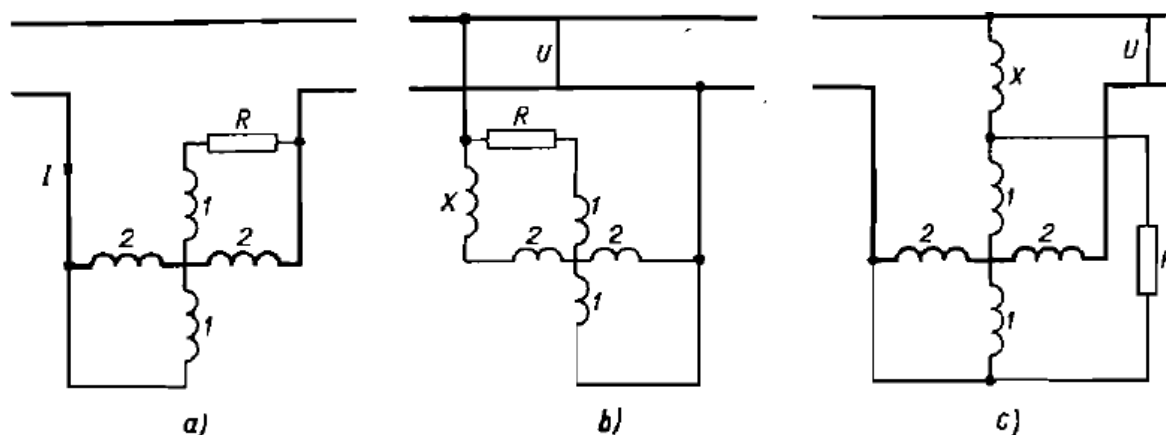
Zakretni moment induksijskog voltmetra proporcionalan je kvadratu napona pa stoga imamo kvadratičnu ljestvicu prikaza rezultata.

Indukcijski vatmetar ima jedan par polova u naponskoj grani, dok kroz drugi par polova teče struja I . Struja u naponskoj grani fazno je pomaknuta za 90° prema naponu, a time se zakretni moment dobiva prema izrazu:

$$M = k_1 \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \sin(90 - \rho) = k \cdot I \cdot U \cdot \cos \rho = k \cdot P$$

Ako koristimo **indukcijski varmetar** za mjerenje jalove snage, fazni pomak između struje i napona mora biti jednak nuli, jer tek tada vrijedi izraz:

$$M = k_1 \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \sin \rho = k \cdot I \cdot U \cdot \sin \rho = k \cdot Q$$

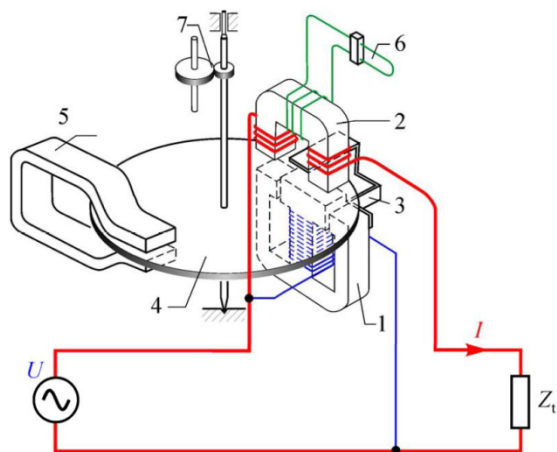


Slika 2.2.8-2 Spajanje svitaka induksijskog instrumenta pri mjerenju struje a), napona b) i snage c)

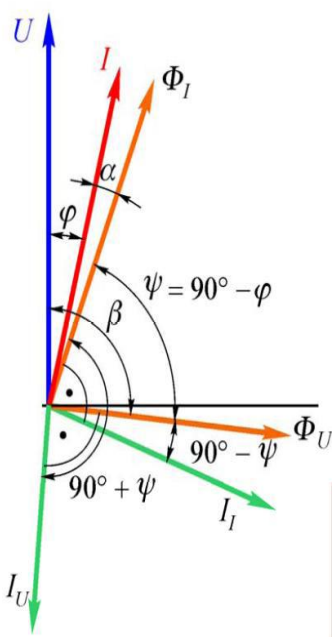
Indukcijski instrumenti ne ovise o vanjskim magnetskim poljima, a ljestvica im može biti do čak 360° . Zbog velikog zakretnog momenta primjenjuje se kao registracijski instrumenti, razreda točnosti 1.5 i 2.5. Najčešće današnje izvedbe ovakvih instrumenata su induksijski instrumenti s okretnim magnetskim poljem i instrumenti s putujućim magnetskim poljem, dok se induksijski instrumenti s kolutom najčešće koriste kao induksijska brojila potrošnje energije.

2.2.8.1 Indukcijska brojila

Utrošak energije se mjeri induksijskim brojilima koji mogu biti spojeni na istosmjernu ili izmjeničnu mrežu napona gdje se mjeri djelatna, jalova i prividna energija. Stoga prema izvedbi ih možemo podijeliti na jednofazna i trofazna induksijska brojila. Rade na principu okretnog magnetskog polja koje se postiže sa dva magnetska polja na strujnim i naponskim svitcima brojila. Brojilo koje mjeri djelatnu energiju ima strujni svitak spojen serijski s trošilom, dok je naponski svitak spojen paralelno trošilu. Oni ostvaruju dva magnetska polja koja su prostorno i fazno pomaknuta za 90° . Takvi tokovi ostvaruju okretno magnetsko polje koje zakreće pločice rotora brojila.



Slika 2.2.8.1-1 Prikaz indukcijskog brojila za izmjeničnu mrežu napona



Slika 2.2.8.1-2 Vektorski dijagram napona i struje

Indukcijska brojila su građena za struje do 100 A (nisko – naponska mreža), a očitavanje može biti u jednoj ili dvjema tarifama do registriranih 10^6 ili 10^7 kWh. Za indukcijsko brojilo definira se **konstanta brojila c** koja se izražava u broju okretanja po kWh. Električna energija izražena u kWh dobiva se prema izrazu:

$$W = \frac{N}{c}$$

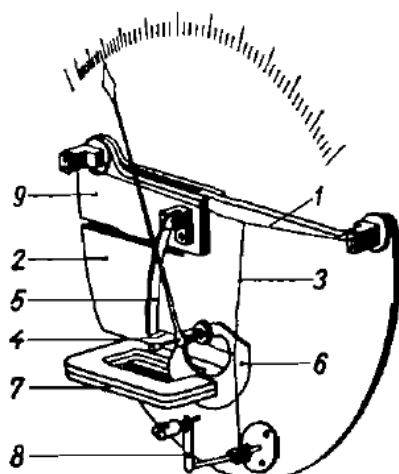
gdje je N – broj okretaja rotora brojila koji je u određenom vremenu t registrirao brojač okretanja. Stoga snaga izražena u vatima računa se prema izrazu:

$$P = \frac{W}{t}$$

2.2.9 TERMIČKI INSTRUMENTI

U ovu skupinu analognih mjernih instrumenata s jednodimenzionalnim prikazom spadaju instrumenti s vrućom žicom, instrumenti s termopretvornikom, bimetalni instrumenti itd.

2.2.9.1 Instrumenti s vrućom žicom



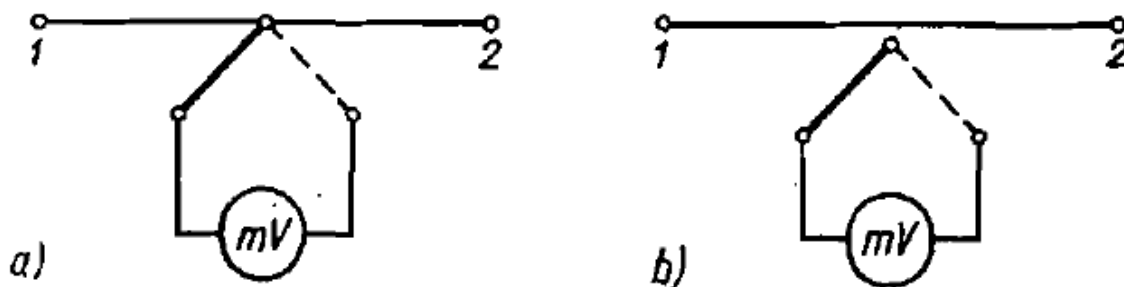
Slika 2.2.9.1-1 Prikaz instrumenta s vrućom žicom

Instrumenti s vrućom žicom zasnivaju se na pojavi rastezanja kovine porastom temperature. Zagrijavanje, a time i istežanje tanke žice velikog temperaturnog koeficijenta istežanja, postiže se pomoću mjerne struje i približno je proporcionalno kvadratu te struje. Također je potrebno da žica ima velik specifičan otpor s malim temperaturnim koeficijentom otpora, visoku točku tališta, dobru mehaničku čvrstoću i otpornost prema koroziji. Materijali koji zadovoljavaju ovakve uvjete su platina, platina-nikal, platina-srebro, manganin i td. Instrumenti s vrućom žicom koriste se za mjerenja efektivnih vrijednosti napona i struje (do 0.5 A) na visokim frekvencijama, te snage u posebnom spoju.

Nedostatak ovakvih instrumenta je njegova osjetljivost na preopterećenje, jer lako dolazi do pregaranje vruće žice. Zbog toga se smiju kratkotrajno preopteretiti najviše dva do tri puta. Danas se ovakvi instrumenti više ne koriste zbog svoje velike potrošnje struje (od 30 do 250 mA) i snage (od 0.1 do 1 W) i slabe preopteretivosti.

2.2.9.2 Instrumenti s termopretvornikom

Termopretvornici omogućuju dobivanje istosmjernih napona koji ovise o efektivnoj vrijednosti mjerne izmjenične struje. Ovakvi instrumenti sastoje se od termoelementa čije se spojno mjesto zagrijava pomoću vruće žice izrađene od manganina, platine i sl., protjerane izmjeničnom mjernom strujom. Termoelement izrađuje se od materijala kao što su bakar-konstantan, manganin-konstantan, kromnikl-konstantan itd.



Slika 2.2.9.2-1 Neizolirani a) i izolirani b) termopretvornik

Na slobodnim krajevima termoelementa dobiva se napon (od 5 do 12 mV) koji je proporcionalan temperaturnoj razlici između spojnog mjesta i hladnih krajeva. Takav napon računamo prema izrazu:

$$U = k_1(\vartheta_1 - \vartheta_0) \approx k_2 I^2 R$$

gdje je U – napon na slobodnim krajevima termoelementa, k_1 i k_2 – konstante, ϑ_0 – temperatura slobodnih hladnih krajeva, ϑ_1 – temperatura spojnog mjesta termoelementa, I – struja grijanja žice, R – otpor vruće žice.

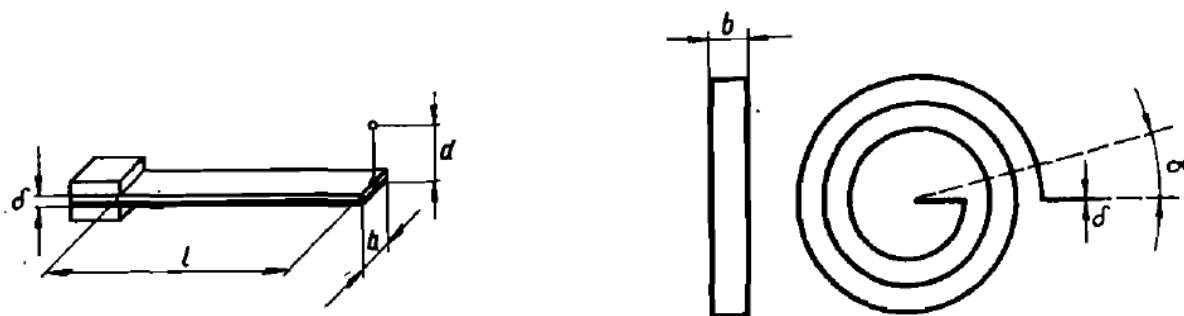
Nedostatak termopretvornika je u malim preopterećenjima koje može podnositi. Svojstvo termopretvornika da stvara istosmjerni napon strogo ovisi o efektivnoj vrijednosti struje zagrijavanja koja se koristi na razne načine u raznim mjernim sustavima. Takvi termopretvornici koriste se za najtočnije usporedbe istosmjernih izmjeničnih struja, a često su dio i elektroničkih uređaja kada se želi mjeriti stvarna efektivna vrijednost izmjenične struje i napona. Instrumenti s pomičnim svitkom i termopretvornikom koriste se za mjerenja izmjeničnih napona od 1 do 500 V, uz utrošak struje od 3 do 10 mA.

2.2.9.3 Bimetalni instrumenti

Bimetalni instrumenti imaju metalnu traku (bimetalna traka) izrađenu od dva materijala po čitavoj dužini, različitih temperaturnih koeficijenata istežanja. Bimetalna traka se pri promjeni temperature izvija na jednu ili drugu stranu. Izvijanje (d) ravne bimetalne trake računa se prema izrazu:

$$d = \frac{K_0 l^2 \Delta\vartheta}{\delta}$$

gdje je K_0 – konstanta koja ovisi o temperaturnim koeficijentima istezanja materijala, l – duljina bimetalne trake, $\Delta\vartheta$ – promjena temperature, δ – debljina bimetalne trake.

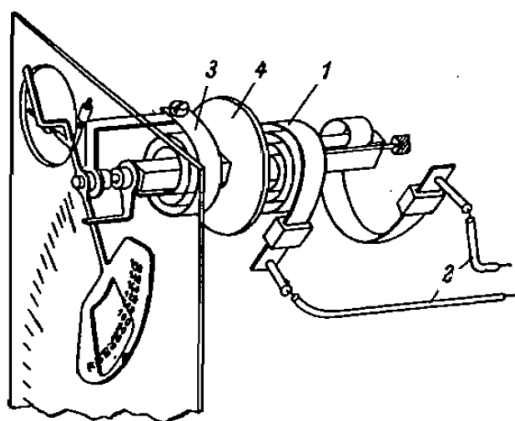


Slika 2.2.9.3-1 Bimetalna traka učvršćena na jednom kraju i bimetalna spirala

Najčešće takve trake se izrađuju od raznih legura željeza, nikla i mangana, čija konstanta K_0 iznosi od 0.06 do $0.16 \cdot 10^{-4}$ ($1/^\circ\text{C}$). No ako je bimetalna traka namotana u spiralu čiji je vanjski kraj učvršćen, slobodni unutarnji kraj zakrene se za kut α prema izrazu:

$$\alpha = \frac{360}{\pi} K_0 \frac{l \Delta\vartheta}{\delta} = \frac{360}{\pi} l \cdot d$$

Kroz spiralu propusti se mjerna struja koja zagrijava spiralu, pa se u skladu s veličinom struje slobodni kraj spirale više ili manje zakrene, a samim time i kazaljka instrumenta. Velika tromost bimetalnih instrumenata pogodna je za pokazivanje efektivne vrijednosti promjenjivih mjernih veličina, pa se stoga koriste za kontrolu opterećenja kabela i transformatora. Temperatura okoline također utječe na zakretanje bimetalne spirale, a to se sprječava dodavanjem još jedne izolirane bimetalne spirale kroz koji ne protječe mjerna struja i djeluje na kazaljku u suprotnom smjeru.



1. Bimetalan spirala kroz koju teče mjerna struja
2. Dovodi struje
3. Dodatna bimetalan spirala zbog utjecaja temperature okoline
4. Izolacijska pločica

Slika 2.2.9.3-2 Prikaz bimetalnog instrumenta

Bimetalni instrumenti se često priključuju preko strujnih transformatora s malim faktorom sigurnosti koji sprječava da struja ne preoptereći mjernu spiralu. Zagrijavanje mjerne spirale raste s kvadratom mjerne struje. Klasa točnosti bimetalnih instrumenata iznosi 1.5 s pogreškom mjerenja do 2.5% maksimalne vrijednosti mjernog opsega.

2.2.10 VIBRACIJSKI INSTRUMENTI

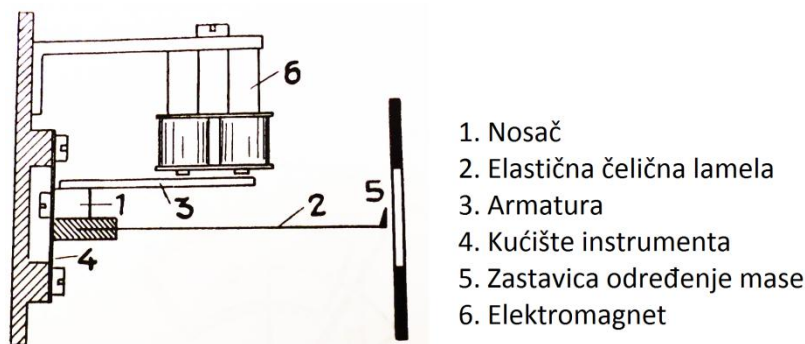
Instrumenti za mjerenja frekvencije (frekvenciometri) najčešće se izrađuju kao:

- Vibracijski instrumenti (rezonancijski frekvenciometri)
- Kvocijntni indukcijski instrumenti
- Kvocijntni instrumenti s pomičnim svitkom i permanentnim magnetom

Vibracijski instrumenti su rezonancijski frekvencimetri koji se dijele u dvije skupine:

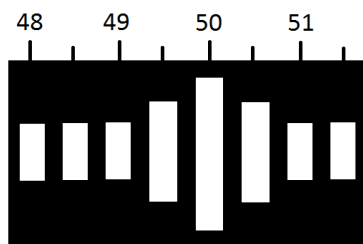
- Frekvencimetri s mehaničkom rezonancijom
- Frekvencimetri s električnom rezonancijom

2.2.10.1 Frekvencimetri s mehaničkom rezonancijom

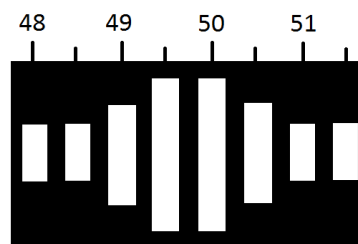


Slika 2.2.10.1-1 Prikaz frekvencimetra s mehaničkom rezonancijom

Frekvencimetri s mehaničkom rezonancijom koriste se na području niskih frekvencija zbog svoje jednostavnosti i trajnosti. Njihov mjerni sustav sastoji se od niza čeličnih jezičaka učvršćenih na nosaču, a koji titraju pod utjecajem elektromagneta priključenog na mjerni izvor. Svaki jezičak projektiran je za određenu rezonantnu frekvenciju, debljine od 0.1 do 0.5 mm, širine od 3 do 5 mm i duljine 20 do 60 mm.



Slika 2.2.10.1-1 Titranje jezička 50 Hz



Slika 2.2.10.1-2 Titranje jezička 49.75 Hz

Frekvencimetri s mehaničkom rezonancijom obično se proizvode u razredima točnosti 0.5 i 1 ali ovise i o procjeni mjeritelja. Ako imamo frekvenciju npr. mreže 50 Hz, rezonira jezičak koji je označen sa 50 Hz, pa izgleda da je njegova zastavica nešto duža od drugih. Susjedni jezički također titraju, ali su znatno manji. Budući da jezičak za 50 Hz najveći, odnosno najviše titra, a dva susjedna podjednako, može se zaključiti da je frekvencija mjernog područja upravo 50 Hz. Na drugoj slici vidimo da podjednako titraju jezički za 49.5 i 50 Hz, što znači da je frekvencija mjernog izvora 49.75 Hz. Instrumenti s jezičcima koriste se za mjerenje frekvencija od nekoliko herca do 1500 Hz. Također se mogu koristiti za mjerenje brzine vrtnje strojeva.

2.2.10.2 Frekvencimetri s električnom rezonancijom

Frekvencimetri s električnom rezonancijom imaju kazaljku pa se još nazivaju i frekvencimetri s kazaljkom. Koriste se za mjerenje frekvencije izmjeničnih mreža sa vrlo uskim mjernim područjem, zbog redovitih malih promjena frekvencije mreže. Najčešće izvedbe ovakvih instrumenata su frekvencimetar s jednom okretnim svitkom i serijskom rezonancijom i frekvencimetar s unakrsnim svitcima i poluvodičkim ispravljačem. Prednost ovakvih instrumenata je u njihovoj kazaljki koja daje preglednost očitavanja, a izrađuju se kao ugradbeni i prijenosni instrumenti.

2.3 ANALOGNI MJERNI INSTRUMENTI S DVODIMENZIONALNIM PRIKAZOM

Analogni mjerni instrumenti koji omogućuju promatranje i mjerenje električnih i neelektričnih veličina u ovisnosti o vremenu ili nekoj drugoj pojavi (temperatura, pomak i sl.) nazivamo analognim instrumentima s dvodimenzionalnim prikazom. U laboratorijskim mjerenjima najčešće se koriste instrumenti s vremenskom bazom, dok manje instrumenti s frekvencijskom bazom (vobler, analizator spektra). Analogni instrumenti s dvodimenzionalnim prikazom i vremenskom bazom s obzirom na način prikazivanja možemo ih podijeliti na:

- Katodne osciloskope
- Grafičke pisane (oscilografske instrumente)

2.3.1 KATODNI OSCILOSKOP

Katodni osciloskop je elektronički mjerni instrument s dvodimenzionalnim prikazom, koji omogućuje određivanje valnog oblika i parametara promjenjivih napona. Koristi katodnu cijev kao sredstvo vizualizacije valnog oblika mjerne veličine. Zapis koji nastaje kao posljedica mjerenja očituje se kao svjetlosni trag na zaslonu katodne cijevi. Katodni osciloskop tako da je amplitudno-vremensku karakteristiku mjernog signala na zaslonu katodne cijevi. Koriste se u pogonskim i laboratorijskim mjerenjima, no postoje posebni osciloskopi za istraživanja. Katodnim osciloskopom se mogu mjeriti sljedeće veličine:

- Istosmjerni i izmjenični napon – rezultat mjerenja dobiva se množenjem faktora otklona s brojem dijelova vertikalne skale
- Jakost električne struje – pomoću strujnih sondi ili mjerenjem pada napona na mjernom otporniku
- Vremenski intervali, periodi i frekvencije
- Valni oblici
- Fazne razlike
- Omjeri frekvencije (Lissajoussove krivulje)

Podjela prema načelu rada			
Osciloskopi s analognom obradom mjerne veličine	Osciloskopi s uzimanjem uzoraka (sampling oscilloscopes)	Osciloskopi s digitalnom obradom mjerne veličine	Osciloskop s analogno-digitalnom memorijom (storage oscilloscopes)

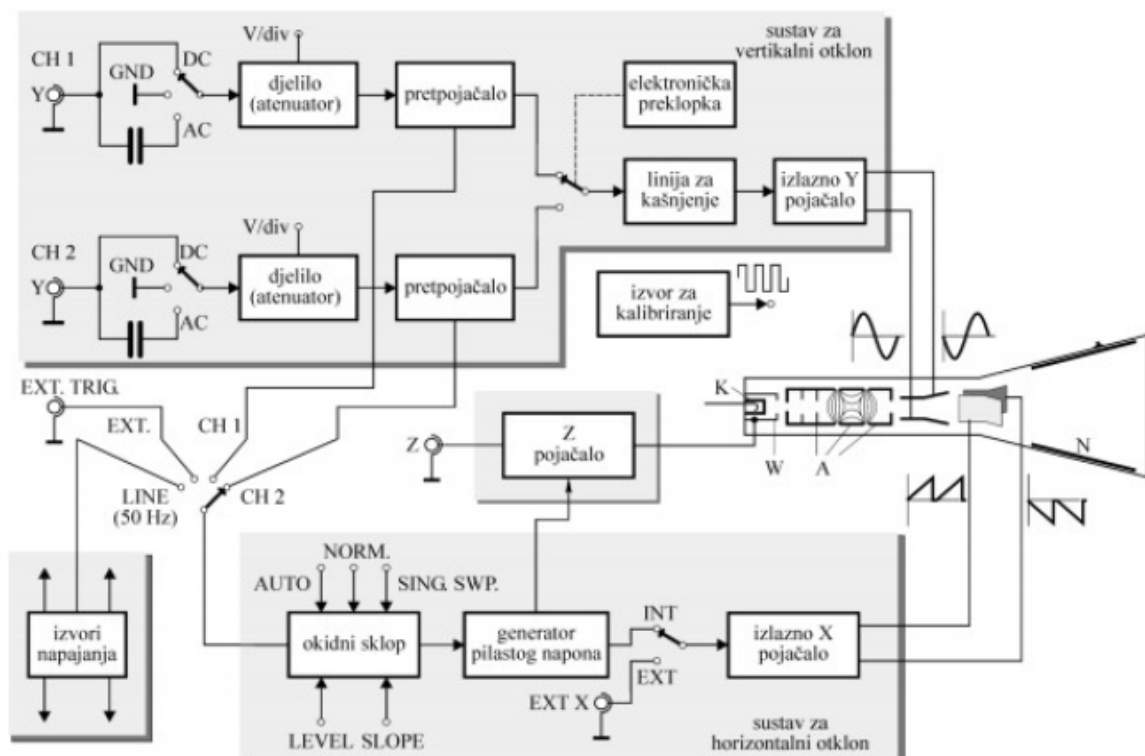
Tablica 2.3.1-1 Podjela katodnog osciloskopa prema načelu rada

Podjela prema broju različitih signala			
Jednokanalni	Dvokanalni	Višekanalni	Višemlazni

Tablica 2.3.1-2 Podjela osciloskopa prema broju različitih signala koji se promatraju na zaslonu

Zbog jednostavnosti promatrati ćemo načelo rada jednokanalnog osciloskopa. **Osnovni dijelovi** katodnog osciloskopa su:

- **KATODNA CIJEV:** katoda, Wehneltov cilindar, otklonske pločice, anode, zaslon
- **SUSTAV ZA VERTIKALNI OTKLON (Y-KANAL):** ulazno dijelilo, pretpojačalo, vertikalno pojačalo, linija za kašnjenje, elektronička preklopka
- **SUSTAV ZA HORIZONTALNI OTKLON (X-KANAL):** okidni sklop, generator pilastog napona, horizontalno pojačalo
- **Z – POJAČALO** – sklop za osvjetljivanje katodne cijevi. Izlaz mu je spojen na Wehneltov cilindar, dok mu je ulaz spojen na izmjeničan napon. Ako mu je amplituda dovoljno visoka, negativnim poluvalima prekidać će se elektronski snop, to znači da će slika signala biti sastavljena od niza svjetlih odsječaka – ovo se zove SVJETLOSNA MODULACIJA, a koristi se kod mjerenja omjera frekvencija dvaju napona.
- Izvor napajanja i dodatni pribor (**mjerne sonde**)



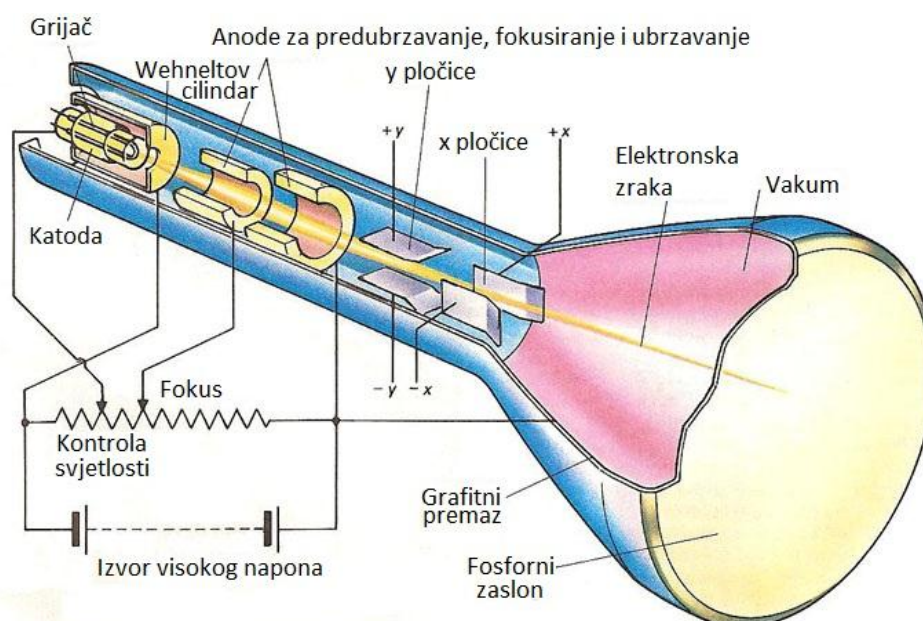
Slika 2.3.1-1 Shematski prikaz katodnog osciloskopa

2.3.1.1 Katodna cijev

Najosnovniji dio svakog katodnog osciloskopa je katodna cijev, koja predstavlja optički indikator promatrane pojave. Položaj elektronskog snopa na fluorescentnom zaslonu određuju dvije međusobno neovisne veličine, što mu daje dvodimenzionalni prikaz signala. U današnje vrijeme postoje različite izvedbe katodnih cijevi, npr. katodna cijev s jednim elektronskim snopom, katodna cijev s dva elektronska snopa, katodna cijev s mogućnošću pamćenja zapisa itd.

Osnovni dijelovi katodne cijevi su:

- stakleni vakuumski balon s priključnim konektorima
- elektronski top
- otklonski sustav

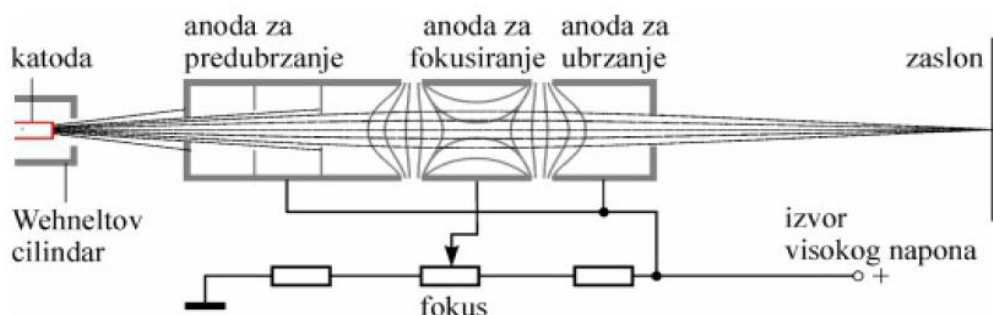


Slika 2.3.1.1-1 Presjek i dijelovi katodne cijevi

Suvremene katodne cijevi napravljene su staklenim balonima specifičnog oblika u kojem je unutrašnji pritisak manji od 10^{-6} mm Hg. Takav mali pritisak omogućuje elektronskom snopu kretanje bez ikakvog otpora od katode do zaslona. Zadatak elektronskog topa je stvaranje elektronskog snopa, kontrolirati njegov intenzitet i fokusirati ga na što manju površinu fluorescentnog zaslona. Elektronski top se također sastoji od nekoliko osnovnih dijelova, a to su:

- katoda
- Wehneltov cilindar (upravljačka elektroda ili kontrolna rešetka)
- anode za predubrzavanje, fokusiranje i ubrzanje (anodni sustav)
- naponski priključci

Katoda je valjastog oblika i smještena je na početku katodne cijevi. Snop elektrona katodna cijev proizvodi pomoću naponskog izvora od oko 6.3 V, snage oko 4 W. Ona isijava elektrone u smjeru zaslona kroz mali otvor promjera oko 1mm, udaljenosti od 0.1 do 0.3 mm. Upravljačkom elektrodom (Wehnelt-ov cilindar) koja je na negativnom potencijalu prema katodi, odbijaju se elektroni i zabijaju u snop. Kako katoda cijelo vrijeme emitira elektrone, bez cilindra elektronski snop bi prolazio uvijek po istom tragu i time nakon nekog vremena oštetio zaslon. Tako upravljačkom elektrodom možemo kontrolirati propuštanje elektronskog snopa prema zaslonu katodne cijevi. Potencijal upravljačke elektrode može se mijenjati komandom svjetline (**INTENSITY**) koja se nalazi na prednjoj ploči katodnog osciloskopa. Formirani elektronski snop prolaskom kroz cilindar nije pogodan za prikaz kvalitetne i oštre slike na zaslonu, stoga ga treba fokusirati. To je ujedno i zadatak anodnog sustava koji se nalazi odmah iza Wehnelt-ovog cilindra. Anodni sustav je sastavljen od tri anode (anode za predubrzavanje, fokusiranje i ubrzanje) koje su smještene jedna iza druge. Sve tri anode su valjkastog oblika i na pozitivnom potencijalu prema katodi. Dvije anode su na većem potencijalu od treće, pa se stoga stvara električno polje koje djeluje na elektrone kao leća s fokusom na zaslon. Anodu za fokusiranje možemo fino namještati pomoću komande fokusa (**FOCUS**), koja se nalazi na prednjoj ploči. Anoda za ubrzanje se uvijek spaja na nulti potencijal (uzemljenje) kako bi se eliminirala pojava dodatnog električnog polja između nje i otklonskih pločica. Takvo polje može uzrokovati pojavu izobličenja slike na zaslonu (npr. oblik elipse umjesto kruga). Dodatno podešavanje vrši se komandom astigmatizma (eng. astigmatism) koja se nalazi na prednjoj ploči osciloskopa. Poslije anode dolaze dva para otklonskih pločica. Ako ih priključimo na napon stvorit će se električno polje (između ploča) tako da će se elektroni prolaskom između ploča otkloniti u smjeru pozitivnije ploče.



Slika 2.3.1.1-2 Sustav za fokusiranje elektronskog snopa prema zaslonu katodne cijevi

Ako se elektron nađe u električnom polju između dvije ploče na koje je priključen istosmjerni napon U , pod utjecajem polja imat ćemo djelovanje sile (F) na elektron prema izrazu:

$$F = -e \cdot E$$

gdje je e – naboj elektrona ($e = 1.602 \cdot 10^{-19}$ C), E – jakost električnog polja.

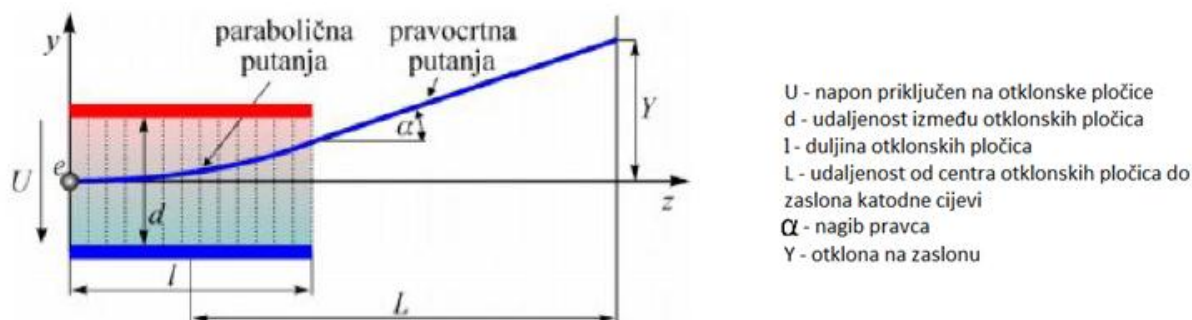
Predznak minus u izrazu predstavlja djelovanje električne sile u suprotnom smjeru od smjera djelovanja električnog polja, a to znači da se elektron kreće u smjeru pozitivno nabijene ploče.

Izraz za ubrzanje elektrona u smjeru pozitivne pločice izgleda:

$$a = -\frac{F}{m_e} = -\frac{eE}{m_e} = -\frac{eU}{m_e d}$$

gdje je m_e – masa elektrona ($m_e = 9.109 \cdot 10^{-31}$ kg)

Dok elektron prolazi između pločica, on se giba u složenom smjeru koji se sastoji od ubrzanog gibanja prema pozitivnoj pločici (smjer y osi) i gibanje prema zaslonu koje je konstantno (smjer z osi).



Slika 2.3.1.1-3 Gibanje elektrona od pločica do zaslona katodne cijevi

Otklon na zaslonu katodne cijevi određuje se izrazom:

$$Y = L \cdot \tan \alpha = \frac{L U l}{2 d U_a}$$

gdje je U_a – napon između katode i zaslona.

Osim vrijednosti napona (U) koji je priključen između otklonskih pločica sve su ostale veličine konstantne za određenu izvedbu katodne cijevi, te se stoga može pisati izraz:

$$Y = s \cdot U$$

gdje je s – statička osjetljivost otklonskih pločica koja se obično izražava u cm/V ili mm/V.

Također se definira statički otkloni faktor po kojem možemo razlikovati razne izvedbe katodnih cijevi, a dobiva se prema izrazu:

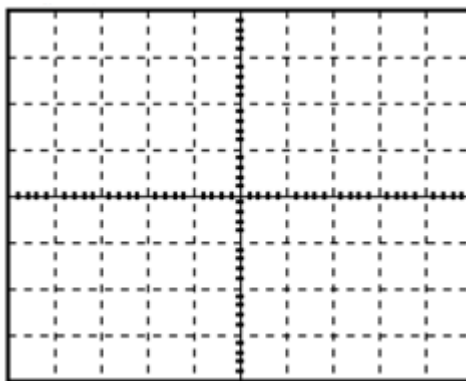
$$S = 1/s$$

Dobra tehnološka rješenja pri konstrukciji otklonskih pločica mogu povećati gornju graničnu frekvenciju sa 100 MHz na 500 MHz. Jedno od njih je posebno oblikovane otklonske pločice koje su na dijelu bliže zaslonu blago zakrivljene prema van. Da bi se izbjeglo povećanje kapaciteta pločica, koji se kreće u granicama od 0.02 do 2 pF, potrebno je pločice izvesti u segmentiranom obliku. Takvim oblikom kapacitet pločica se smanjuje dok je osjetljivost ostala ista, a može se izračunati prema izrazu:

$$C_p = \epsilon_0 \frac{S}{d}$$

gdje je ϵ_0 – dielektričnost vakuumu ($\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ F/m), S – površina (ploština) pločica, d – udaljenost između pločica.

Na zaslonu katodnog osciloskopa je ucrtan središnji koordinatni sustav s mrežom podjeljaka (kvadrata) koja olakšava očitavanje mjerenih vrijednosti signala. Zaslon osciloskopa podijeljen je u 10 polja po horizontalnoj osi i 8 po vertikalnoj osi. Svaki podjeljak ima duljinu od 1 cm x 1cm, a označava se sa *cm*, *DIV* ili *d.sk*, ovisno o izvedbi instrumenta ili literaturi. Na horizontalnoj osi (os X) očitava se vrijeme po podjeljku, dok se na vertikalnoj osi (os Y) očitava vrijednost napona po podjeljku.

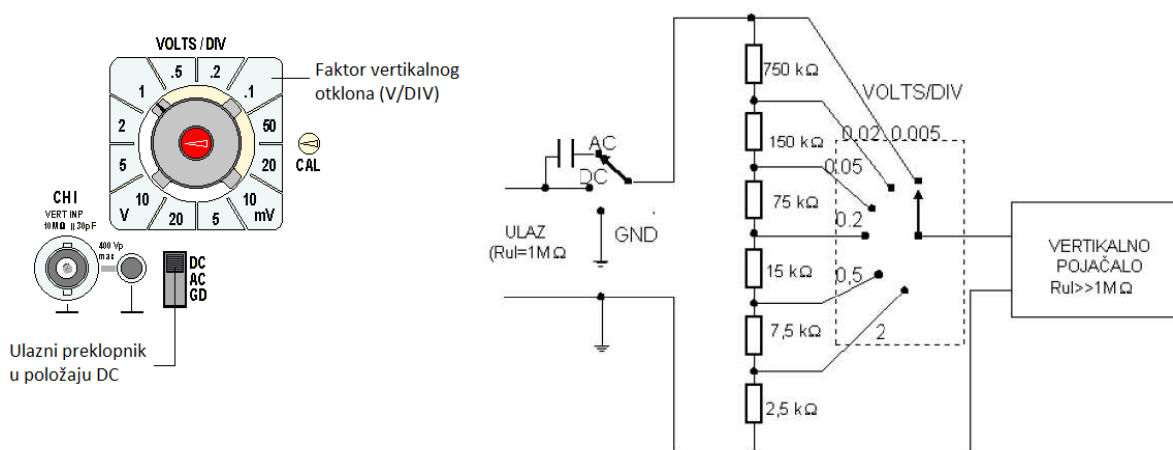


Slika 2.3.1.1-4 Raster podjele zaslona katodnog osciloskopa

2.3.1.2 Sustav za vertikalni otklon

Sustav za vertikalni otklon osciloskopa omogućuje pojačanje ili slabljenje signala, odnosno amplitudni tretman mjernog signala. Osnovni dijelovi sustava za vertikalni otklon su:

- **Y ULAZ** – ulazna vertikalna priključnica (**Y INPUT**)
- **ULAZNI PREKLOPNIK** – prije ulaza u dijelilo preklopnikom možemo birati: izravan ulaz između priključnice i atenuatora (**DC** - istosmjerna i izmjenična komponenta), ulaz preko kondenzatora koji uspostavlja vezu između ulazne priključnice i dijelila bez istosmjerne komponente mjernog signala (**AC** – izmjenična komponenta) ili ulaz na potencijalu kućišta (**GND**) koji služi za pražnjenje naboja pri prijelazu iz DC u AC položaj i obrnuto.
- **ULAZNO DJEILLO (atenuator)** – služi za snižavanje odnosno povećanje razine napona na razinu koja odgovara razini radne točke pretpojačala. Ovo dijelilo mora imati frekvencijski neovisne omjere ulaznog i izlaznog napona (frekvencijski kompenzirano dijelilo). Izabrani položaj preklopnika dijelila direktno utječe na pomak svjetlosne mrlje na zaslonu katodne cijevi. Takav preklopnik još se naziva **faktor vertikalnog otklona** (**VOLTS/DIV**, **VOLTS/cm**). Višepoložajni kalibrirani preklopnik (po jedan za svaki od kanala) služi za skokovitu regulaciju otklonskog faktora. Promjene skokovitog slabljenja amplitude ulaznog mjernog signala najčešće su: 1 : 2 : 5 : 10: 20 : 50 ili 1 : 3 : 10 : 30 itd.



Slika 2.3.1.2 – 1 Ulazno dijelilo sustava za vertikalni otklon

- **PRETPOJAČALO** – omogućuje dobivanje dovoljnog otklona svijetle mrlje na zaslonu katodne cijevi. Vrijeme porasta pretpojačala mora biti kraće od onog promatranog. Korištenjem položaja AC preklopnika imamo donju graničnu frekvenciju kao posljedica korištenja kondenzatora. Njena vrijednost ovisi o samom kondenzatoru, a može se izračunati prema izrazu:

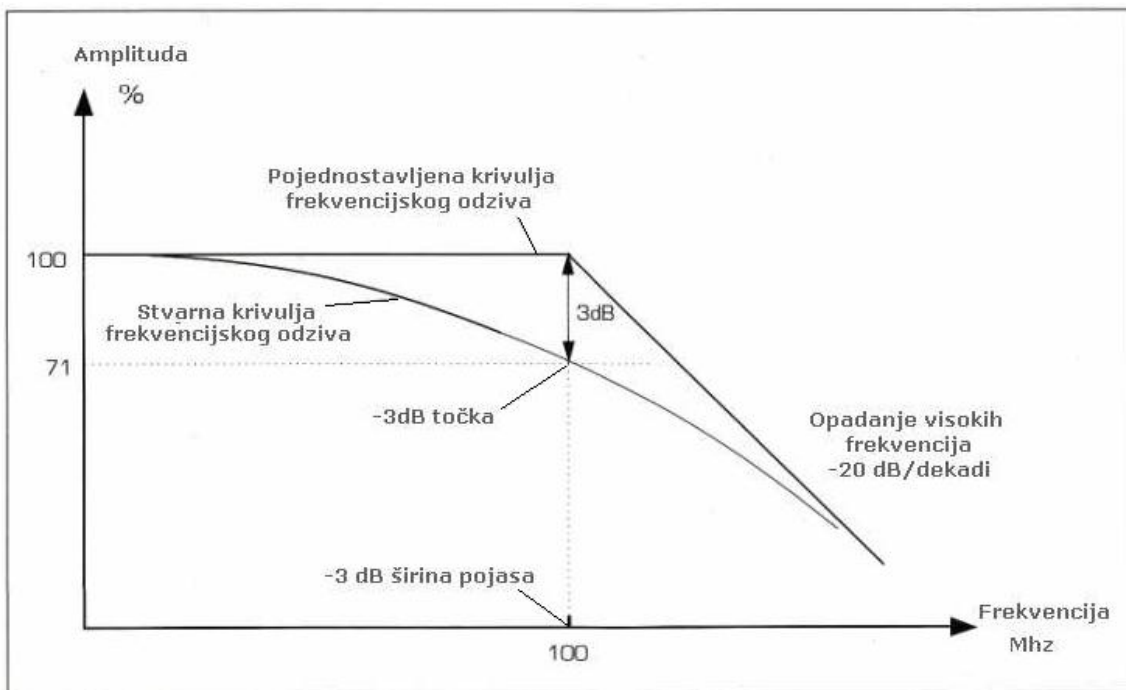
$$f_d = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C} \text{ [Hz]}$$

gdje je R – ulazni otpor Y – ulaza katodnog osciloskopa.

Podatak o donjoj graničnoj frekvenciji važan je za točno mjerenje najniže frekvencije mjerenog signala, a koji mora biti 3 do 5 puta veći od donje granične frekvencije pojačala. Osim donje granične frekvencije potrebno je odrediti i gornju graničnu frekvenciju. Kod realnih katodnih osciloskopa ona se kreće u granicama od 1 do 500 MHz, čime je u pravilu određena širina frekvencijskog položaja pojačala. Vrijeme porasta impulsa vertikalnog pojačala (Y – pojačala) t_r možemo doći do gornje granične frekvencije prema izrazu:

$$t_r = 2.2 \cdot R \cdot C = \frac{0.35}{f_g}$$

Propusni opseg (bandwidth) je najvažniji parametar osciloskopa, a određuje ga frekv. odziv vertikalnog otklonskog sustava. Definira se kao najveća frekvencija za koju je razina signala manja za 3 dB od stvarne amplitude signala. Točka sa slike 2.3.1.2 – 3 od -3 dB je frekvencija na kojoj je prikazana amplituda sig., izražena sa 71% stvarne vrijednosti ulaznog signala.



Slika 2.3.1.2 – 3 Frekvencijski odziv osciloskopa ($f_g = 100 \text{ MHz}$)

Amplituda signala iznad gornje granične frekvencije (f_g) opada za 6 dB po oktavi ili 20 dB po dekadi. Kod visoko osjetljivih mjerenja smanjivanje pojase širine eliminira smetnje i šum, primjerice za osciloskop s $f_g = 100 \text{ MHz}$ treba se umanjiti za 20 MHz.

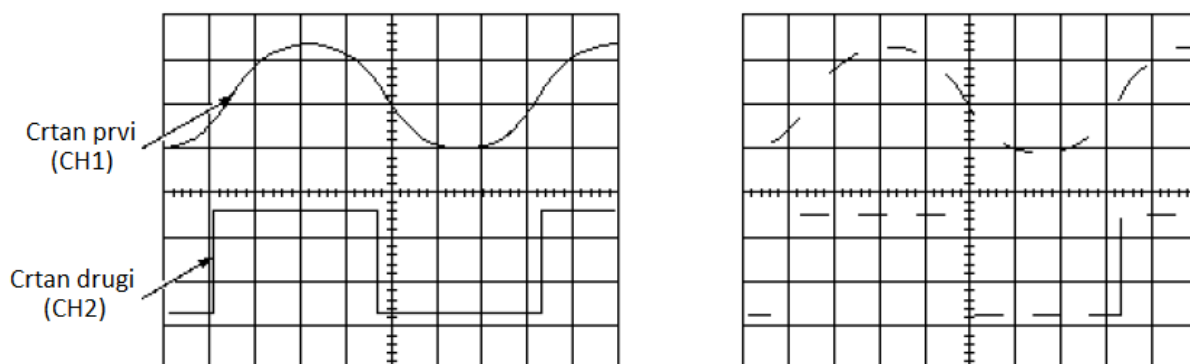
Vrijeme porasta (risetime) signala i propusni opseg su izravno povezani. Vrijeme porasta se obično definira kao prijelazno vrijeme izmetnu razina signala od 10% do 90% stalne maksimalne vrijednosti. Za osciloskop ovo vrijeme predstavlja najbrži prijelaz signala koji teoretski može biti prikazan.

- **POJAČALO** – kako otklonske pločice predstavljaju kondenzator određenog kapaciteta, na višim frekvencijama se povećava struja tog kondenzatora i postaje veća od one što može dati pretpojačalo i zato se stavlja iza njega pojačalo. Na otklonske pločice se dovedu dva jednaka napona fazno zaokrenuta za 180 stupnjeva tako da srednji potencijal između ploča bude jednak nuli. Vertikalni stupanj pojačanja predstavlja ukupno pojačanje pretpojačala i pojačala, a vrijednost faktora otklona Y – ulaza dobiva se prema izrazu:

$$F_y = \frac{1}{A_y \cdot k \cdot s} \text{ [V/cm]}$$

gdje je A_y – ukupno pojačanje vertikalnog stupnja, k – koeficijent omjera dijeljenja, s – statička osjetljivost katodne cijevi.

- **LINIJA ZA KAŠNJE** – ako je kašnjenje u sustavu za horizontalni otklon veće od onog u sustavu za vertikalni otklon može se dogoditi da početni dio mjernog signala ne bude prikazan. To se rješava tako da se u sustav za vertikalni otklon između pretpojačala i pojačala ugradi tzv. linija za kašnjenje, koja će prouzročiti dodatno kašnjenje signala.
- **ELEKTRONIČKA PREKLOPKA** – omogućuje stvaranje privida istovremenog promatranja dvaju ili više pojava na zaslonu katodne cijevi. Pomoću nje se na pločice za vertikalni otklon dovodi malo jedan malo drugi signal preko dva ulaza CH1 i CH2, dva ulazna dijelila i dva pretpojačala. Načelo rada elektroničke preklopke možemo podijeliti na tri osnovna načina:
 - a) **sinkroni rad (alternate mode, ALT)** – pri trajanju jedne periode na otklonske pločice za vertikalni otklon dovodi se napon s CH1, a u trajanju druge periode dovodi se napon s CH2 (problem za male frekvencije signala)
 - b) **asinkroni rad (chopper mode, CHOP)** – elektroničkom preklopkom upravljaju se impulsi od 100000 Hz (10^5 Hz) do 1000000 Hz (10^6 Hz). Za vrijeme jednog otklona u horizontalnom smjeru na pločice za vertikalni otklon dovode se naponi sa CH1 i CH2 gdje se slika sastavlja od malih odsječaka.
 - c) **zbrajanje (channel addition, ADD)** – u ovom položaju preklopke signali sa ulaza CH1 i CH2 mogu se zbrajati (ili oduzimati) i tako prikazati na zaslonu osciloskopa.



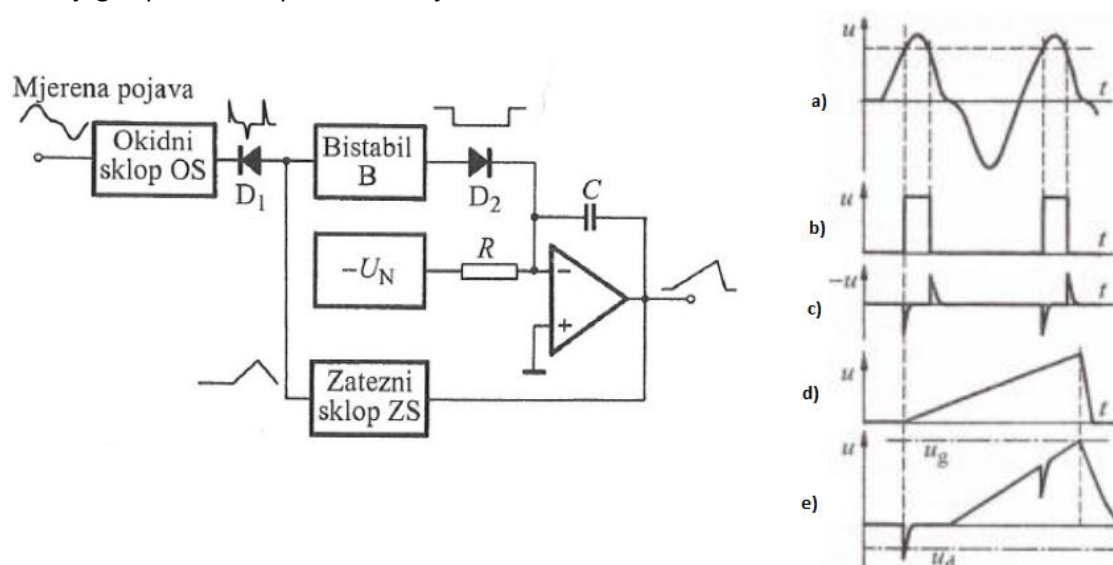
Slika 2.3.1.2 – 2 Sinkroni i asinkroni rad elektroničke preklopke u sustavu za vertikalni otklon

2.3.1.3 Sustav za horizontalni otklon

Sustav za horizontalni otklon osciloskopa omogućuje promatranje promjene signala u funkciji vremena ili druge nezavisne promjenljive veličine. Glavni zadatak horizontalnog sustava je generiranje pilastog napona koji raste od neke najniže negativne vrijednosti pa sve do neke najviše pozitivne vrijednosti. Iz toga se može zaključiti da su granice porasta pilastog napona određene samom veličinom zaslona u horizontalnom pogledu. Osnovna uloga pilastog napona je osigurati linearnu vremensku bazu, odnosno osigurati jednolik pomak svjetlosne mrlje u horizontalnom smjeru kako bi se svakoj točki na X-osi moglo pridružiti određeni vremenski interval potreban da svjetlosna mrlja prijeđe put s lijeva na desno. Osnovni dijelovi sustava su:

- **SKLOPKA ZA IZBOR IZVORA OKIDNIH IMPULSA** – početak generiranja pilastog napona može se sinkronizirati s više različitih signala ovisno o položaju sklopke. Položaji sklopke mogu biti: **INTERNAL (INT)** – unutarnji izvor sinkronizacije koji se postiže sa signalima koji se nalaze na ulazu vertikalne priključnice (CH1 i CH2), **EXTERNAL (EXT)** – vanjski izvor sinkronizacije koji se postiže sa signalom koji je priključen na ulaznu priključnicu **EXT TRIGGER** ili X – input ovisno o izvedbi osciloskopa, **LINE** – mrežni izvor sinkronizacije gdje je pilasti napon sinkroniziran sa signalom koji je priključen na napajanje osciloskopa odnosno mrežu (pr. 6.3 V, 50 Hz).
- **OKIDNI SKLOP** – upravlja stvaranje pilastog napona pri poticaju promatranog signala (mirna se slika postiže sinkronizacijom promatranog signala i pilastog napona). Okidni sklop može se poticati i izvana dovedenim naponom, a sastoji se od dijelila, pojačala i Schmittovog okidnog sklopa – komparator koji daje na izlazu pravokutne impulse (b). Pravokutni impulsi se dalje

deriviraju pomoću RC sklopa i pretvaraju u strme kratkotrajne impulse (c). Negativnim impulsima se dalje upravlja radom tranzistora u bistabilu, koji zaporno polariziraju diodu D2 i omogućuju nabijanje kondenzatora u integratoru i dobivanje pilastog napona na izlazu (d). Pilastim naponom se preko posebnog zateznog sklopa upravlja bistabilom i omogućuje njegov povratak u početno stanje.

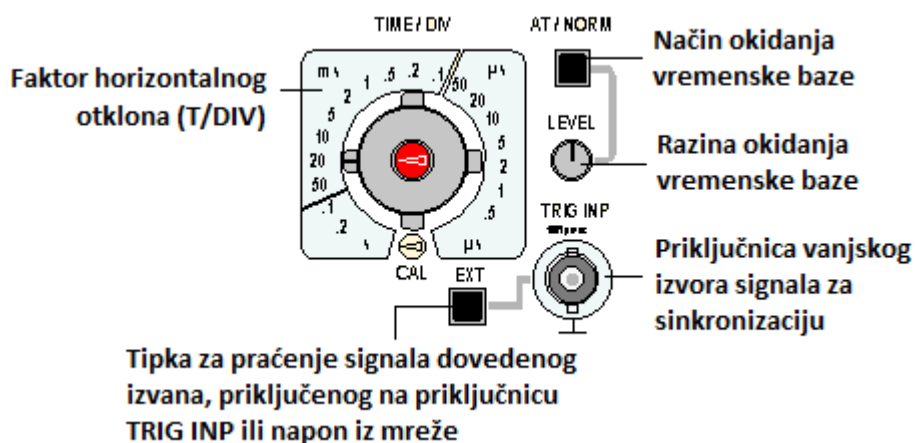


Slika 2.3.1.3 – 1 Okidni sklop katodnog osciloskopa

Okidanje se u najjednostavnijem slučaju obavlja pomoću samog signala koji se želi promatrati (**TRIGGER SOURCE**). Kada je tipka trigger source-a postavljena na **CH1** i/ili **CH2** to znači da se koristi signal izvora koji je doveden na CH1 i/ili CH2. Ako okidanje želimo izvesti neovisnim signalom, priključujemo ga na BNC priključnicu **TRIGGER INPUT** i pritisnemo tipku **EXT**. Također unutar trigger source-a postoji tipka **LINE** koja služi za okidanje preko gradske mreže (50 Hz). Da bi okidanje bilo stabilno, potrebno je odabrati razinu signala – **TRIGGER LEVEL** i njegov nagib **SLOPE**, za koje će osciloskop biti okinut, tj. točka od koje počinje snimanje signala na ekranu. Može se odabrati predznak nagiba, tj. hoće li osciloskop biti okinut na danoj razini kad signal raste ili pada (**NORM** mod rada – ne generira pilasti napon u slučaju izostanka okidnih impulsa). No ako je razina signala za okidanje premala, na ekranu se neće prikazati slika, stoga je nekad potrebno automatsko okidanje (**AUTO** mod rada – generira pilasti napon i onda kada izostanu okidni impulsi) koje nam daje kontinuiranu, ali ne i stabilnu sliku na zaslonu katodne cijevi. Također postoji opcija **SINGLE SWEEP** – pojedinačni način rada gdje se generira pilasti napon samo na zahtjev korisnika osciloskopa.



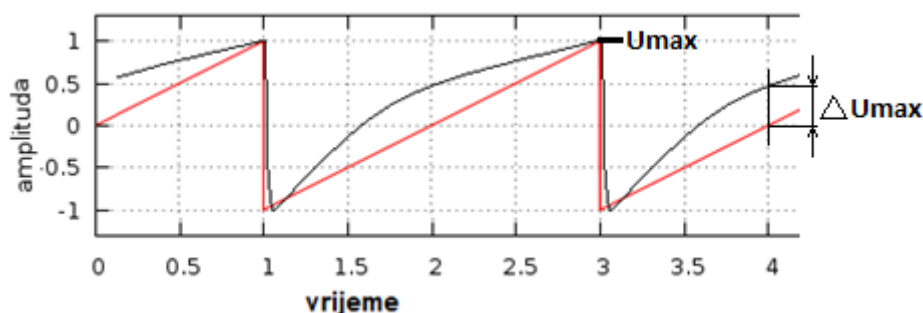
Slika 2.3.1.3 – 2 Razine okidanja signala



Slika 2.3.1.3 – 3 Sustav za horizontalni otklon

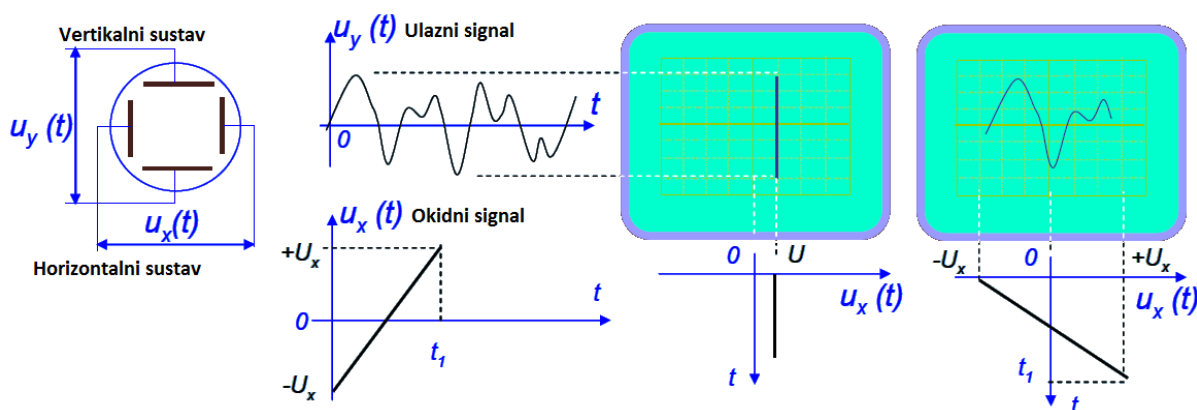
- GENERATOR PILASTOG NAPONA** – na poticaj okidnog sklopa generator pilastog napona stvara napon koji linearno raste tijekom vremena t_r , a zatim tijekom vremena t_f pada na nulu. Na toj razini održava se neko vrijeme t_h očekujući novi poticaj iz okidnog sklopa. Tijekom rasta svjetla mrlja giba se slijeva na desno. Od trenutka početka pada pilastog napona pa do početka trajanja nove periode podesivi sklop drži negativni potencijal dovoljno visoko da prekine elektronski snop (ne vidimo povrat mrlje u početni položaj). Linearnost pilastog napona govori o njegovoj kvaliteti, pa se stoga definira najveća postotna pogreška između idealnog i stvarnog oblika pilastog napona prema izrazu:

$$r = \frac{\Delta U_{\max}}{U_{\max}} \cdot 100\%$$

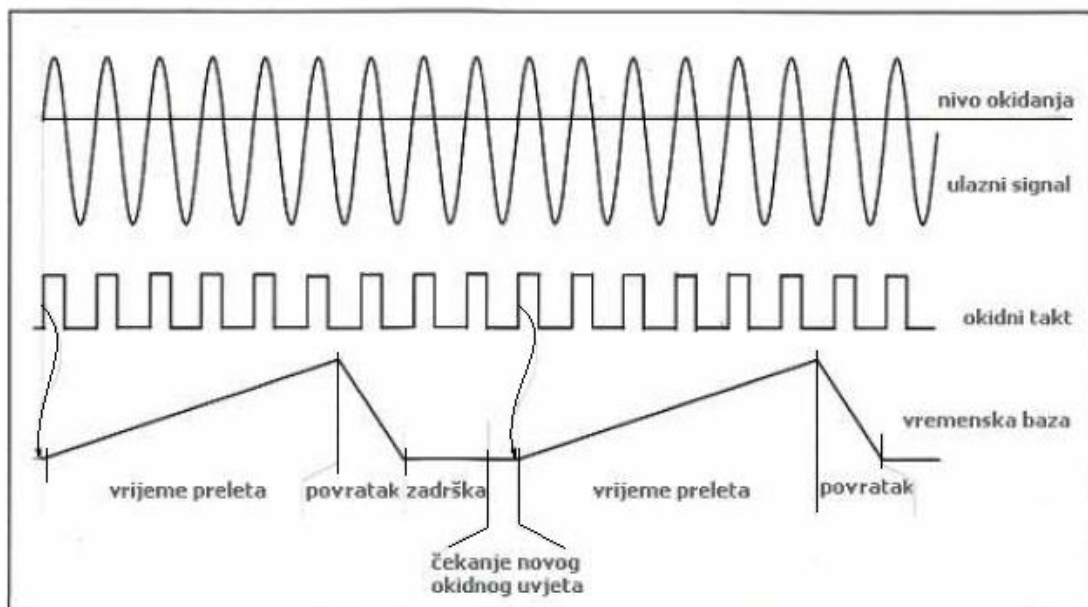


Slika 2.3.1.3 – 4 Idealni i stvarni oblik pilastog napona

- HORIZONTALNO POJAČALO** - služi za davanje dovoljno snage pilastom naponu ili na EXT X.



Slika 2.3.1.3 – 5 Prikaz slike na zaslonu katodne cijevi



Slika 2.3.1.3 – 6 Izlaz generatora vremenske baze (timebase T/DIV)

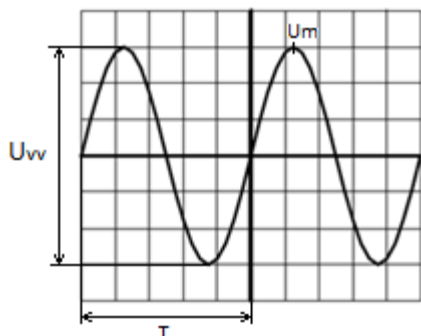
2.3.1.4 Mjerenja katodnim osciloskopom

Mjerenja katodnim osciloskopom su najčešća mjerenja u elektrotehnici. Osnovni cilj korištenja katodnog osciloskopa je dobivanje mirnog, oštrog i svijetlog prikaza signala na zaslonu katodne cijevi. Prije svakog mjerenja potrebno je katodni osciloskop pripremiti za mjerenje na slijedeći način:

- provjeriti izvor napajanja katodnog osciloskopa
- postaviti preklopnik na unutarnji izvor sinkronizacije (INT)
- postaviti preklopnik generatora vremenske baze na generiranje pilastog napona i kad izostane okidna razina (AUTO)
- priključiti potencijal mase na ulaz dijelila pomoću preklopnika u položaju GND
- postaviti preklopnike faktora otklona (V/DIV) i vremenskog mjerila (T/DIV) u približno srednji položaj
- uključiti osciloskop i postaviti svijetlu mrlju na zaslonu u sredinu rastera pomoću regulacije intenziteta (INTENSITY)
- postaviti regulaciju oštrote prikaza (FOCUS)

2.3.1.4.1 Mjerenje amplitude i perioda izmjeničnog signala

Najčešće mjerenje katodnim osciloskopom je mjerenje vršne vrijednosti izmjeničnog signala. Prije samog mjerenja potrebno je dovesti signal na sredinu zaslona pomoću GND položaja preklopnika. Nakon toga ulazni preklopnik se postavlja u položaj AC. Ako je na zaslonu vidljiv miran prikaz mjerenog signala, tada nije potrebno podešavanje pomoću LEVEL tipke. Mjerenjem perioda i vršne vrijednosti, tj. amplitude izmjeničnog signala, radi veće točnosti potrebno je odrediti osjetljivosti sustava za horizontalni (T/DIV) i vertikalni (V/DIV) otklon koji omogućuju najkvalitetniju analizu. Najpovoljniji je onaj položaj kod kojeg se najveći dio zaslona koristi za prikazivanje mjerne pojave.



Slika 2.3.1.4.1 – 1 Određivanje vrijednosti amplitude i perioda izmjeničnog signala

Ako promatramo mirni signal kao na slici 2.3.1.4.1-1, najprije se očitava broj podjeljaka X što ih zauzima širina perioda signala. Period signala računa se prema izrazu:

$$T = k_x \cdot X$$

Iz toga slijeda da je frekvencija signala jednaka prema izrazu:

$$f = 1/T$$

Zatim se očitava broj podjeljaka Y što ih zauzima signal od vrha do vrha, te se izračunava vršna vrijednost napona prema izrazu:

$$U_w = k_y * Y$$

Maksimalna i efektivna vrijednost napona za ovakav oblik signala izračunava se prema izrazima:

$$U_m = U_w / 2 \quad ; \quad U = U_{ef} = U_m / \sqrt{2}$$

2.3.1.4.2 Mjerenje istosmjernog signala

Istosmjerna mjerenja katodnim osciloskopom mogu se podijeliti na mjerenje amplitude istosmjernog signala i na mjerenje vrijednosti istosmjerne komponente sadržane u izmjeničnom signalu. Ako signal u sebi ima izmjenični komponentu ona se mjeri na način koje je opisan pod 2.3.1.4.1. Mjerenje istosmjernog signala vrši se na način da se prije samog početka mjerenja postavi signal na sredinu zaslona pomoću GND položaja preklopnika. Nakon toga ulazni preklopnik se postavlja u položaj DC. Očitava se broj podjeljaka Y koji odgovara vertikalnom pomaku zrake od nultog položaja (GND). Vrijednost napona dobiva se prema izrazu:

$$U = k_y * Y$$

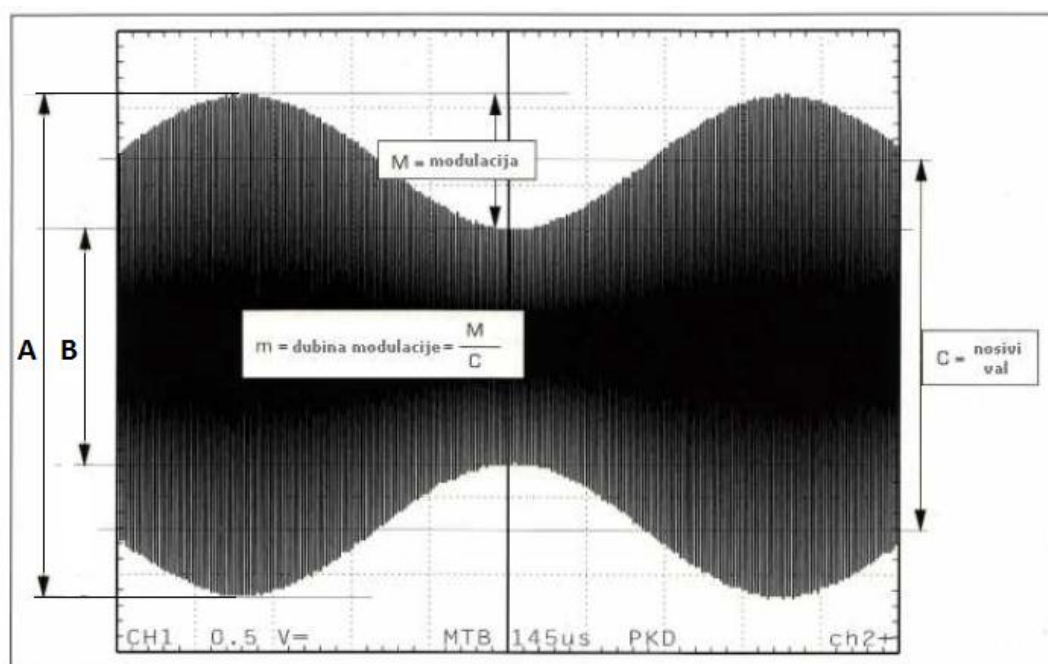
2.3.1.4.3 Mjerenje dubine amplitudne modulacije signala

Katodnim osciloskopom može se mjeriti dubina amplitudne modulacije M. Dubina modulacije amplitudno modularnog signala se definira kao omjer amplitude modulacije naspram amplitude vala nosioca. Postupak mjerenja zahtjeva da se:

- za mjerenje dubine modulacije, postavimo generator da daje amplitudno modulirani signal
- dovedimo modulirani signal na kanal CH1 i na CH2
- pritisne se AUTOSET, što kod osciloskopa automatski odabire najniže frekvencije signala kao uvjet okidanja
- preklopnik faktora otklona postavlja se u položaj koji omogućuje najtočnije očitavanje pojedinih vrijednosti amplituda
- očitavaju se maksimalne i minimalne vrijednosti amplitude amplitudno-moduliranog signala A i B (CH1 i CH2)

Izračun dubine amplitudne modulacije izražene u postocima dobiva se prema izrazu:

$$M\% = \frac{A-B}{A+B} * 100\%$$

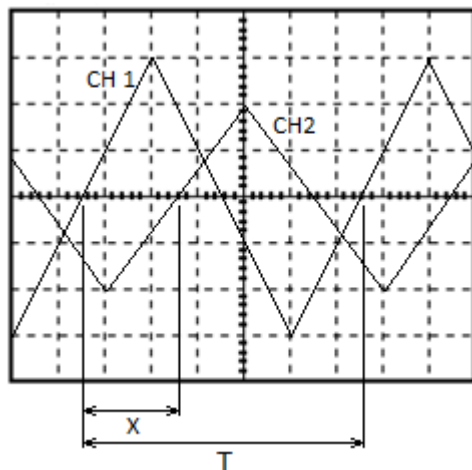


Slika 2.3.1.4.3 – 1 Dubina modulacije AM signala

2.3.1.4.4 Mjerenje pojačanja i faznog pomaka signala

Mjerenje pojačanja signala katodnim osciloskopom svodi se na mjerenje vršnih vrijednosti dvaju izmjeničnih signala. Omjer izmjerenih vrijednosti predstavlja pojačanje ili gušenje, ovisno o tome koja od vrijednosti predstavlja izlaznu, odnosno ulaznu vrijednost signala.

Mjerenja faznog pomaka moguće je izvesti na dva načina, gdje se jednim brže dolazi do rezultata ali mu je preciznost manja, dok kod drugog je obrnuto.



Slika 2.3.1.4.4 – 1 Mjerenje faznog pomaka neposrednim očitanjem

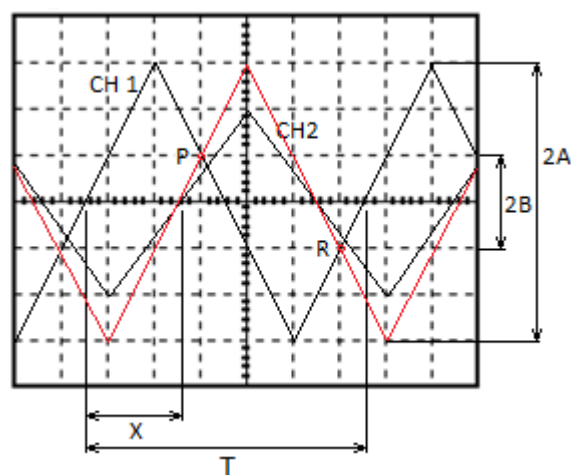
Preklopkama T/DIV i V/DIV odrede se konstantne vrijednosti. Koristeći očitane podatke izračunava se fazni pomak između prikazanih signala koji predstavlja razmak između signala na x-osi, a dobiva se pomoću izraza:

$$\varphi_x = k_x \cdot \frac{360^\circ}{T} \cdot X$$

Slika 2.3.1.4.4 – 2 Mjerenje faznog pomaka trigonometrijom

Potrebno je izjednačiti otklone koji definiraju vrijednosti amplitude jednog i drugog signala pomoću preklopke V/DIV. Očitati broj dijelova rastera 2A, koji definira dvostruku vršnu vrijednost oba signala, te 2B koji definira vertikalnu udaljenost između točaka P i R, koje predstavljaju presjek signala. Fazni pomak se izračunava prema izrazu:

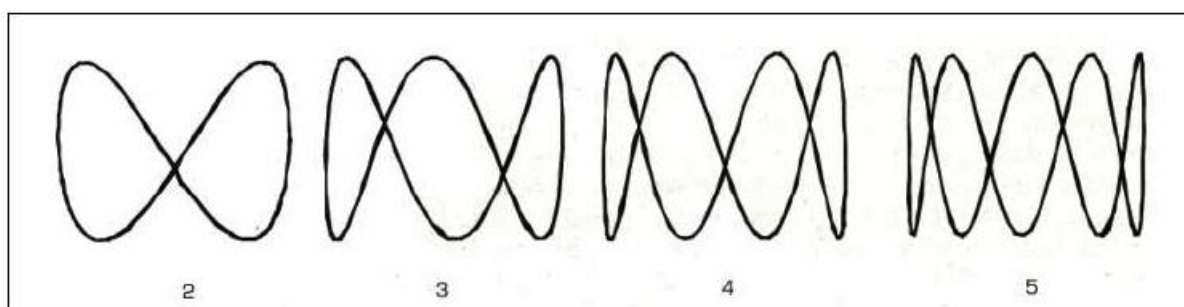
$$\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} = \sqrt{\left(\frac{2A}{2B}\right)^2 - 1}$$



2.3.1.4.5 Mjerenje omjera dviju frekvencija

Pri određivanju omjera dvaju mjernih signala, koji su priključeni na suprotne otklonske pločice, na zaslonu katodne cijevi se dobiva zatvorena krivulja. Takva krivulja još se naziva Lissajousova krivulja, a sadrži podatak o međusobnom odnosu frekvencija priključenog signala, te i podatak o njihovom međusobnom faznom pomaku. Omjer frekvencija jednak je omjeru broja dodirnih točaka tangenti povučenih na krivulju u smjeru osi X (n_x – broj dodirnih točaka na osi) i Y (n_y – broj dodirnih točaka na osi), a računa se prema izrazu:

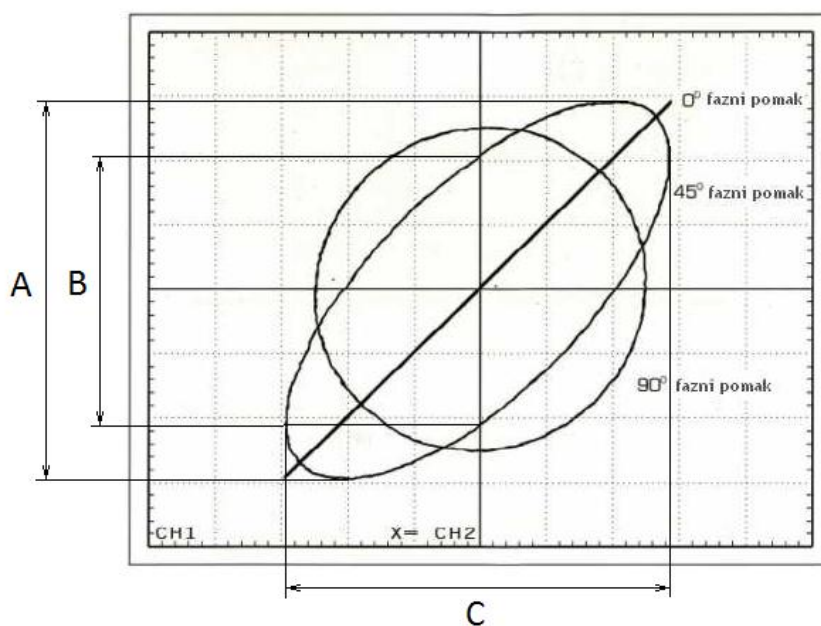
$$\frac{f_y}{f_x} = \frac{n_x}{n_y}$$



Slika 2.3.1.4.5 – 1 Primjeri Lissajousovih krivulja

Ako su frekvencije signala međusobno ovisne sa zaslona možemo očitati fazni pomak signala. Da bi mjerenje bilo točno, potrebno je namjestiti amplitude oba signala tako da se dobije $A = C$ vrijednost kao što je prikazano na slici 2.3.1.4.5 – 2. Fazni pomak računa se prema izrazu:

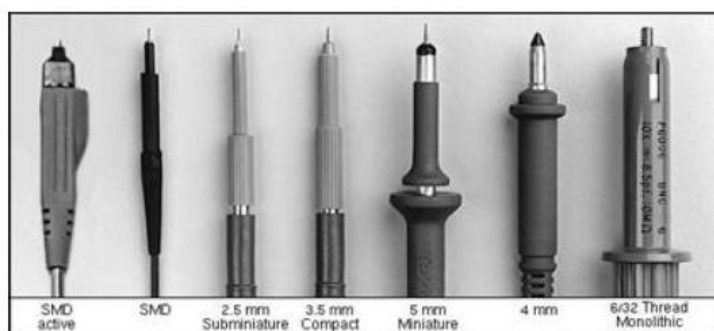
$$\sin \varphi = \frac{B}{A}$$



Slika 2.3.1.4.5 – 2 Mjerenje faznog pomaka pomoću Lissajousovih krivulja

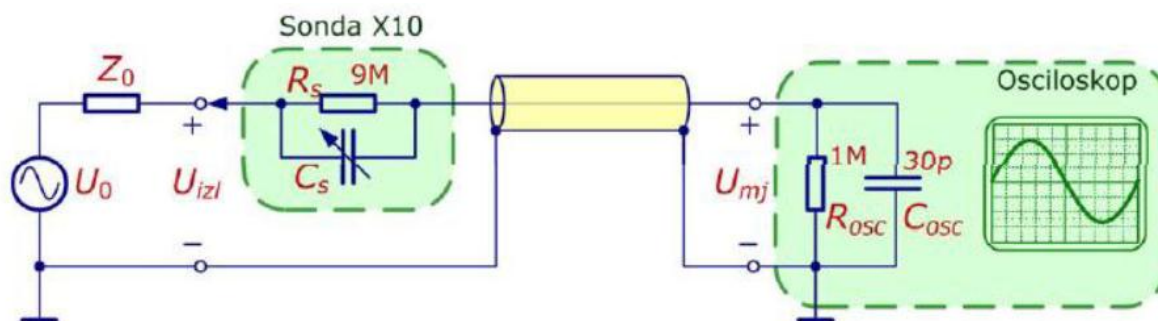
2.3.1.5 Mjerena sonda osciloskopa

Mjerna sonda osciloskopa predstavlja vrlo važan pomoćni pribor o kojem u velikoj mjeri ovisi kvaliteta i točnost mjerenja. Mjerne sonde imaju zadatak prenijeti mjereni signal od njegovog izvora do ulazne priključnice mjernog instrumenta, a da pri tome ne izobliče mjereni signal. Prema namjeni i konstrukciji mjerne sonde dijelimo na naponske i strujne, odnosno na pasivne i aktivne. Karakteristike sonde moramo uzeti u obzir kada analiziramo rezultate mjerenja, kao i impedanciju testiranog kruga. U osnovi one se sastoje od kabela određene duljine i testnog vrha, dok neke sonde nemaju serijski ulazni otpor.

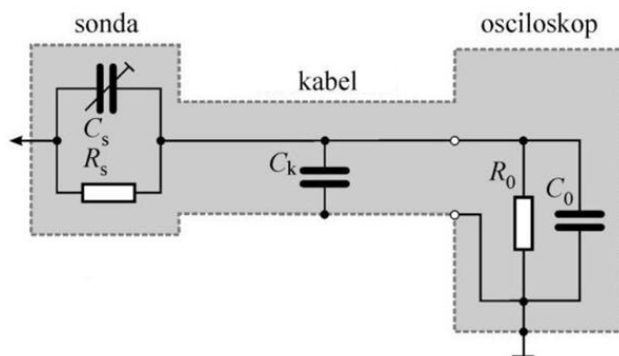


Slika 2.3.1.5 – 1 Primjeri izgleda mjernih sondi

Pasivne mjerne sonde se najviše koriste jer su po cijeni i jednostavnosti izvedbe najprihvatljivije. Ona se sastoji od glave sonde, spojnog kabela i završnog konektora. Sastavni elementi su pasivnog karaktera, tj. elementi impedancije su otpornog, kapacitivnog i induktivnog karaktera. No povećanjem ulaznog otpora direktno se smanjuje gornja granična frekvencija, stoga se mjerne sonde konstruiraju sa omjerom dijeljenja 1:10 ili 1:100 ($\times 10$ ili $\times 100$). Na taj način mjerna sonda umetanje visokoomskog otpornika postaje visokoomska, a dodavanjem paralelnog kondenzatora tom otporniku postiže se niska kapacitivnost sonde koja omogućuje nesmetano mjerenje mjernih signala vrlo visokih frekvencija.



Slika 2.3.1.5 – 2 Prikaz pasivne mjerne sonde i njene kompenzacije



Slika 2.3.1.5 – 3 Nadomjesna shema spoja pasivne mjerne sonde sa osciloskopom

Kompenzacija mjerne sonde ostvaruje se prema izrazu:

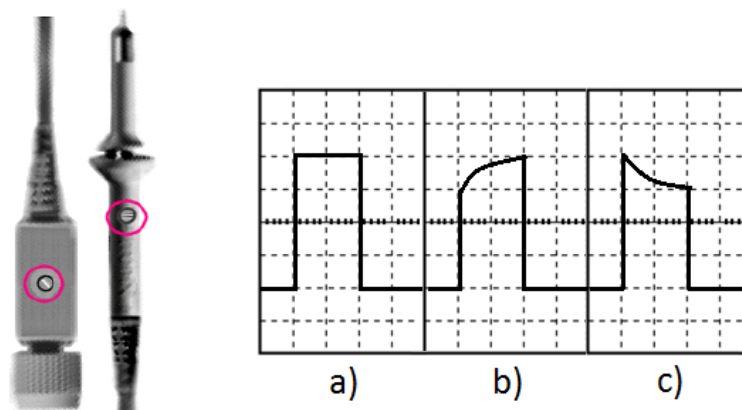
$$C_s \cdot R_s = R_o (C_k + C_o)$$

gdje su C_s , R_s – kapacitet i otpor mjerne sonde, C_o , R_o – kapacitet i otpor ulaza osciloskopa, C_k – parazitni kapacitet kabela mjerne sonde

U praksi se kompenzacija sonde provjerava promatranjem odziva na pravokutni signal napona frekvencije oko 1 kHz. Ako je odziv izobličen, tada se podešava trimer kondenzatora u glavi sonde (slika 2.3.1.5 – 4) koji ispravlja izobličenja. Kompenzacija mjerne sonde vrši se za svaki mjerni instrument zasebno.

Slika 2.3.1.5 – 4 Kompenzacija pasivne mjerne sonde;

- a) pravilno kompenzirana sonda;
- b) podkompenzirana sonda;
- c) nadkompenzirana sonda



Aktivne naponske mjerne sonde, za razliku od pasivnih, sadrže u sebi pojačalo snage. Primjenom ovakvih sondi smanjuje se opterećenje izvora i proširuje se frekventijski mjerni opseg bez dijeljenja mjernog signala. Aktivne strujne sonde najčešće koriste pojavu Hallovoeg efekta (pokretljivost nosilaca naboja i njihova koncentracija u poluvodičima i metalima). One u glavi sadrže poluvodič u kojem se uslijed prolaza mjerenja struje stvara napon. Aktivne strujne sonde kao i naponske imaju široko frekventijsko područje, dok dosta su osjetljive na preopterećenja.



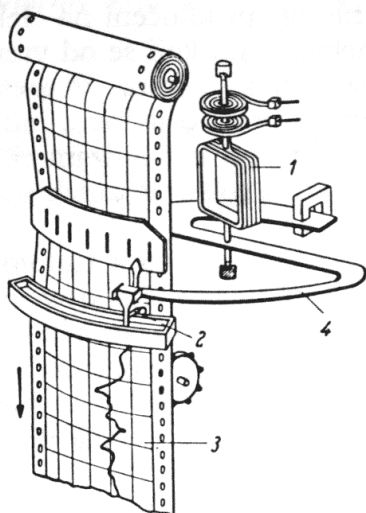
Slika 2.3.1.5 – 5 Primjeri aktivnih mjernih sondi

2.3.2 GRAFIČKI PISAČI

Grafički pisači su elektronički mjerni instrumenti koji imaju mogućnost trajnog zapisa mjerenih veličina. Instrumenti svoje rezultate mjerenja zapisuje na papir ili neki drugi materijal koji mijenja svoj vanjski izgled pod mehaničkim, svjetlosnim, kemijskim ili toplinskim utjecajem. Nedostatak ovakvih uređaja je u nemogućnosti korištenja na višim frekvencijama. Gornja granična frekvencija ovisi o vrsti pisača i iznosi: oko 150 Hz za pisače s pisaljkom, oko 1200 Hz za pisače s mlazom tinte, oko 10000 Hz za pisače sa svjetlosnom zrakom. Prema načelu rada dijelimo ih na oscilografe i X-Y pisače.

2.3.2.1 Oscilografski instrumenti s pomičnim papirom

Oscilografski instrumenti s pomičnim papirom su uređaji s dvodimenzionalnim prikazom mjerene veličine koji zapisuje na papir ili film valne oblike koji odgovaraju oscilacijama električnog napona u ovisnosti o vremenu. Osnovne izvedbe ovakvih instrumenata mogu se razlikovati po tome da li instrument predstavlja otvoreni ili zatvoreni mjerni sustav. Mjerne veličine čije se želi snimati amplitudno-vremenska ovisnost, potrebno je prilagoditi uvjetima koji omogućuju njeno snimanje, npr. kod snimanja neelektričnih veličina potrebno je prvo pretvaranje u električne veličine. Takav električni mjerni signal dovodi se na sklop dijelilo-pojačalo koji ima ulogu dovođenja signala u normirano područje mjerenja. Amplituda signala pretvara se u mehanički pomak pisača, a vremenska veličina se dobiva kroz pomak papira.



Slika 2.3.2.1 – 1 Oscilografski instrument s pomičnim papirom; 1 – pomični dio instrumenta, 2 – pisač, 3 – papirnata traka, 4 – kukasta kazaljka

Elektromehanički oscilografi sadrže galvanometar koji je priključen na uređaj koji zapisuje pokretanje jezgre. Takav uređaj može sadržavati ogledalo koje reflektira svjetlost od jezgre koja se pokreće na fotoosjetljivi film. Na jezgru se učvršćuje pisalo koje bilježi oscilacije na pokretnu papirnatu traku. Ovakvi oscilografi koriste se kod sporijih promjena mjerene veličine.

Česte primjene oscilografskih instrumenata s pomičnim papirom su: EKG (elektrokardiograf) – bilježi impulse koji nastaju otkucajem srca, EEG (elektroencefalogram) – bilježi električne impulse koji nastaju aktivnošću mozga, poligraf (detektor laži) – bilježi električne impulse koji nastaju promjenom fizioloških reakcija, seizmograf – bilježi električne impulse koji nastaju podrhtavanjem tla, i td.



Slika 2.3.2.1 – 2 Načelna izvedba oscilografa s pomičnim papirom za mjerenje električne i neelektrične veličine

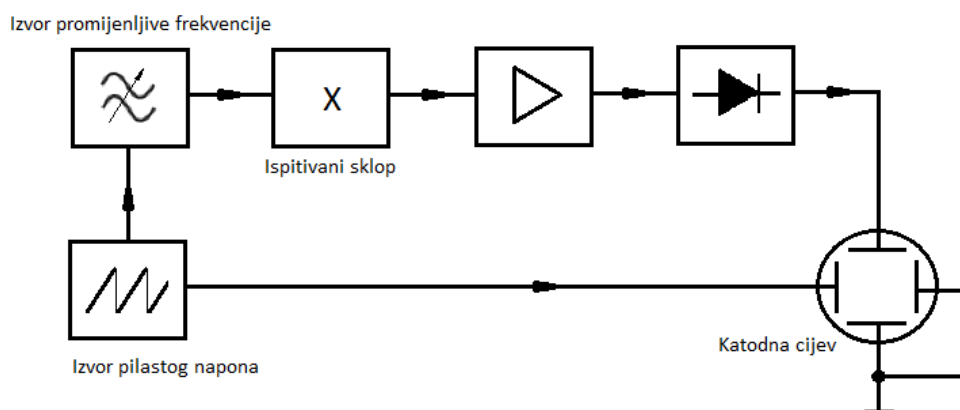
2.3.2.2 X-Y pisači

Osnovna razlika između oscilografskih instrumenata s pomičnim papirom i X-Y pisača je u tome što njihov papir ostaje nepokretan. Pisač je pokretan u smjeru osi X i, te bilježi međusobnu ovisnost dvaju mjernih signala koji su priključeni na ulaz instrumenta. Promatrati se mogu također i neelektrične veličine ako su prethodno pretvorene u električni signal. Iz toga proizlazi da se mogu koristiti za snimanje naponsko-strujnih karakteristika raznih elektroničkih elemenata, krivulje magnetiziranja itd. Osnovni nedostatak ovakvih instrumenata je njihova sporost pri mjerenju i mala duljina papira.

Danas prevladavaju digitalni zapisni uređaji koji imaju pokaznik u boji, memoriju za pamćenje podataka, pisač za zapis na papirnatu traku, priključak za računalo – obrada snimljenih signala, mogućnost startanja prikupljanja podataka okidnim impulsom.

2.3.3 VOBLERI

Uređaj kojim se postiže mjerenje i prikazivanje amplitudno-frekvencijskih karakteristika za zaslonu katodne cijevi, naziva se vobler.



2.3.3 – 1 Načelna izvedba voblera

Izvor promjenjive frekvencije i konstantne amplitude priključuje se na ispitivani sklop X. Izlazni naponski signal iz sklopa X dovodi se do pojačala koji ga pojačava do potrebne veličine. Nakon toga signal se demodulira s odzivom na vršnu vrijednost signala, a zatim se dovede na vertikalne pločice katodnog osciloskopa. Da bi se na zaslonu katodne cijevi prikazala ovisnost amplitude o frekvenciji priključenog signala, potrebno je na horizontalne pločice dovesti naponski signal koji je proporcionalan izabranoj frekvenciji ulaznog signala. To se postiže tako da se iz izvora pilastog napona dovede napon u_x na horizontalne pločice katodne cijevi i da se njime istovremeno upravlja izvorom promjenjive frekvencije f_p . Njihova ovisnost se postiže izrazom:

$$f_p = f_0 (1 + k \cdot u_x)$$

Brzina porasta pilastog napona mora biti optimalna za prikaz kvalitetne amplitudno-frekvencijske karakteristike na zaslonu. U praktičnim izvedbama brzina porasta pilastog napona odabrana je tako da u jednoj sekundi postiže se oko pedeset iscrtavanja amplitudno-frekvencijske karakteristike na zaslonu katodne cijevi. Također je potrebno odrediti optimalan omjer promjene frekvencije ulaznog signala, a to se postiže omjerom minimalne i maksimalne frekvencije ne veći od 1:10 (u praksi su omjeri 1:1.5, 1:2).

Priključivanjem odašiljača na vobler može se postići izvor promjenjive frekvencije koji služi za ometanje frekvencija radiosignala, odnosno ometanje rada mobilnih uređaja, radiostanica, televizija, bežičnih modema itd. U današnje vrijeme vobleri su sastavni dio analizatora spektra.

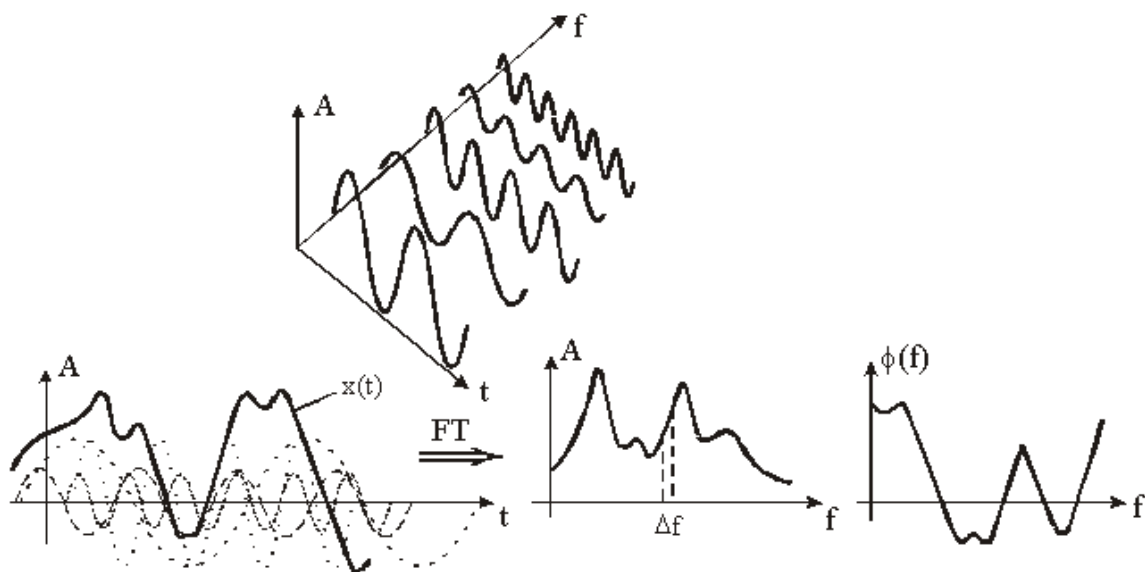
2.3.4 ANALIZATORI SPEKTRA

Promatrajući neki vremenski signal na zaslonu osciloskopa ili računala ili gledajući sliku na zaslonu računala ili televizijskog prijemnika, ne može se ustvrditi sadržaj informacije. Informacija je sadržana u signalu, ali nije jednostavno razlučiva. Razlaganje signala na ortogonalne projekcije moguće je transformacijom vremenskog signala u frekvencijsko područje.

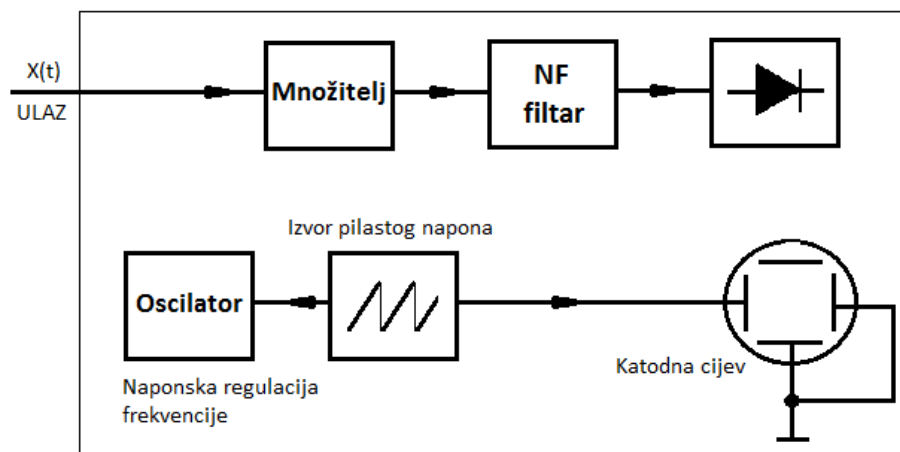
Frekvencijske komponente svojom amplitudom, frekvencijom i fazom, predstavljaju stanje medija informacije koje jednoznačno definira sadržaj informacije. Slika 2.3.4 – 1 prikazuje razlaganje vremenskog signala u trodimenzionalni prostor (amplituda, frekvencija i faza). Na sličan se način može razložiti prostorni signal tj. slike. U praksi jedan od temeljnih instrumenata u obradbi signala je, pored osciloskopa, baš analizator spektra koji je danas rijetko analogne izvedbe, a gotovo redovito digitalne izvedbe.

Dok vobler prikazuje amplitudno-frekvencijsku karakteristiku nekog ispitivanog sklopa X, analizator spektra kao rezultat mjerenja daje prikaz spektra nekog periodičnog signala. Tako se svaka periodična funkcija $f(t) = f(t + nT)$ može prikazati Fourierovim redom, odnosno Fourierovom transformacijom. Prema vrsti spektra analizatori se dijele na:

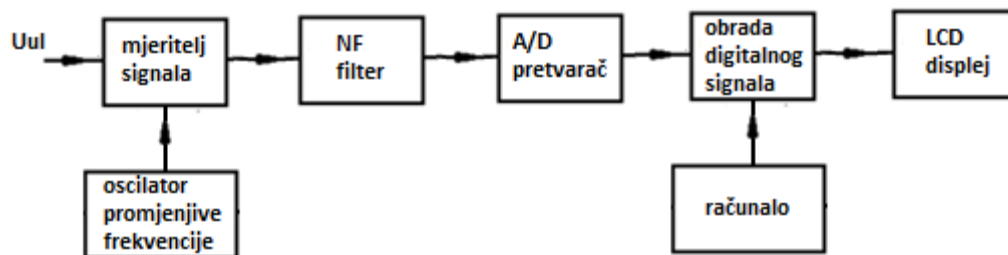
- spektre periodičkih funkcija (diskretni spektar)
- spektre neperiodičkih funkcija (kontinuirani spektri)
- spektre koji nastaju miješanjem dviju periodičkih funkcija (kvaziharmonijski spektar)



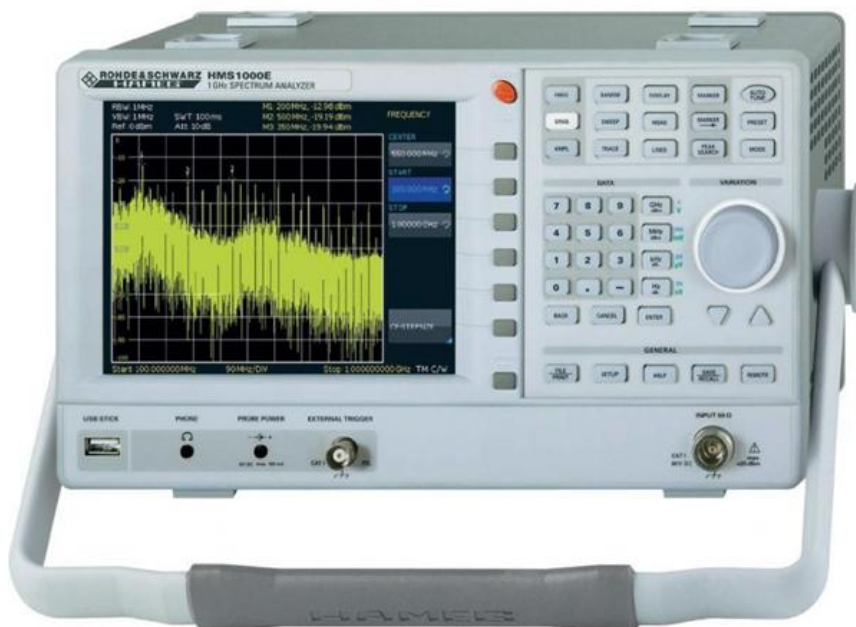
Slika 2.3.4 – 1 Razlaganje signala na ortogonalne komponente (amplituda, frekvencija i faza)



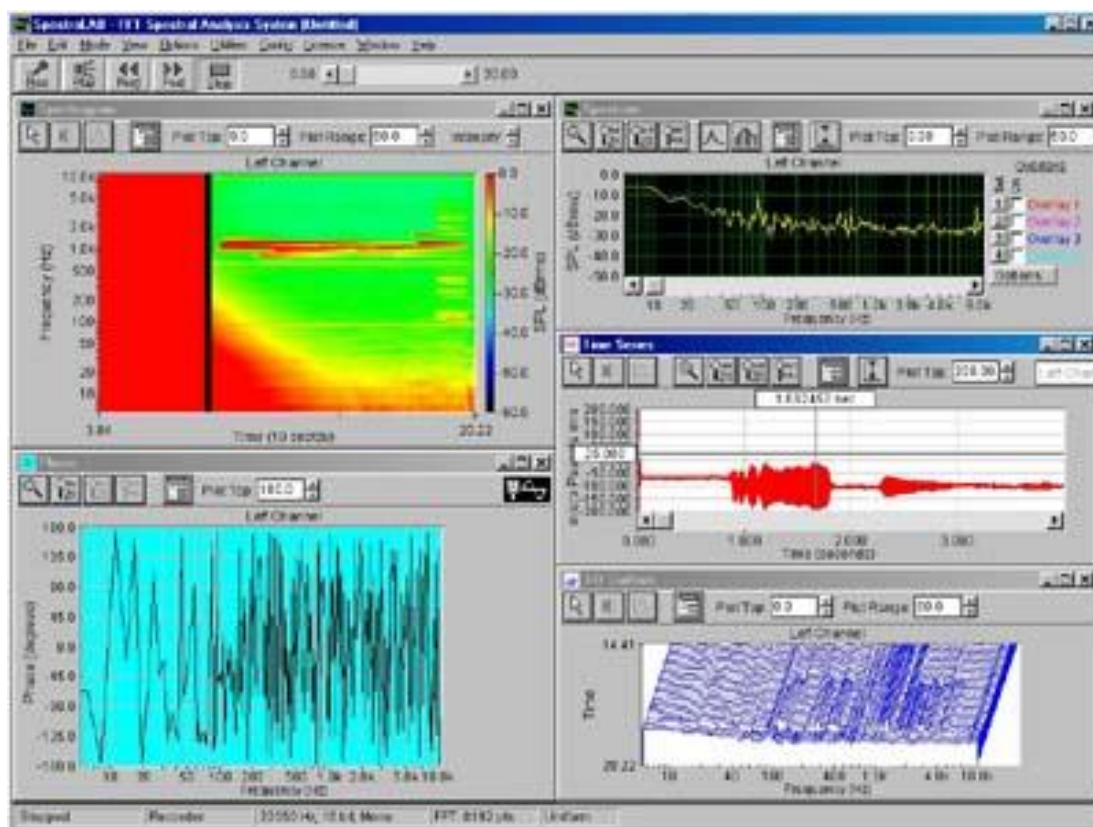
Slika 2.3.4 – 2 Načelna izvedba analognog analizatora spektra



Slika 2.3.4 – 3 Načelna izvedba digitalnog analizatora spektra



Slika 2.3.4 – 4 Prikaz analizatora spektra



Slika 2.3.4 – 4 Programski prikaz analizatora spektra

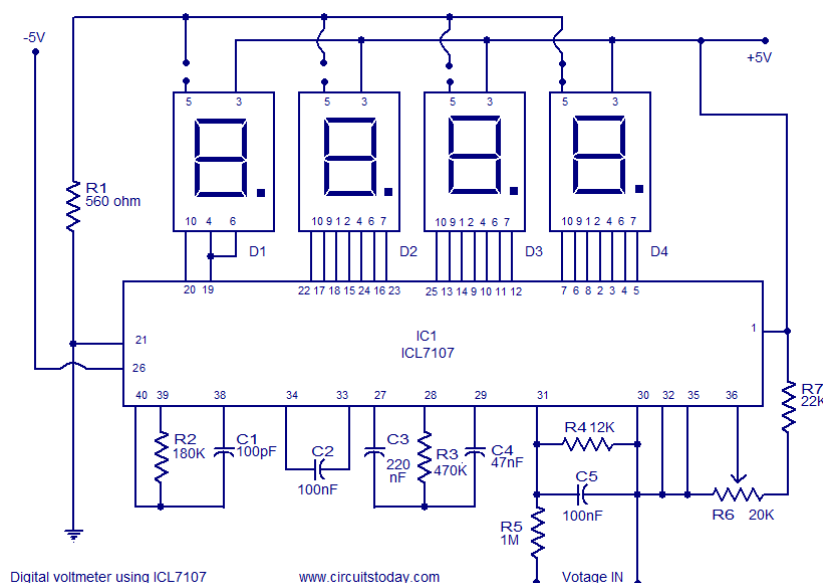
2.4 DIGITALNI MJERNI INSTRUMENTI S JEDNODIMENZIONALNIM PRIKAZOM

2.4.1 DIGITALNI VOLTMETRI

Digitalni voltmetri su elektronički elementi koji mjere napon, a priključuju se paralelno mjernom sustavu, tj. izvoru ili trošilu kojem se želi izmjeriti napon. Prema valnom obliku napona možemo ih podijeliti na istosmjerne i izmjenične. Današnji digitalni voltmetri izvršavaju mjerenja koja su djelomično ili potpuno automatizirana u skladu s instaliranom programskom podrškom mikrokontrolera ili mikroprocesora. Takvi mjerni dijelovi danas su poznati kao pametni mjerni senzori i inteligentni mjerni moduli instrumenta.



Slika 2.4.1 Primjeri digitalnih voltmetara



Slika 2.4.2 Shematski prikaz digitalnog voltmetra sa ICL7107 čipom

Digitalni voltmetri uglavnom su dizajnirani sa analogno-digitalni pretvaračem koji se još naziva integrirajući konverter. Na točnost voltmetra utječe mnogo faktora, uključujući temperaturu i variranje napona napajanja. Kako bi se osiguralo da je čitanje digitalnog voltmetra unutar specificiranih tolerancija proizvođača, potrebno je povremeno kalibriranje.

Prednosti digitalnih voltmetra:

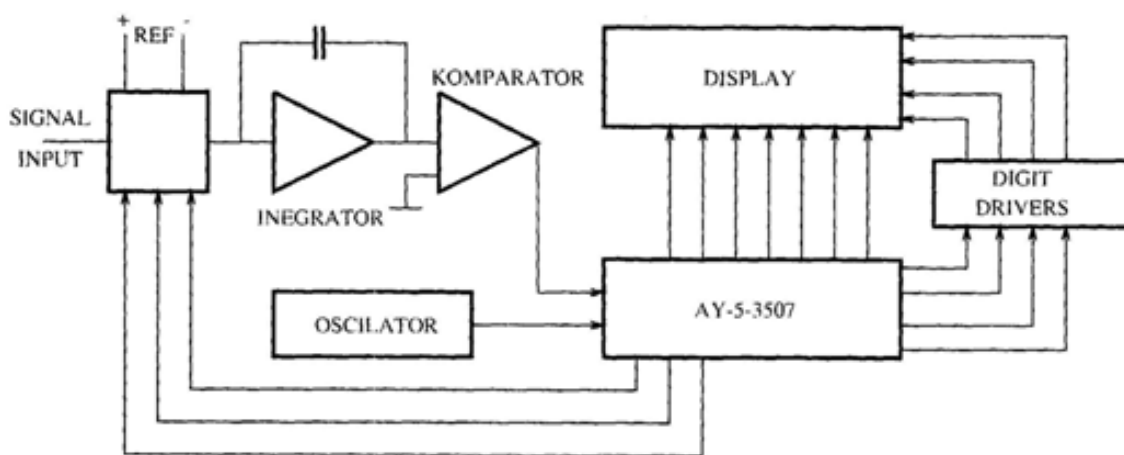
- jednostavno i brzo očitavanje znamenaka na pokazniku
- širok kut gledanja (npr. $\pm 50^\circ$, dok je kod analognih 0°)
- uže granice pogrešaka – DC reda 10^{-6} , AC reda 10^{-4}
- velika brzina odziva (do 100 000 očitavanja u sekundi s razlučivanjem od $4\frac{1}{2}$ znamenaka)
- velika ulazna impedancija ($> 10\text{ M}\Omega$)
- mogućnost povezivanja s računalom
- mogućnost samokalibracije, pohranjivanje podataka u memoriju, matematičkih operacija
- razlučivanje od $3\frac{1}{2}$ do $8\frac{1}{2}$ znamenaka (digits)

Nedostaci digitalnih voltmetra:

- potrebno je najčešće mrežno napajanje
- osjetljivost na smetnje, posebno mrežne frekvencije
- granice pogrešaka su iskazane za vremenski interval od posljednjeg umjeravanja (24h, 30 dana, 180 dana do 1 god.), nakon čega je potrebno ponovo umjeravanje
- moguće su subjektivne pogreške pri očitavanju – zamjena sličnih znamenaka (npr 3 i 5, 6 i 8) ili krivo očitani broj nula (decimalnih mjesta)
- složenija uporaba (bez uputa nisu primjenjivi, jer su moguće kardinalne pogreške)
- osoba ne može istodobno pratiti očitavanja na više digitalnih instrumenata

2.4.1.1 Digitalni izmjenični voltmetri

Uglavnom se koriste ispravljači kao kod analognih izmjeničnih voltmetara no s izraženom primjenom integralnih sklopova s operacijskim pojačalima (integrator, komparator i td.).



Slika 2.4.1.1 – 1 Blok shema digitalnog izmjeničnog voltmetra

Primjer digitalnog izmjeničnog voltmetra sa slike 2.4.1.1 nam govori da ulazni signal dolazi na integrator i nakon toga odlazi na komparator. Signal iz komparatora dolazi na AY-5-3510 gdje se na osnovu napona određuje znamenke na ekranu.

Mjerenje izmjeničnog napona uvijek je okrenuto određivanju efektivne vrijednosti. Među digitalnim voltmetrima su oni što mjere i pokazuju stvarnu efektivnu vrijednost, kod pogonskih mjerenja su i dalje najčešće oni što mjere ispravljenu srednju (average responding voltmeter) ili tjemenu vrijednost (jednostavniji i jeftiniji ispravljač), a pokazuju efektivnu vrijednost. Nedostatak takvih voltmetara je u tome što se pojavljuje pogreška uslijed valnog oblika ako se ne mjeri čisto sinusni valni oblik. Nasuprot prethodnih, voltmetri čija pretvorba AC/DC daje efektivnu vrijednost izmjeničnog mjenenog signala (RMS), pokazuju efektivnu vrijednost neovisno od valnog oblika signala.

2.4.1.2 Digitalni istosmjerni voltmetri

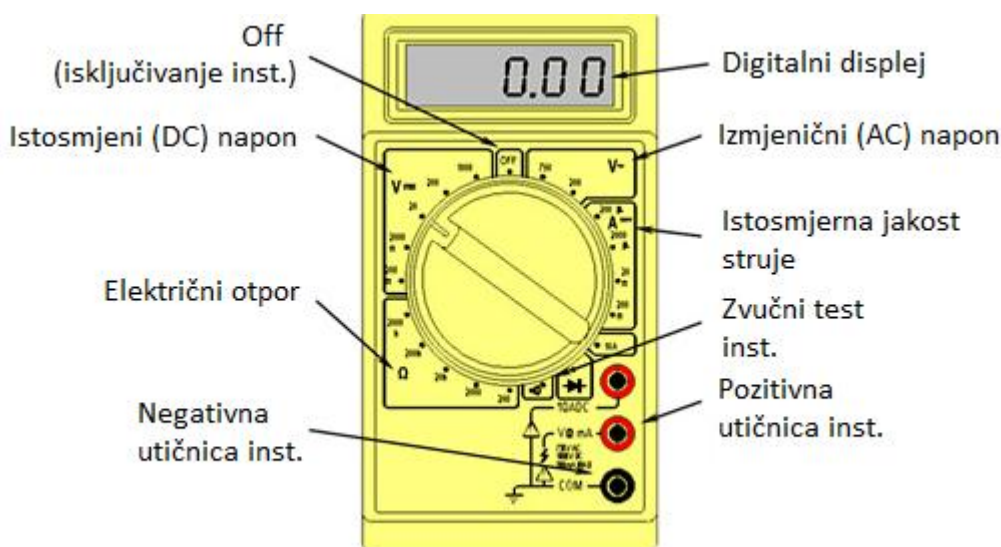
Digitalni istosmjerni voltmetri često se koriste za posredno mjerenje temperature na teško dostupnim mjestima uz pomoć termoparova. Termopar ili termopretvarač, je pretvarač neelektrične veličine (temperature) u električnu (istosmjerni napon). Sastoji se od dvaju međusobno izoliranih vodiča načinjenih od posebnih legura u zajedničkom azbestnom ovitku. Na vrućem kraju, vodiči su zajedno upleteni i zalemljeni, dok su na hladnom kraju slobodni. Vrući se kraj mehanički učvrsti na mjerno mjesto, a hladni kraj na istosmjerni digitalni voltmetar. Iznos napona na hladnom kraju razmjern je temperaturi, što se očitava u tablicama. Digitalni se termometri izrađuju tako da se u sklop istosmjernog digitalnog voltmetra ugradi priključak za mjernu sondu u kojoj je termopar.



Slika 2.4.1.2 – 1 Primjeri korištenja digitalnih istosmjernih voltmetara

2.4.2 DIGITALNI MULTIMETRI

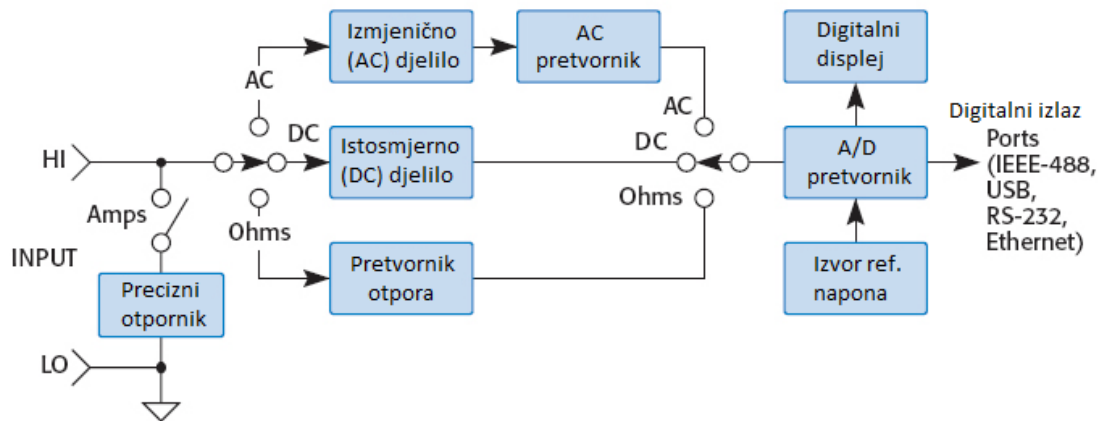
Digitalni multimetri su mjerni instrumenti koji mogu mjeriti jakost istosmjerne i izmjenične struje, istosmjerni i izmjenični napon te električni otpor. Digitalni voltmetar je temeljni sklop u digitalnom multimetru, jer se uz njegovu pomoć mogu neizravno mjeriti i jakost istosmjerne i izmjenične struje, te električni otpor.



Slika 2.4.2 – 1 Primjer digitalnog multimetra



Slika 2.4.2 – 2 Primjer displeja digitalnog multimetra



Slika 2.4.2 – 2 Blok shema digitalnog multimetra

Rad digitalnog mjernog multimetra zasniva se na mjerenju istosmjernog napona, dok se druge veličine kao što su struja, otpor ili izmjenične, mjere na prikladan način pretvorbe u razmjerni istosmjerni napon. Dijelilo za izmjenični napon je frekvencijski neovisno zbog parazitnih kapaciteta. Struja se mjeri preko pada napona na preciznom otporniku poznatog iznosa. Otpor se priključenog otpornika mjeri kao pad napona kojeg na njemu prouzroči struja poznate vrijednosti iz strujnog izvora u samom multimetru (pretvornik otpora). Osim spomenutih vrijednosti, današnji digitalni mjerni multimetri mogu mjeriti kapacitete kondenzatora ili frekvenciju, te temperaturu uz dodatne priključke. Najvažniji dio digitalnog multimetra je analogno-digitalni pretvornik (A/D pretvornik), koji analognu istosmjernu veličinu pretvara u digitalnu. Digitalna veličina je binarnog oblika s određenim brojem bitova. Dekoderom se binarni broj pretvara u dekadski zbog prikaza na ekranu.



Slika 2.4.2 - 3 Prikaz laboratorijskog digitalnog multimetra

2.4.3 DIGITALNI VATMETRI

Digitalne vatmetre možemo podijeliti na jednofazne i trofazne. Ulazni signali (napon i struja) se pomoću A/D pretvornika pretvaraju u digitalni oblik signala. Jednofazni digitalni vatmetri mogu imati više ulaznih kanala napona i struje, na kojima se mogu mjeriti struje i do 20 A te naponi do 600 V. Točnost ovakvih instrumenata je od 0.03% do 0.5%, kod svih mjernih veličina i na svim frekvencijama. Koriste se kod analize rada elektromotornih pogona (elektroničko upravljanje pogona), energetske elektronike i praćenju rada trošila električne energije.



Slika 2.4.3 – 1 Jednokanalna i višekanalna izvedba jednofaznog digitalnog vatmetra

Trofazni digitalni vatmetri koriste se za mjerenje električnih veličina (napon, struja, snaga, frekvencija) u trofaznim sustavima. Točnost ovakvih instrumenta često iznosi i do 0.2%, no ne smije biti ovisna o valnom obliku napona i struje. Također se koriste za mjerenje nesimetričnih trofaznih sustava. Izvode se kao fiksni instrumenti ili kao prijenosni instrumenti. Fiksne izvedbe trofaznih digitalnih vatmetra imaju u sebi ugrađene strujne transformatore opsega 1, 5 ili 20 A kako bi bili pogodni za mjerenje u svim niskonaponskim i srednjenaponskim pogonima. Prijenosni trofazni digitalni vatmetri koriste se za terenska mjerenja. Ovakvi instrumenti koriste strujna klijesta kako bi se dobile veće vrijednosti struje, postoji veza s računalom ili GSM mobilnim telefonom, a može se postići slanje podataka također preko niskonaponske mreže.



Slika 2.4.3 – 3 Prikazi fiksnih digitalnih trofaznih vatmetara



Slika 2.4.3 – 3 Prikazi prijenosnih digitalnih trofaznih vatmetara

2.5 DIGITALNI MJERNI INSTRUMENTI S DVODIMENZIONALNIM PRIKAZOM

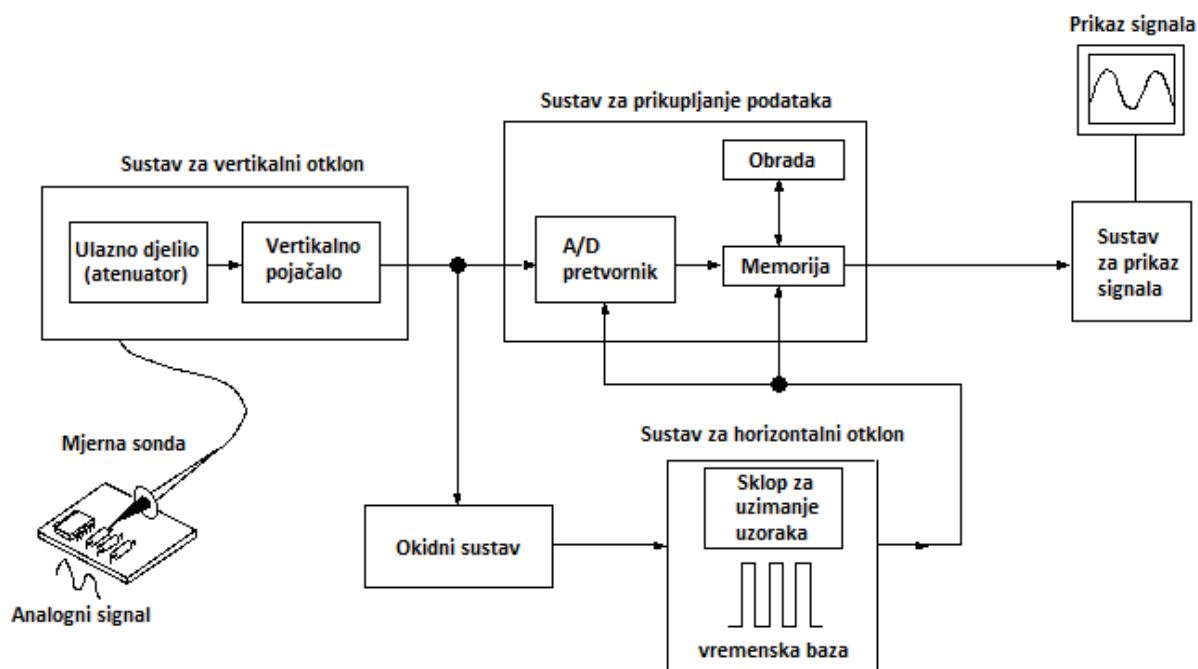
2.5.1 DIGITALNI OSCILOSKOP

Digitalni osciloskopi su podijeljeni u nekoliko grupa: 60, 100, 150 i 250 MHz-područja. Pri tome mogu biti izvedeni kao dvokanalni ili četverokanalni osciloskopi sa monokrom zaslonom (crno-bijeli) ili u boji. Za neke modele digitalnih osciloskopa postoje programske potpore za ispis podataka sa zaslona i prijenos podataka na računalo.

Digitalni osciloskop uzima uzorke analognog signala, a pomoću analogno-digitalnog pretvornika pretvara ih u digitalni signal. Nakon obrade prikazuje ih na LCD displeju ili pomoću digitalno-analognog pretvarača pretvara u analogni signal i prikazuje na zaslonu katodnoj cijevi. Ulogu otklonskog sustava katodne cijevi digitalnog osciloskopa s LCD displejom preuzima mikroprocesor. Digitalni osciloskopi mogu se podijeliti prema izvedbi na:

- digitalni osciloskopi s memorijom (eng. digital storage oscilloscopes)
- digitalni osciloskopi s uzimanjem uzoraka (eng. digital samplin oscilloscopes)
- digitalni fosforni osciloskopi (eng. digital phosphor oscilloscopes)

Glavni dijelovi svakog digitalnog osciloskopa su: sustav za vertikalni i horizontalni otklon, sustav za prikupljanje podataka, te sustav za prikaz signala.

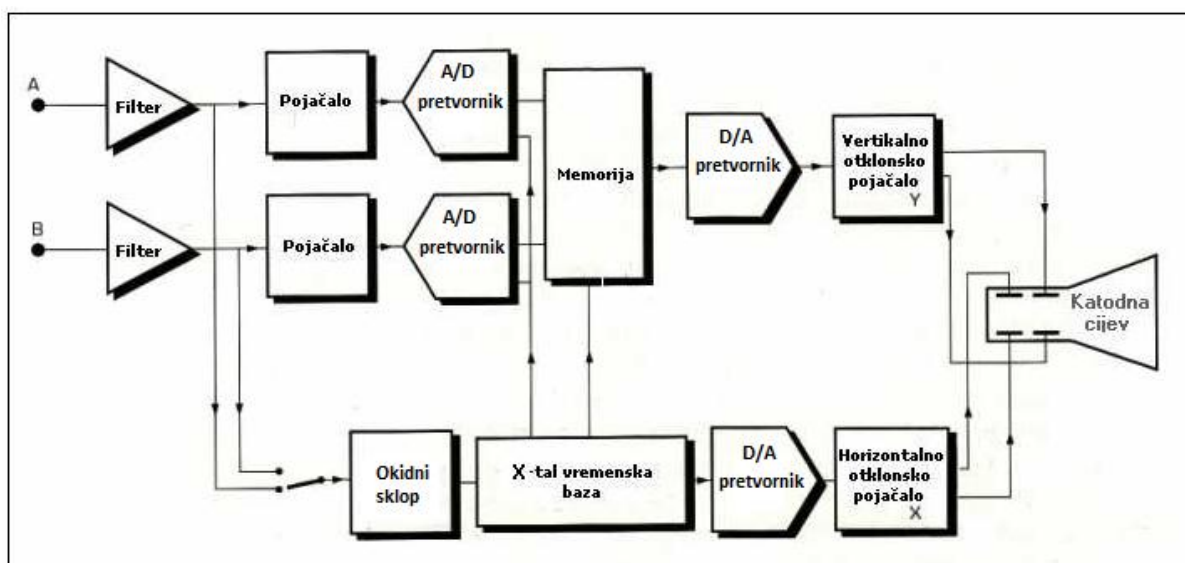


Slika 2.5.1 – 1 Načelna izvedba digitalnog osciloskopa

2.5.1.1 Digitalni osciloskopi s memorijom

Digitalni osciloskopi s memorijom su osnovna izvedba svakog digitalnog osciloskopa. Prednosti ovakvih osciloskopa spram analognih su:

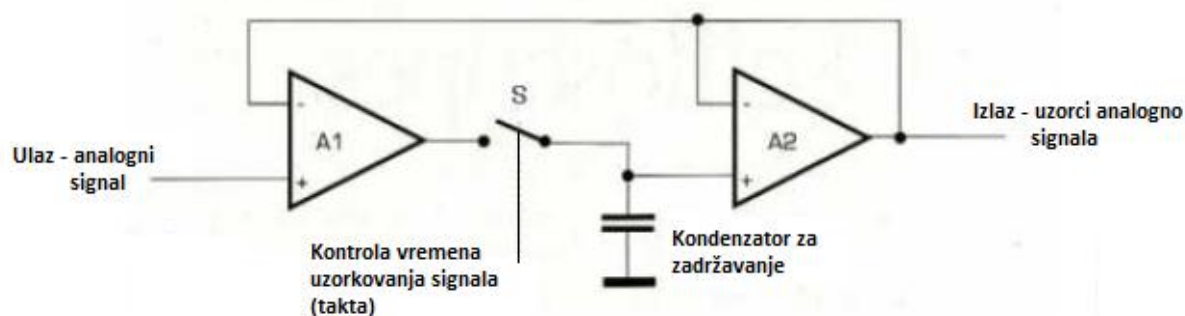
- mogu se prikazati velike količine pohranjenih informacija
- moguća su potpuno automatska mjerenja, (sa ili bez pokazivača)
- valni oblici mogu biti pohranjeni na neodređeno vrijeme
- valni oblici se mogu prenijeti u računalu za pohranu i daljnju analizu
- moguće je iscrtati valne oblike na pisaču ili ploteru za dokumentacijske svrhe
- novi valni oblik može se usporediti sa referentnim, (ručno ili automatski)
- odluke se mogu donositi na osnovi uspjelog (Passed) ili neuspjelog (Failed) testa
- informacije iz valnog oblika mogu biti obrađene matematički.



Slika 2.5.1.1 – 1 Blok shema digitalnog osciloskopa s memorijom

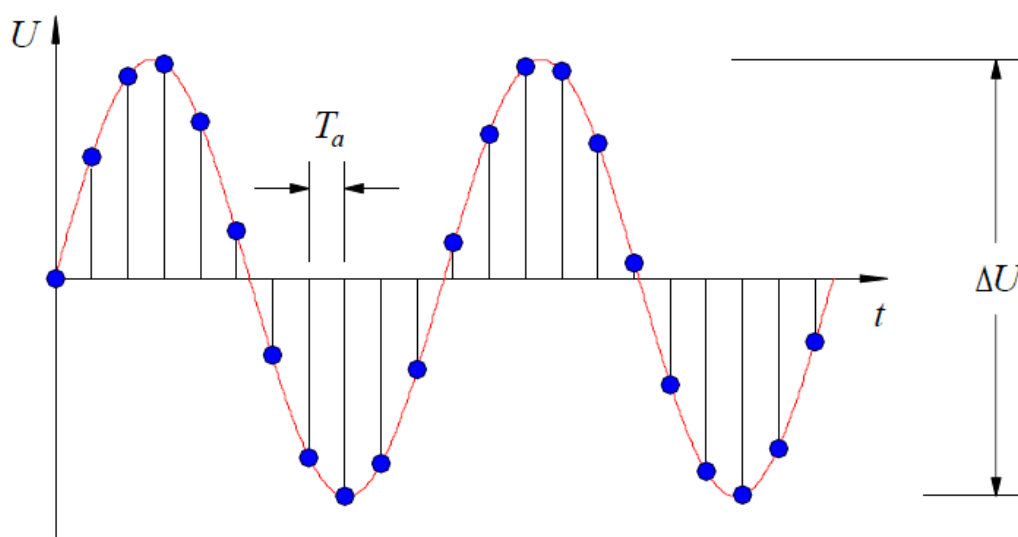
Digitalna pohrana predstavlja memoriranje podataka u digitalnom obliku u osciloskopu. Ulazni signal se prvo uzorkuje u pravilnim vremenskim intervalima, zatim se trenutne vrijednosti uzoraka dovode u sklop za analogno digitalnu pretvorbu (A/D converter), na čijem izlazu dobijemo binarne riječi koje predstavljaju svaki uzorak signala. Ovaj process se naziva digitalizacija. Brzina uzorkovanja ovisi o samom osciloskopu, a uglavnom se kreće u rasponu od 20 MS/s do 200 MS/s (megasamples per second). Binarne vrijednosti se pohranjuju u memoriju osciloskopa, te se zatim čitaju iz memorije i vode u sklop za digitalno analognu pretvorbu (D/A converter). Analogni signal se zatim povećava i prikazuje na zaslonu katodne cijevi. Važno je naglasiti da slika na zaslonu predstavlja rekonstrukciju originalnog signala, a ne signal koji je doveden na ulaze osciloskopa.

Digitalno pohranjivanje podataka izvodi se u dva koraka. Prvo se uzorkuje ulazni napon, pomoću sklopa za uzorkovanje i zadržavanje (Sample and Hold circuit), koji je prikazan na slici 2.5.1.1 – 2.



Slika 2.5.1.1 – 2 Sklop za uzorkovanje i zadržavanje

Ulazno pojačalo A1 puni i prazni kondenzator za zadržavanje kada je sklopka S zatvorena, no kada se sklopka S otvori, napon na kondenzatoru ne može se više mijenjati. Izlazni signal iz spremnika (buffer) A2 se dovodi u analogno-digitalni pretvornik (A/D converter) koji mjeri amplitudu uzorka i prezentira je pomoću digitalne riječi.



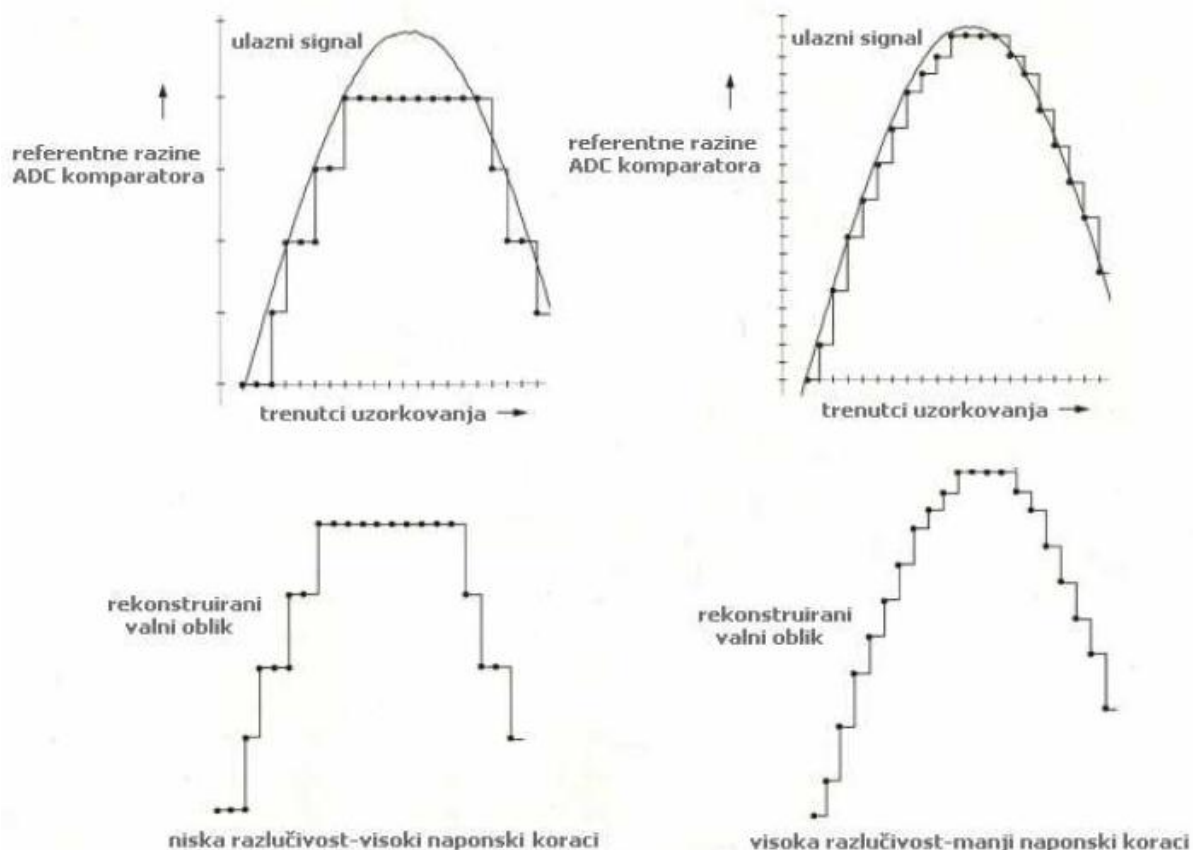
Slika 2.5.1.1 – 3 Uzimanja uzoraka analognog signala u vremenu T_a

Osnovna funkcija A/D pretvornika je odrediti amplitudu uzorka uspoređujući ga sa vrijednošću referentnog napona. Veći broj kompartora i duži lanac otpornika omogućavaju prepoznavanje više naponskih razina ulaznog signala, čime je određena vertikalna razlučivost (rezolucija) osciloskopa. Veća vertikalna rezolucija omogućava prikaz manjih detalja signala u valnom obliku.

Broj naponskih razina koji se može prepoznati i kodirati, može se izračunati prema izrazu:

$$N = 2^n$$

gdje je N – broj nivoa, a n – broj bitova.

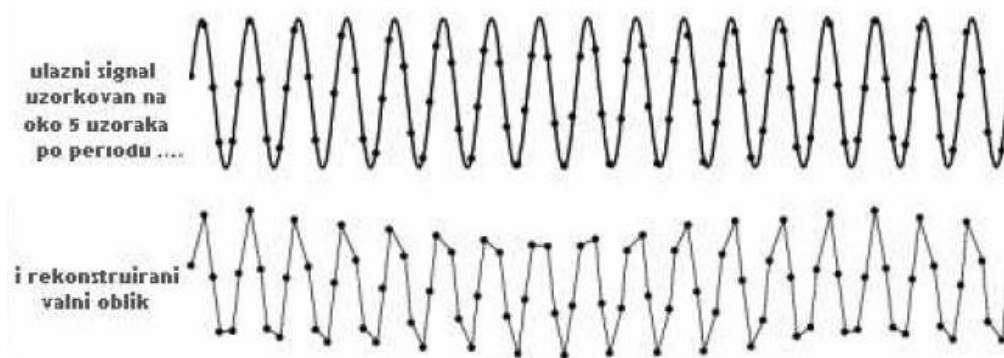


Slika 2.5.1.1 – 4 Efekt vertikalne rezolucije na prikaz valnog oblika

Većina digitalnih osciloskopa koristi 8-bitne pretvarače koji su u stanju opisati signal sa $2^8 = 256$ različitih naponskih razina. To daje dovoljno podataka za mjerenja i proučavanje signala. Na taj način, najmanji korak signala prikazan je otprilike iste veličine kao promjer pixela na CRT ekranu. Jedna izlazna riječ A/D pretvornika predstavlja vrijednost jednog uzorka, sadrži 8 bita, te se naziva Byte. Praktično ograničenje za sve veću razlučivost jeste sama cijena. Rekonstrukcijom A/D pretvornika svaki dodatni bit u izlaznoj riječi zahtjeva dvostruko veći broj komparatora i veći broj kodnih pretvarača. To uzrokuje dvostruko zauzimanje memorijskog prostora i procesorske snage, i usporava rad okolnog sklopovlja. Dodatna rezolucija, dakle povećava cijenu sklopovske izvedbe digitalnog osciloskopa.

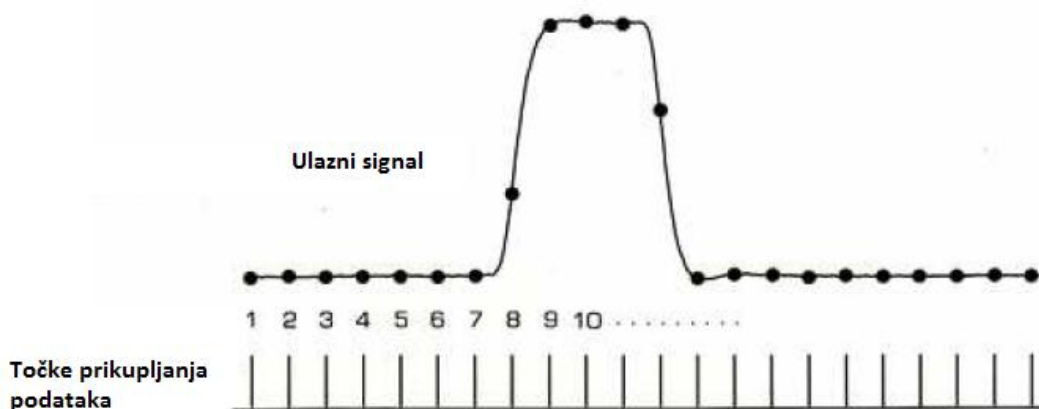
Zadatak horizontalnog sustava digitalnih osciloskopa je da osigura pohranu akviziranih uzoraka u pravom trenutku. Kao i kod analognih osciloskopa, brzina horizontalnog otklona ovisi o postavkama vremenske baze (T/DIV). Ukupnu skupinu uzoraka koja čini jedan valni oblik, nazivamo zapis, a može se koristiti za rekonstrukciju jednog ili više ekrana. Broj uzoraka koji se mogu pohraniti zovemo duljina zapisa ili akvizicijska duljina, izraženo u Byte ili KByte, gdje 1 KByte (1 KB) sadrži 1.024 uzorka. Obično, digitalni osciloskopi prikazuju 512 uzoraka preko horizontalne osi. Broj uzoraka koji se mogu prikazati stalan, a mijenjanje postavki vremenske baze uzrokuje promjenu brzine uzorkovanja. Brzina uzorkovanja određena je za pojedinačni instrument i vrijedi samo za određene postavke vremenske baze. Na nižim postavkama vremenske baze, koristi se niža učestalost uzorkovanja.

Kao praktično pravilo, uzima se da je deset uzoraka u periodu minimalni broj koji garantira dovoljno signalnih detalja. Signali sa manje detalja zahtijevaju pet uzoraka u periodu što može biti dovoljno za prikaz osnovnih karakteristika signala. Za osciloskope sa maksimalnom brzinom uzorkovanja od 200 MS/s., proizlazi da je maksimalna frekvencija ispravno rekonstruiranog signala od 20 do 40 MHz. U tim slučajevima, kvaliteta prikaza može se poboljšati posebnim sistemom prikaza koji najbolje iscrtava sinusni valni oblik kroz uzorke, što je poznato kao sinusna interpolacija.



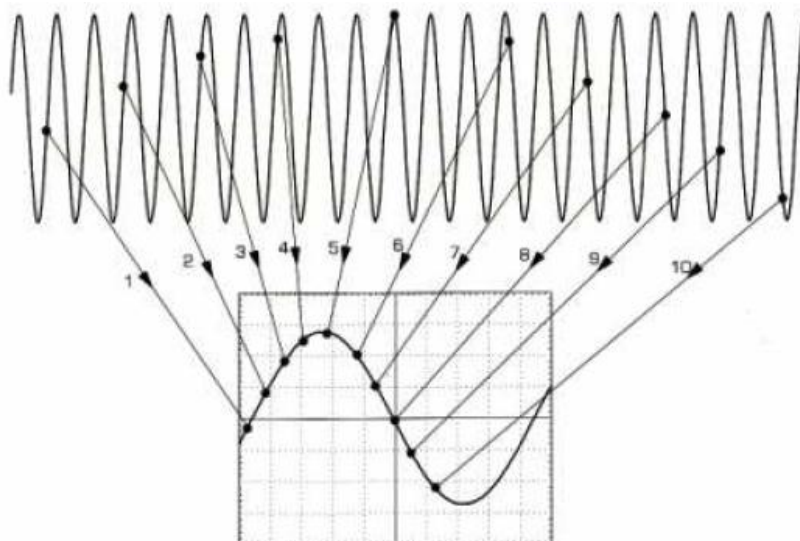
Slika 2.5.1.1 – 5 Sinusni signal uzorkovan sa 5 uzoraka u periodu

Uzorkovanje u stvarnom vremenu ili akvizicija predstavlja prethodno opisani postupak digitalizacije. Svi uzorci uzimaju se na isti način, određenim redoslijedom kako se ponavljaju dijelovi signala na zaslonu osciloskopa. Samo jedan okidni uvjet uzrokuje ukupnu akviziciju.



Slika 2.5.1.1 – 6 Uzorkovanje u stvarnom vremenu

U mnogim primjenama, vremenska rezolucija koja je dostupna u stvarnom vremenu uzorkovanja nije dovoljna. Često se signali za ove namjene ponavljaju, tj. jednak uzorak signala se ponavlja u pravilnoj rezoluciji koja je dostupna u stvarnom intervalima. Za te signale, osciloskopi mogu izgraditi valni oblik iz skupine uzoraka, uzimanih u uzastopnim ciklusima signala. Svaka nova skupina uzoraka uzima se od novog okidnog uvjeta. To nazivamo odgovarajuće vrijeme uzorkovanja. Na taj način, nakon jednog okidnog uvjeta osciloskop akvizira mali dio signala, na primjer pet uzoraka, i pohranjuje ih u memoriju. Slijedeći okidni uvjet koristi se za uzimanje slijedećih pet koji su pohranjeni na različitim lokacijama u istoj memoriji, i tako dalje. Nakon velikog broja okidnih događaja, dovoljno uzoraka je pohranjeno u memoriji za rekonstrukciju kompletnog valnog oblika na zaslonu. Odgovarajuće uzorkovanje koristi dvije različite tehnike: uzastopno i slučajno uzorkovanje.

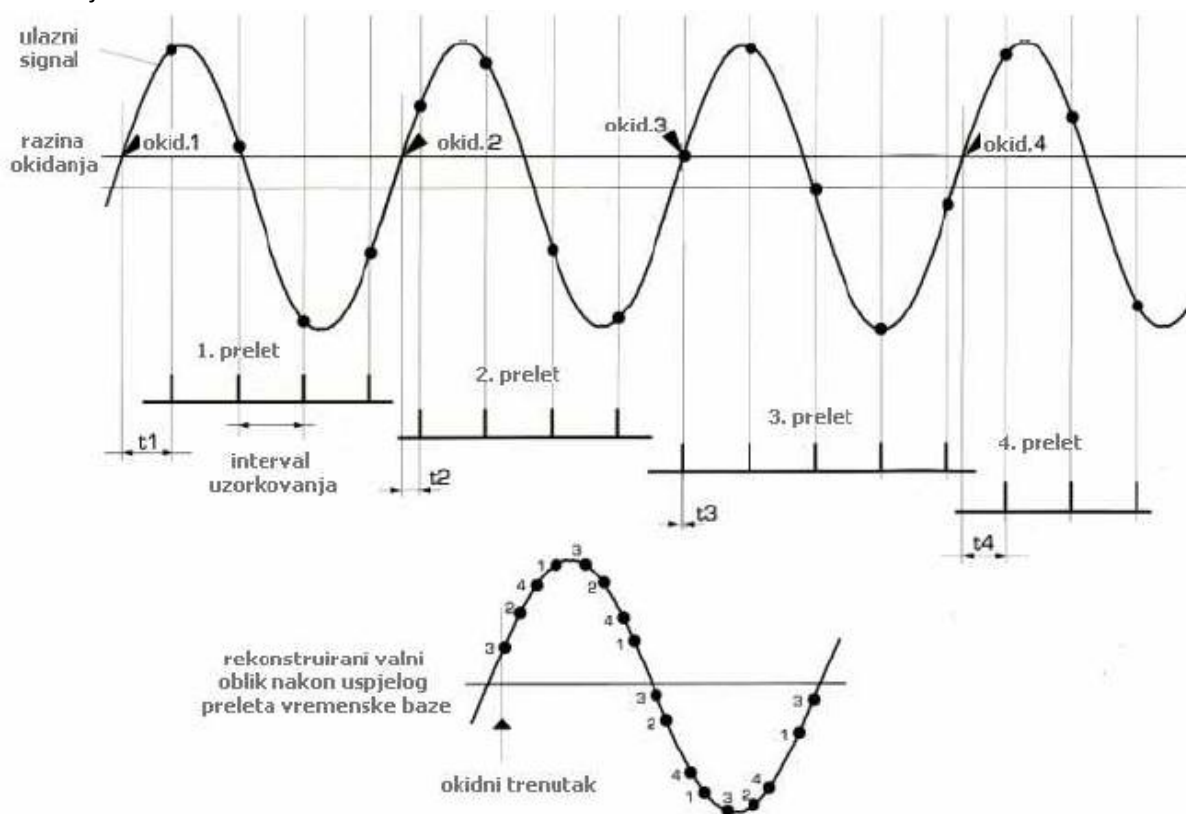


Uzastopno uzorkovanje, je način uzimanja uzoraka u fiksnom redoslijedu, s lijeva na desno preko ekrana. Svaki uzorak je nastao kao rezultat novog okidnog uvjeta. Da bi popunili cjelovit blok podataka, okidni uvjeti redoslijedom formiraju zahtijevane pozicije memorije.

Slika 2.5.1.1 – 7 Prikaz valnog oblika s uzastopnim uzorkom

Svaki novi 'n' –ti uzorak uzima se nakon neznatno dužeg kašnjenja $(n-1) \cdot \Delta t$ s obzirom na slične okidačke uvjete. Rezultat toga je zaslon predložen s uzorcima fiksnog redoslijeda, od prvog uzorka na krajnjoj lijevoj strani zaslona, pa do svakog slijedećeg uzorka na desno, koji prikazuju valni oblik. Broj uzimanja uzoraka, a time i broj okidnih događaja, jednak je duljini zapisa. Uzastopno uzorkovanje omogućava kašnjenje naknadnim okidanjem, ali ne može osigurati informaciju koja prethodi okidnom uvjetu.

Slučajno uzorkovanje je način akviziranja grupe uzoraka u slučajnim trenucima neovisno o okidnim uvjetima. Ti uzorci pripadaju određenom vremenskom intervalu, a određeni su taktom uzorkovanja. Dok se uzorci uzimaju i pohranjuju neprekidno, instrument čeka da se dogodi okidni uvjet. Kada nastane jedan okidni uvjet, tajmer određuje vrijeme mjerenja do slijedećeg trenutka uzorkovanja. Budući da je interval uzorkovanja određen, mjerenje omogućuje osciloskopu da obuhvati mjesta u memoriji za sve akvizirane uzorke.



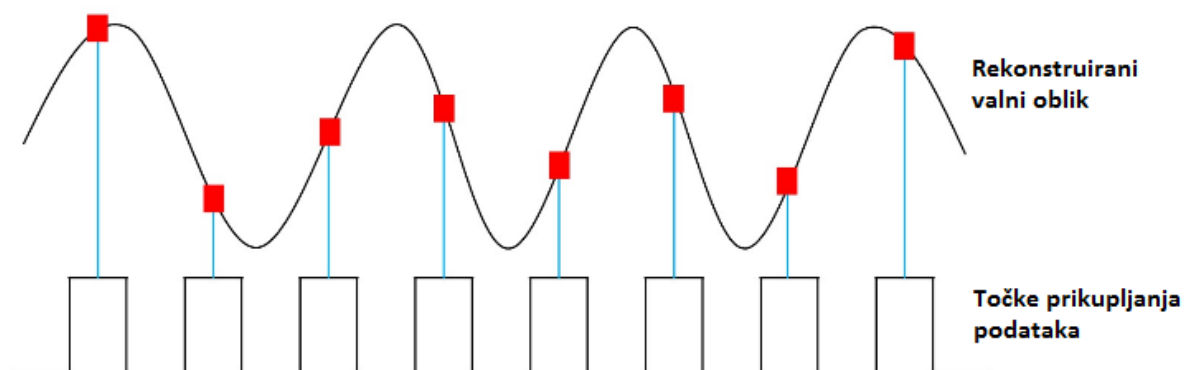
Slika 2.5.1.1 – 8 Slučajno uzorkovanje i prikaz valnog oblika signala

Kod digitalnih osciloskopa s memorijom, valni oblik je akviziran i zapisan u memoriji prije nego što se prikazuje. Kod nekih osciloskopa sa digitalnom pohranom, postoji i drugi tip katodne cijevi, sličan onome kod PC monitora i televizora, kod kojih snop otklanja magnetsko polje pomoću zavojnice koja je montirana izvan katodne cijevi, što nazivamo magnetski otklon. Ove cijevi mogu raditi sa ograničenim opsegom otklonskih frekvencija, na istom principu kao i TV ekrani, gdje su linije napisane za fiksne frekvencije s lijeva na desno, jedna blizu druge. Ispisivanje jednog kompletnog ekrana (punog polja) može uzeti 500 ili više linija. Digitalni sustav obrade izračunava koje točke na ekranu moraju biti osvijetljene, a kad otklonski sustav dosegne te točke na zaslonu mlaz elektrona ih intenzivira. Ovaj tip zaslona se naziva rasterski skeniran zaslon, a koriste ga samo digitalni osciloskopi s memorijom, a nikako analogni. Ono što vidimo na zaslonu nije ulazni signal, već rekonstrukcija podataka koji opisuju ulazni signal, uzetih u nekim ranijim vremenskim trenucima. Pohranjivanje valnog oblika obavlja se u memoriji osciloskopa, nakon čega se on može kopirati u back-up memoriju, poznatu kao registar memorijskih lokacija, za analizu u kasnijoj fazi ili referentnu vrijednost u svrhu usporedbe. Digitalni osciloskopi su opremljeni određenim kapacitetom te memorije koja omogućava pohranu 2-200 valnih oblika. Memorija može biti organizirana za pohranu

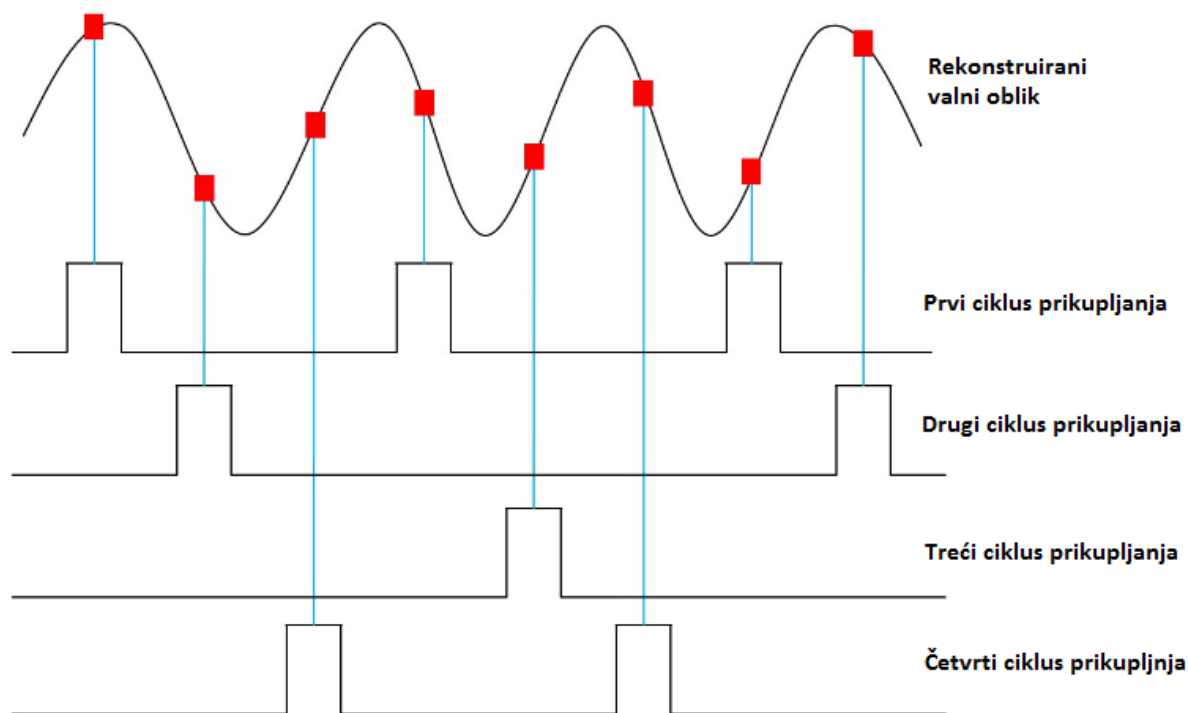
valnih oblika, u kojem je svaki višekanalno akviziran valni oblik pohranjen zasebno ili kao podatkovna memorija, u kojoj su istovremeno pohranjeni svi akvizirani blokovi podataka istovremeno, bez obzira na broj kanala, a prikladnija je za čuvanje svih međusobno ovisnih podataka zajedno. Velika količina memorije je također prikladna za inženjere koji rade na terenu. Ona se može koristiti za pohranu svih svrsishodnih valnih oblika za vrijeme terenskih mjerenja, kao i njihovo naknadno kopiranje, odnosno premještanje u računalu zbog daljnje analize.

2.5.1.2 Digitalni osciloskopi s uzimanjem uzoraka

Digitalni osciloskopi s uzimanjem uzoraka koriste se kod analize signala na vrlo visokim frekvencijama (viši od 50 GHz), gdje prikupljaju uzorku više puta, kroz nekoliko ciklusa (perioda). Na takav način konstruira sliku signala u ekvivalentnom vremenu, odnosno u vremenu dok traje ponavljanje signala.



Slika 2.5.1.2 – 1 Prikupljanje uzoraka signala u stvarnom vremenu bez ponavljanja

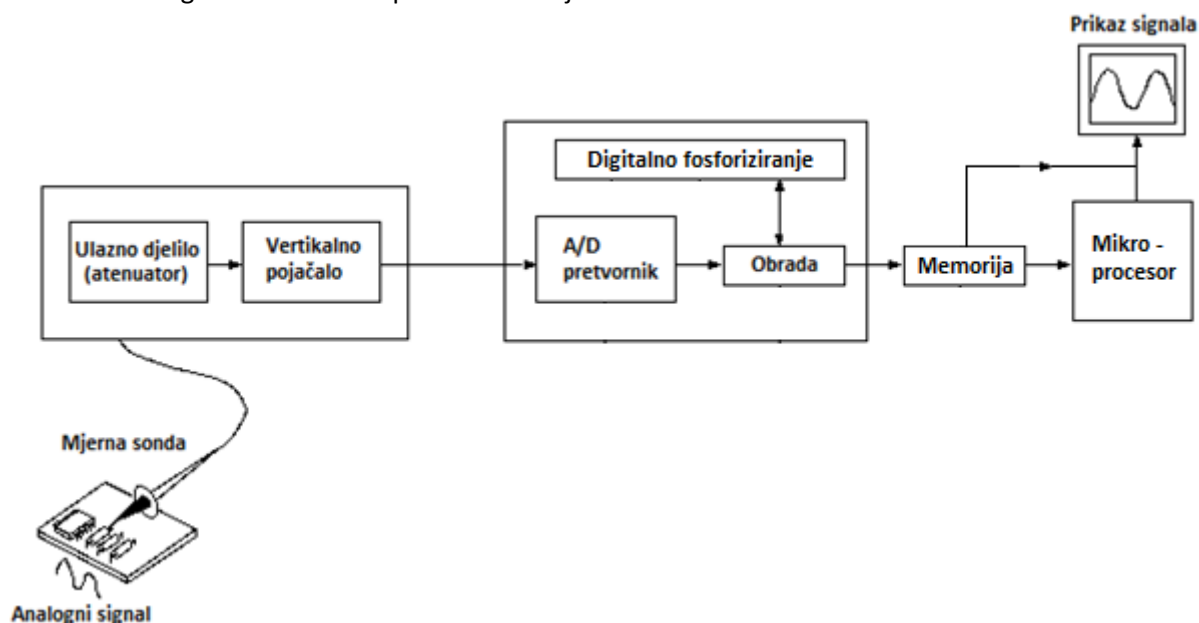


Slika 2.5.1.2 – 1 Prikupljanje uzoraka signala u ekvivalentnom vremenu sa ponavljanjem

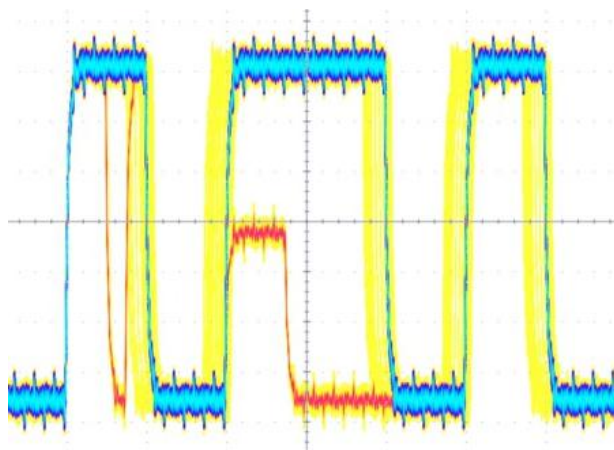
Ovakav tip uzorkovanja je najprikladnija kod serijskih prijenosa podataka, okidnih impulsa u digitalnim sklopovima, kod poluvodičkog testiranja, te testiranje impulsnih pojačala. Prednost ovakvog uzorkovanja je da je njezin analogni-digitalni pretvarač (A/D converter), samo treba dovoljno brzo uhvatiti jedan uzorak u svakom ciklusu valnog oblika signala, a ne nekoliko desetaka ili stotina uzoraka koji se u realnom vremenu zahtijevaju. To omogućava digitalnom osciloskopu snimanje valnih oblika signala s mnogo višim frekvencijama uzorkovanja. Nedostatci ovakvih osciloskopa su njegova cijena na tržištu o malen naponski mjerni opseg oko 3 V.

2.5.1.3 Digitalni fosforni osciloskopi

Digitalni fosforni osciloskopi uglavnom se koriste za mjerenja i obradu signala, analiziranje detalja signala, okidanje video signala, hvatanje brzih signala itd., gdje to nije moguće ostvariti sa standardnim digitalnim osciloskopom s memorijom.

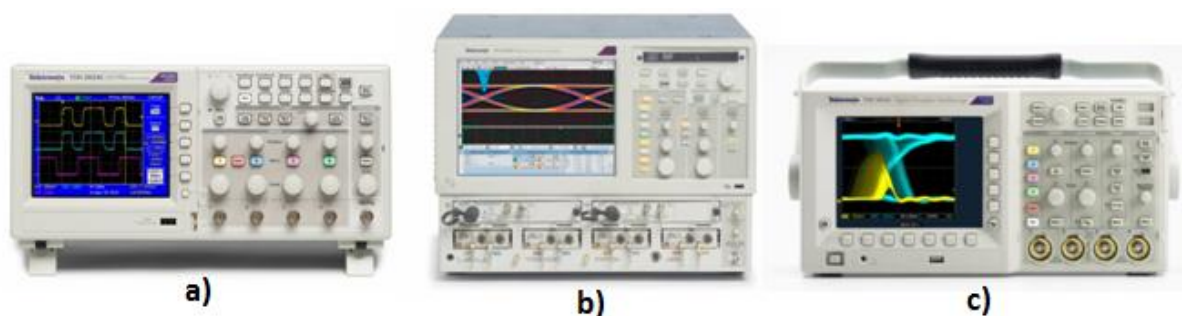


Slika 2.5.1.3 – 1 Načelna izvedba digitalnog fosfornog osciloskopa



Digitalni fosforni osciloskopi sadrže mikroprocesore koji služe samo za uzimanje i pohranu mjernih signala. Na takav način moguće je npr. detektirati lažne impulse i pogreške koje nastaju kod digitalnih signala uslijed prijelaza iz jednog stanja u drugo. Također izravno prikazuju ovisnost amplitude signala o vremenu.

Slika 2.5.1.3 – 2 Prikaz digitalnog signala pomoću digitalnog fosfornog osciloskopa



Slika 2.5.1.3 – 3 Stvarni prikaz a) digitalnog osciloskopa s memorijom, b) digitalnog osciloskopa s uzimanjem uzoraka, c) digitalnog fosfornog osciloskopa

2.6 PITANJA ZA PROVJERU ZNANJA

1. Čemu služe električni mjerni instrumenti?
2. Koje su karakteristične osobine mjernih instrumenata?
3. Što predstavlja mjerni opseg instrumenta?
4. Pojasnite razlučivost instrumenta.
5. Kako se definira točnost instrumenta?
6. Kako se definira osjetljivost instrumenta?
7. Što predstavlja konstanta k instrumenta?
8. Kako se iskazuju dozvoljene granice pogrešaka analognog instrumenta?
9. Pojasnite umjeravanje analognog instrumenta.
10. Navedite sve klase točnosti analognih instrumenata.
11. Koje su prednosti analognih mjerila u odnosu na digitalne?
12. Pojasnite kazaljke analognih instrumenata.
13. Pojasnite ljestvice analognih instrumenata.
14. Koji su osnovni dijelovi digitalnog instrumenta?
15. Koje su prednosti digitalnih mjerila?
16. Koji su nedostaci digitalnih mjerila?
17. Što su kvazianalogni instrumenti.
18. Na koji način se proširuje mjerni opseg instrumenta?
19. Kako se izvodi proširenje strujnog mjernog opsega?
20. Kako se izvodi proširenje naponskog mjernog opsega?
21. Kako sve možemo podijeliti analogne mjerne instrumente?
22. Pojasnite rad instrumenta s pomičnim svitkom i permanentnim magnetom. Gdje se on koristi?
23. Pojasnite rad instrumenta s pomičnim magnetom. Gdje se on koristi?
24. Pojasnite rad elektrostatičkog instrumenta. Gdje se on koristi?
25. Pojasnite rad instrumenta s pomičnim svitkom i ispravljačem. Gdje se on koristi?
26. Pojasnite rad instrumenta s pomičnim željezom. Gdje se oni koriste?
27. Pojasnite rad elektrodinamičkog instrumenata bez željeza. Gdje se on koristi?
28. Pojasnite rad elektrodinamičkog instrumenta koji je zatvoren željezom. Gdje se on koristi?
29. Pojasnite rad instrumenta s unakrsnim svitcima. Gdje se on koristi?
30. Pojasnite rad induksijskog instrumenta. Gdje se on koristi?
31. Pojasnite rad induksijskog brojila. Gdje se on koristi?
32. Pojasnite rad instrumenta s vrućom žicom. Gdje se on koristi?
33. Pojasnite rad instrumenta s termopretvornikom. Gdje se on koristi?
34. Pojasnite rad bimetalnog instrumenta. Gdje se on koristi?
35. Pojasnite rad frekvencijometra s mehaničkom rezonancijom. Gdje se on koristi?
36. Pojasnite rad frekvencijometra s električnom rezonancijom. Gdje se on koristi?
37. Što su analogni instrumenti s dvodimenzionalnim prikazom?
38. Definirate što je katodni osciloskop?
39. Što se sve može mjeriti katodnim osciloskopom?
40. Kako možemo podijeliti osciloskope prema načinu rada?
41. Koji su osnovni dijelovi katodnog osciloscopa?
42. Koji su dijelovi katodne cijevi?
43. Pojasnite rad katodne cijevi.
44. Koji su dijelovi sustava za vertikalni otklon?
45. Koja je uloga ulaznog preklopnika?
46. Koja je uloga ulaznog dijelila u vertikalnom otklonskom sustavu?
47. Pojasnite ulogu pretpojačala i pojačala u vertikalnom otklonskom sustavu.
48. Čemu služi linija za kašnjenje?
49. Pojasnite sve načine rada elektroničke preklopke.
50. Čemu služi sustav za horizontalni otklon?
51. Navedite sve dijelove sustava za horizontalni otklon.
52. Pojasnite sve izvore okidnog impulsa.
53. Koja je uloga okidnog sklopa?
54. Pojasnite ulogu generatora pilastog napona.
55. Kako se izvršava priprema za mjerenje sa katodnim osciloskopom?
56. Na koji način možemo mjeriti amplitude i periode izmjeničnog signala katodnim osciloskopom?

57. Kako možemo mjeriti istosmjerne signale katodnim osciloskopom?
58. Na koji način se izvršava mjerenje dubine amplitude modulacijskog signala pomoću katodnog osciloskopa?
59. Kako možemo mjeriti pojačanja i fazni pomak signala katodnim osciloskopom?
60. Pojasnite mjerenje omjera dvaju frekvencija katodnim osciloskopom.
61. Čemu služi mjerna sonda katodnog osciloskopa?
62. Koji su sastavni dijelovi pasivne mjerne sonde?
63. Koje su karakteristike pasivnih mjernih sondi?
64. Čemu služi kompenzacija pasivnih mjernih sondi?
65. Pojasnite aktivne mjerne sonde.
66. Koja je uloga grafičkih pisaa?
67. Što su oscilografski instrumenti s pomičnim papirom?
68. Kako rade oscilografski uređaji s pomičnim papirom?
69. Gdje se koriste oscilografski uređaji s pomičnim papirom?
70. Čemu služe X-Y pisaa?
71. Pojasnite rad voblera.
72. Čemu služe analizatori spektra?
73. Kako možemo podijeliti analizatore spektra?
74. Što su digitalni voltmetri?
75. Koje su prednosti digitalnih voltmetara?
76. Koji su nedostaci digitalnih voltmetara?
77. Kako rade digitalni izmjenični voltmetri?
78. Kako rade digitalni istosmjerni voltmetri?
79. Čemu služe digitalni multimetri?
80. Kako rade digitalni multimetri?
81. Pojasnite digitalne vatmetre.
82. Kako sve možemo podijeliti digitalne osciloskope prema izvedbi?
83. Koji su glavni dijelovi digitalnih osciloskopa?
84. Koje su prednosti digitalnih osciloskopa s memorijom?
85. Na koji način rade digitalni osciloskopi s memorijom?
86. Koji je zadatak horizontalnog sustava digitalnog osciloskopa?
87. Pojasnite uzorkovanje signala u stvarnom vremenu.
88. Pojasnite uzastopno uzorkovanje signala.
89. Pojasnite slučajno uzorkovanje signala.
90. Zašto se koristi digitalni osciloskop s uzimanjem uzoraka?
91. Pojasnite rad digitalnog osciloskopa s uzimanje uzoraka.
92. Gdje se koristi digitalni fosforni osciloskop?

2.7 ZADATCI

1. Električni mjerni transformatori služe za mjerenje električnih veličina kao što su:
 - a) otpor
 - b) napon
 - c) kapacitet
 - d) frekvencija
2. Galvanometar služi za mjerenje čega:
 - a) otpora
 - b) snage
 - c) napona
 - d) električne struje
3. Elektronički mjerni instrumenti mogu biti:
 - a) analogni
 - b) digitalni
 - c) elektronički
 - d) stepeničasti
4. Mjerni opseg predstavlja skup vrijednosti mjernih veličina za koje instrument mjeri:
 - a) van svojih granica
 - b) unutar svog razreda
 - c) van svog razreda
 - d) unutar svojih granica pogrešaka
5. Razlučivost analognih instrumenta izvodi se pomoću:
 - a) točnosti instrumenta
 - b) broja znamenki
 - c) podjeljka skale
 - d) mjerene veličine
6. Razlučivost digitalnih instrumenta izvodi se pomoću:
 - a) točnosti instrumenta
 - b) broja znamenki
 - c) podjeljka skale
 - d) mjerene veličine
7. Točnost instrumenta definira se kao:
 - a) zbroj izmjerene i stvarne vrijednosti
 - b) razlika izmjerene i stvarne vrijednosti
 - c) suma izmjerene i stvarne vrijednosti
 - d) se ne može odredit
8. Prema točnosti instrumente dijelimo u:
 - a) razrede točnosti
 - b) klase točnosti
 - c) skupine točnosti
 - d) ispravne/neispravne

9. Kazaljka analognog instrumenta prije početka mjerenja (uključenja) mora biti na:
 a) max. odklonu skale b) sredini skale c) mehaničkoj nuli d) električnoj nuli
10. Dozvoljene granice pogriješaka analognih instrumenata najčešće se iskazuju kao:
 a) zbroj izmjerene i stvarne vrijednosti b) minimalne vrijednosti c) maksimalne vrijednosti d) postotci
11. Umjeravanje instrumenta izvodi se sa instrumentom koji je bolji za:
 a) 3 razreda točnosti b) 2 klase točnosti c) 4 skupine točnosti d) mjerenje napona
12. Kazaljka analognog instrumenta prije početka mjerenja (uključenja) mora biti na:
 a) max. odklonu skale b) sredini skale c) mehaničkoj nuli d) električnoj nuli
13. Razlučivost ljudskog oka ograničena je na:
 a) 0.07 mm b) 0.7 mm c) 7 mm d) 70 mm
14. Pokazivače analognih instrumenata možemo podijeliti na:
 a) laboratorijske b) grube c) fine d) pogonske
15. Ljestvice analognih instrumenata mogu biti:
 a) kvadratične b) linearne c) eksponencijalne d) logaritamске
16. Oznaka  prikazuje kretanje kazaljke analognog instrumenta u:
 a) u maksimalnom odklonu b) u smjeru pod kutom od 45 stupnjeva c) vertikalnom smjeru d) horizontalnom smjeru
17. Oznaka  prikazuje mjerni sustav instrumenta:
 a) s pomičnim magnetom b) s pomičnim željezom c) s pomičnim svitkom i trajnim magnetom d) s elektromagnetom
18. Oznaka  prikazuje mjerni sustav instrumenta:
 a) s pomičnim magnetom b) s pomičnim željezom c) s pomičnim svitkom i trajnim magnetom d) s elektromagnetom
19. Oznaka  prikazuje mjerni sustav instrumenta:
 a) s pomičnim magnetom b) s pomičnim željezom c) s pomičnim svitkom i trajnim magnetom d) s elektromagnetom
20. Oznaka  prikazuje mjerni sustav instrumenta:
 a) s pomičnim magnetom b) s pomičnim željezom c) s pomičnim svitkom i trajnim magnetom d) s elektromagnetom
21. Kut očitavanja rezultata analognih instrumenata jednak je:
 a) 0° b) 45° c) 90° d) 120°
22. Osnovni dijelovi digitalnih instrumenata su:
 a) prikaznik b) kazaljka c) A/D pretvornik d) D/A pretvornik
23. Osnovni dijelovi digitalnih instrumenata su:
 a) pretpojačalo b) oscilator c) ulazna preklopka d) dijelilo
24. Mjerena veličina u analognom obliku je mjerena veličina sa:
 a) diskretnim vrijednostima b) modulacijskom promjenom c) kontinuiranom promjenom d) ograničenim brojem vrijednosti

25. Mjerena veličina u digitalnom obliku je mjerena veličina sa:
- | | | | |
|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| a) diskretnim vrijednostima | b) modulacijskom promjenom | c) kontinuiranom promjenom | d) neograničenim brojem vrijednosti |
|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------------|
26. Prednosti digitalnih mjerila su:
- | | | | |
|--------------------|-------------------------------|----------------------------|-------------------|
| a) brzo očitavanje | b) posebno napajanje iz mreže | c) osjetljivost na smetnje | d) velika točnost |
|--------------------|-------------------------------|----------------------------|-------------------|
27. Nedostatci digitalnih mjerila su:
- | | | | |
|--------------------|-------------------------------|----------------------------|-------------------|
| a) brzo očitavanje | b) posebno napajanje iz mreže | c) osjetljivost na smetnje | d) velika točnost |
|--------------------|-------------------------------|----------------------------|-------------------|
28. Dodatno proširenje svakog mjernog opsega instrumenta izvršava se pomoću:
- | | | | |
|-------------------------|------------------------|------------------|----------------------|
| a) paralelnog otpornika | b) serijskog otpornika | c) predotpornika | d) vanjskog elementa |
|-------------------------|------------------------|------------------|----------------------|
29. Proširenje mjernog opsega ampermetra dobiva se spajanjem:
- | | | | |
|-------------------------|------------------------|----------------------|----------------------|
| a) paralelnog otpornika | b) serijskog otpornika | c) dodat. ampermetra | d) drugog ampermetra |
|-------------------------|------------------------|----------------------|----------------------|
30. Proširenje mjernog opsega voltmetra dobiva se spajanjem:
- | | | | |
|-------------------------|------------------------|-----------------------|---------------------|
| a) paralelnog otpornika | b) serijskog otpornika | c) dodatnog voltmetra | d) drugog voltmetra |
|-------------------------|------------------------|-----------------------|---------------------|
31. Instrument s pomičnim svitkom i permanentnim magnetom koristi se za mjerenje:
- | | | | |
|-----------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|
| a) istosmjerne struje | b) istosmjernog napona | c) izmjeničnog napona | d) izmjenične struje |
|-----------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|
32. Instrument s pomičnim magnetom koristi se za mjerenje:
- | | | | |
|-----------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|
| a) istosmjerne struje | b) istosmjernog napona | c) izmjeničnog napona | d) izmjenične struje |
|-----------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|
33. Elektrostatički instrument koristi se za mjerenje:
- | | | | |
|-----------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|
| a) istosmjerne struje | b) istosmjernog napona | c) izmjeničnog napona | d) izmjenične struje |
|-----------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|
34. Instrument s pomičnim svitkom i ispravljačem koristi se za mjerenje:
- | | | | |
|-----------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|
| a) istosmjerne struje | b) istosmjernog napona | c) izmjeničnog napona | d) izmjenične struje |
|-----------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|
35. Instrument s pomičnim željezom koristi se za mjerenje:
- | | | | |
|-----------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|
| a) istosmjerne struje | b) istosmjernog napona | c) izmjeničnog napona | d) izmjenične struje |
|-----------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|
36. Elektrodinamički instrument koristi se za mjerenje:
- | | | | |
|-----------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|
| a) istosmjerne struje | b) istosmjernog napona | c) izmjeničnog napona | d) izmjenične struje |
|-----------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|
37. Instrument s unakrsnim svitcima koristi se za mjerenje:
- | | | | |
|-----------|------------------------|-----------------------|----------------------|
| a) otpora | b) istosmjernog napona | c) izmjeničnog napona | d) izmjenične struje |
|-----------|------------------------|-----------------------|----------------------|
38. Indukcijski instrumenti koristi se za mjerenje:
- | | | | |
|-----------|------------------------|-----------------------|----------------------|
| a) otpora | b) istosmjernog napona | c) izmjeničnog napona | d) izmjenične struje |
|-----------|------------------------|-----------------------|----------------------|
39. Instrument s vrućom žicom koristi se za mjerenje:
- | | | | |
|-----------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|
| a) istosmjerne struje | b) istosmjernog napona | c) izmjeničnog napona | d) izmjenične struje |
|-----------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|
40. Elektrostatički instrumenti mogu preopteretiti svoj mjerni opseg najviše s:
- | | | | |
|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| a) 50 % vrijednosti | b) 75 % vrijednosti | c) 90 % vrijednosti | d) 110 % vrijednosti |
|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|

41. Instrument s termopretvornikom koristi se za mjerenje:
- | | | | |
|-----------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|
| a) istosmjerne struje | b) istosmjernog napona | c) izmjeničnog napona | d) izmjenične struje |
|-----------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|
42. Instrument s pomičnim svitkom i permanentnim magnetom ima:
- | | | | |
|--------------------------|---------------------------|------------------------------|-----------------------|
| a) kvadratičnu ljestvicu | b) logaritamsku ljestvicu | c) eksponencijalnu ljestvicu | d) linearnu ljestvicu |
|--------------------------|---------------------------|------------------------------|-----------------------|
43. Instrumenti s pomičnim magnetom su:
- | | | | |
|---------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|
| a) instrumenti klase točnosti 5 | b) neosjetljivi na vibracije | c) instrumenti kvadratične ljestvice | d) osjetljivi na vibracije |
|---------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|
44. Instrumenti s pomičnim svitkom i ispravljačem pri mjerenju kojeg oblika signala ne unose pogrešku:
- | | | | |
|----------------|-------------|-------------|----------------|
| a) pravokutnog | b) pilastog | c) sinusnog | d) trokutastog |
|----------------|-------------|-------------|----------------|
45. Instrumenti s pomičnim željezom izrađuju se sa:
- | | | | |
|---------------------|-------------------------|------------------------|----------------------|
| a) okruglim svitkom | b) permanentnim svitkom | c) pravokutnim svitkom | d) plosnatim svitkom |
|---------------------|-------------------------|------------------------|----------------------|
46. Elektrodinamički instrumenti načelo rada imaju zasnovano na djelovanju:
- | | | | |
|--|---|--|---|
| a) magnetske sile na zavojnicu u tom polju | b) sile između dva vodiča protjeran strujom | c) elektromagnetske sile na vodič bez protjecanja struje | d) magnetskog polja unutar vodiča protjeran strujom |
|--|---|--|---|
47. Zaokružite sve elektrodinamičke instrumente:
- | | | | |
|----------------|-----------------------|--------------|-------------|
| a) bez željeza | b) zatvoreni željezom | c) astatički | d) statički |
|----------------|-----------------------|--------------|-------------|
48. Pri instrumentu s unakrsnim svitcima momenti svitka ovise o:
- | | | | |
|-------------------|-------------------|--------------------|----------------|
| a) mjernom naponu | b) mjernoj struji | c) položaju svitka | d) frekvenciji |
|-------------------|-------------------|--------------------|----------------|
49. Današnje izvedbe induksijskih instrumenata su:
- | | | | |
|------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| a) induksijska brojila | b) s okretnim magnetskim poljem | c) s putujućim magnetskim poljem | d) s stalnim magnetskim poljem |
|------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
50. Zaokružite sve termičke instrumente:
- | | | | |
|-------------------------|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| a) bimetalni instrument | b) instrument s vrućom žicom | c) instrument s termopretvornikom | d) instrument sa solarnom ćelijom |
|-------------------------|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
51. Frekvencimetri mogu imati:
- | | | | |
|-------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
| a) linearnu rezonanciju | b) mehaničku rezonanciju | c) električnu rezonanciju | d) magnetsku rezonanciju |
|-------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
52. Katodni osciloskop je instrument koji ima:
- | | | | |
|--|-------------------------------------|--|-------------------|
| a) mogućnost mjerenja omjera frekvencija | b) dvodimenzionalni prikaz veličina | c) mogućnost mjerenja neelektričnih veličina | d) A/D pretvornik |
|--|-------------------------------------|--|-------------------|
53. Zaokružite sve dijelove katodne cijevi:
- | | | | |
|-----------------|----------------------|---------------------|-----------|
| a) pretpojačalo | b) otklonske pločice | c) ulazna preklopka | d) katoda |
|-----------------|----------------------|---------------------|-----------|
54. Zaokružite sve dijelove katodne cijevi:
- | | | | |
|-----------------------|--------------------|------------------|-------------|
| a) Wehneltov cilindar | b) ulazno dijelilo | c) anodni sustav | d) pojačalo |
|-----------------------|--------------------|------------------|-------------|
55. Zaokružite sve dijelove sustava za vertikalni otklon:
- | | | | |
|-----------------|----------------------|---------------------|-----------|
| a) pretpojačalo | b) otklonske pločice | c) ulazna preklopka | d) katoda |
|-----------------|----------------------|---------------------|-----------|
56. Zaokružite sve dijelove sustava za vertikalni otklon:
- | | | | |
|-----------------|------------------------|-------------|---------------|
| a) okidni sklop | b) linija za kašnjenje | c) pojačalo | d) Z pojačalo |
|-----------------|------------------------|-------------|---------------|

57. Zaokružite sve dijelove sustava za horizontalni otklon:
- a) okidni sklop b) linija za kašnjenje c) pojačalo d) Z pojačalo
58. Potencijal upravljačke elektrode upravlja se komandom:
- a) Focus b) Intensity c) Volt/Div d) Time/Div
59. Fino namještanje elektronskog snopa na zaslonu katodne cijevi ostvaruje se komandom:
- a) Time/Div b) Volt/Div c) Intensity d) Focus
60. Statička osjetljivost otklonskih pločica obično se izražava u:
- a) V/cm b) cm/V c) V/mm d) mm/V
61. Svaki podjeljak u rasteru zaslona katodnog osciloskopa ima duljinu po horizontalnoj osi:
- a) 0.5 mm b) 0.5 cm c) 1 mm d) 1 cm
62. Svaki podjeljak u rasteru zaslona katodnog osciloskopa ima duljinu po vertikalnoj osi:
- a) 0.5 mm b) 0.5 cm c) 1 mm d) 1 cm
63. Zaslona katodnog osciloskopa po horizontalnoj osi ima:
- a) 5 polja b) 10 polja c) 4 polja d) 8 polja
64. Zaslona katodnog osciloskopa po vertikalnoj osi ima:
- a) 5 polja b) 10 polja c) 4 polja d) 8 polja
65. Element vertikalnog otklonskog sustava koji služi za snižavanje odnosno povećanje razine napona na razinu koja odgovara razini radne točke pretpojačala zove se:
- a) ulazni preklopnik b) atenuator c) vertikalno pojačalo d) linija za kašnjenje
66. Faktor vertikalnog otklona nosi oznake:
- a) Volts/cm b) cm/V c) Time/Div d) Volts/DIV
67. Najveća frekvencija za koju je razina signala manja za 3 dB od stvarne amplitude signala je najvažniji parametar osciloskopa i još ga nazivamo kao:
- a) pojačanje signala b) propusni opseg c) bandwidth d) otklonska frekv.
68. Elektronička preklopka vertikalnog otklonskog sustava omogućuje:
- a) zbrajanje signala b) oduzimanje signala c) sinkroni rad d) asinkroni rad
69. Glavni zadatak horizontalnog otklonskog sustava je:
- a) usmjeravanje elektronskog snopa b) generiranje pilastog napona c) odabir ulaznog signala d) pojačanje signala
70. Okidanje signala okidnog sklopa preko gradske mreže izvodi se preko tipke:
- a) EXT b) SLOPE c) AUTO d) LINE
71. U slučaju izostanka okidnog impulsa nećemo imati generiranje pilastog napona ako imamo:
- a) AUTO mod rada b) NORM mod rada c) LEVEL mod rada d) SINGLE mod rada
72. U slučaju izostanka okidnog impulsa imat ćemo generiranje pilastog napona ako imamo:
- a) AUTO mod rada b) NORM mod rada c) LEVEL mod rada d) SINGLE mod rada
73. Mjerne sonde mogu biti:
- a) naponske b) strujne c) kapacitivne d) otporne
74. Mjerne sonde mogu biti:
- a) induktivne b) modulacijske c) aktivne d) pasivne
75. Zaokružite sve moguće utjecaje koji omogućuju zapis elektroničkih mjernih instrumenata:
- a) mehanički b) kemijski c) toplinski d) svjetlosni

76. Zaokružite sve primjene oscilografskih instrumenata:

- a) EKG b) EEG c) poligraf d) seizmograf

77. Zaokružite koju vrstu karakteristike na zaslonu katodne cijevi prikazuje vobler:

- a) U/I b) a/f c) f/a d) I/U

78. Analizatori spektra mogu imati na zaslonu:

- a) diskretni spektar b) eksponencijalni c) kvaziharmonijski d) kontinuirani
spektar spektar spektar spektar

79. Integrirajući konverter digitalnih voltmetara je:

- a) mjerni napon b) procesor c) D/A pretvornik d) A/D pretvornik

80. Zaokružite sve prednosti digitalnih voltmetara:

- a) velika ulazna b) širok kut gledanja c) nisu moguće d) složenija upotreba
impedancija rezultata mjerenja subjektivne pogreške

81. Digitalni multimetri mogu mjeriti:

- a) izmjeničnu struju b) istosmjerni napon c) električni otpor d) kapacitet

82. Jednofazni digitalni vatmetri mogu:

- a) mjeriti napon b) raditi sa više c) imati više ulaznih d) mjeriti
frekvencija kanala struju

83. Trofazni digitalni vatmetri mogu mjeriti:

- a) napon b) frekvenciju c) snagu d) struju

84. Digitalni osciloskopi prema izvedbi mogu biti:

- a) fosforni b) s uzimanjem c) s višemodularnim d) s memorijom
uzoraka radom

85. Zaokružite sve korake pretvorbe analognog signala u digitalni:

- a) kvantiziranje b) kodiranje c) uzorkovanje d) memoriranje

86. Digitalni osciloskop s uzimanjem uzoraka koristi se na frekvencijama većim od:

- a) 10 MHz b) 50 MHz c) 20 GHz d) 50 GHz

87. Izračunajte zakretni moment instrumenta s pomičnim svitkom i trajnim magnetom ako je magnetska indukcija 1 T? Svitak koji je mehanički povezan sa osovinom ima 150 zavoja, duljine 2 cm i visine 0.5 cm. Kroz svitak prolazi struja iznosa 0.25 A.

88. Povećanjem napona na elektrostatičkom instrumentu uzrokuje povećanje kapaciteta kondenzatora za 2 pF. Koliko iznosila sila koja djeluje na pomičnu ploču elektrostatičkog instrumenta ako se pomaknula za 2 mm? Povećani napon sada iznosi 100 V.

89. Kolika će biti pogreška pokazivanja instrumenta s pomičnim svitkom i ispravljačem zbog izobličenja mjerenog napona, ako je faktor oblika tog napona 1,15?

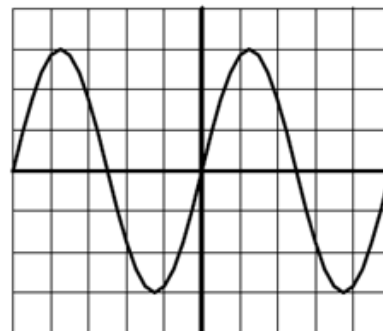
90. Kolika će biti pogreška pokazivanja instrumenta s pomičnim željezom zbog izobličenja mjerenog napona, ako je faktor oblika tog napona 1,15?

91. Voltmetrom s pomičnim željezom mjerimo napon $u(t) = 100 + 80\sin(628t)$ V. Koliki će napon pokazati voltmetar?

92. Na zaslonu katodne cijevi osciloskopa dobivene su preko čitave širine (20 cm) 4 periode sinusoide. Kolika je frekvencija promatrane pojave ako je preklopka vremenske baze u položaju 0.1 ms/cm?

93. Na zaslonu katodne cijevi osciloskopa dobivene su preko čitave širine (12 cm) 8 periode sinusoide. U koji položaj je postavljena vremenska baza osciloskopa ako je očitana frekvencija 20 Hz?

94. Na zaslonu osciloskopa dobiva se prikazana slika. Kolika je efektivna vrijednost i frekvencija priključenog napona, ako je preklopka za faktor otklona u položaju 0.2 V/cm, a preklopka vremenske baze u položaju 5 ms/cm?



95. Na zaslonu osciloskopa dobiva se prikazana slika, ako su preklopke osciloskopa postavljene na vrijednosti 1 V/cm i 2 ms/cm. Kolika je efektivna vrijednost i period priključenog napona?

96. Na zaslonu osciloskopa dobiva se prikazana slika, ako je efektivna vrijednost signala 5 V i frekvencija 50 Hz. Koje vrijednosti imaju preklopke vremenske baze i faktora otklona?

97. Y-kanal katodnog osciloskopa ima ulazni otpor od 1 M Ω i unutarnji električni kapacitet od 50 pF. Mjerni signal dovodi se na ulaz y-kanala pomoću mjerne sonde unutarnjeg otpora 2 M Ω i koaksijalnog kabela duljine 60 cm i električnog kapaciteta 100 pF/m. Koliko iznosi kapacitet mjerne sonde?

98. Y-kanal katodnog osciloskopa ima ulazni otpor od 2 M Ω . Mjerni signal dovodi se na ulaz y-kanala pomoću mjerne sonde unutarnjeg otpora 2 M Ω i kapaciteta 150 pF. Koaksijalni kabel ima električni kapacitet 100 pF. Koliko iznosi unutarnji električni kapacitet osciloskopa?

99. Y-kanal katodnog osciloskopa ima unutarnji električni kapacitet od 50 pF. Mjerni signal dovodi se na ulaz y-kanala pomoću mjerne sonde unutarnjeg otpora 5 M Ω i kapaciteta 80 nF, te koaksijalnog kabela duljine 850 mm i električnog kapaciteta 120 pF/m. Koliko iznosi unutarnji otpor osciloskopa?

100. Y-kanal katodnog osciloskopa ima ulazni otpor od 980 k Ω i unutarnji električni kapacitet od 770 nF. Mjerni signal dovodi se na ulaz y-kanala pomoću mjerne sonde kapaciteta 50 pF i električnog kapaciteta koaksijalnog kabela 50 pF. Koliko iznosi električni otpor mjerne sonde?

101. Osciloskopom koji ima gornju graničnu frekvenciju 18 MHz, izmjerili smo vrijeme porasta nekog signala $t_{RO} = 32$ ns. Koliko je stvarno vrijeme porasta tog signala?

102. Osciloskopom koji ima gornju graničnu frekvenciju 1 GHz, izmjerili smo stvarno vrijeme porasta nekog signala $t_{RS} = 200$ μ s. Koliko je ukupno vrijeme trajanja tog signala t_{RO} ?

103. Izmjerili smo stvarno vrijeme porasta nekog signala $t_{RS} = 2$ ps i ukupno vrijeme trajanja tog signala $t_{RO} = 2.5$ ps. Koliko iznosi gornja granična frekvencija osciloskopa?

104. Ako se elektron nađe u električnom polju između dvije ploče razmaka 10 mm na koje je priključen istosmjerni napon iznosa 8 V, na njega će pod utjecaj električnog polja djelovati kolika sila? Izračunajte ubrzanje elektrona u smjeru pozitivne pločice ($e = 1.602 \cdot 10^{-19}$ C, $m_e = 9.109 \cdot 10^{-31}$ kg).

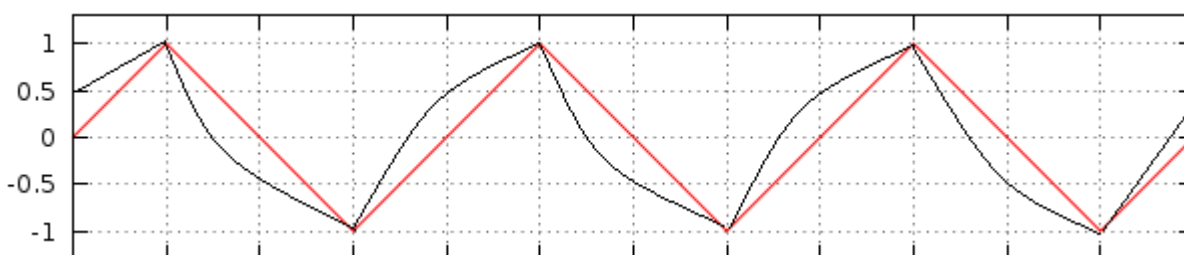
105. Ako se elektron nađe u električnom polju iznosa 1000 V/m između dvije ploče razmaka 0.8 dm, koliki je napon priključen na ploče? Izračunajte ubrzanje elektrona u smjeru pozitivne pločice ($e = 1.602 \cdot 10^{-19}$ C, $m_e = 9.109 \cdot 10^{-31}$ kg).

106. Izračunajte statičku osjetljivost otklonskih pločica osciloskopa (s) i statički otklonski faktor katodne cijevi (S) ako je napon između katode i anode jednak $U_a = 500$ V, duljina otklonskih pločica $l = 0.5$ dm, udaljenost između otklonskih pločica $d = 0.5$ cm i udaljenost od centra otklonskih pločica do zaslona $L = 120$ mm? Koliki iznosi otklon elektronskog snopa na zaslonu katodne cijevi (Y) ako je priključen napon na otklonskim pločicama $U = 1$ V?

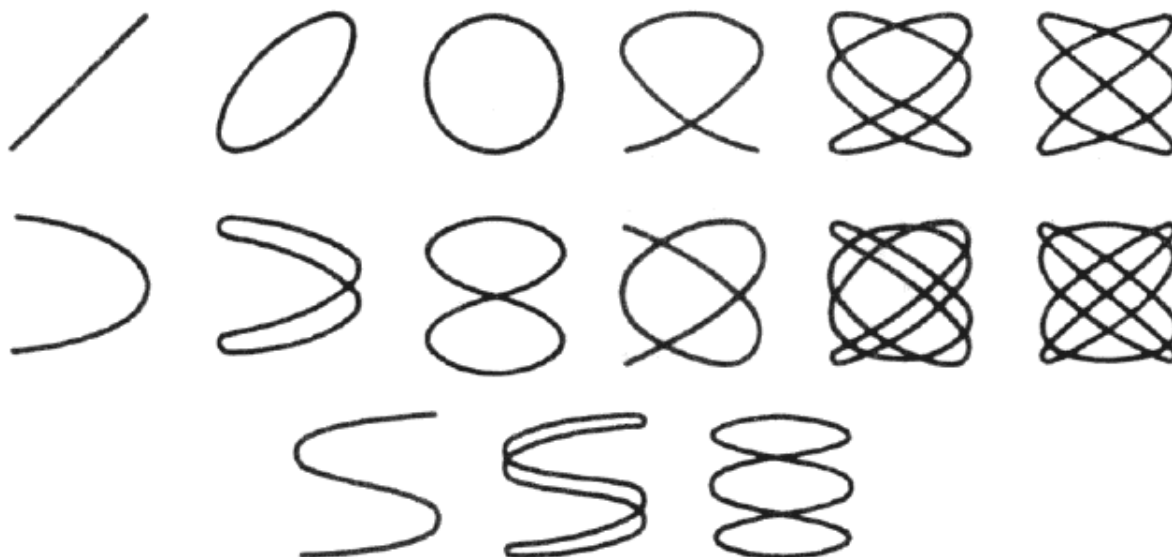
107. Izračunajte statičku osjetljivost otklonskih pločica osciloskopa (s) ako je statički otklonski faktor katodne cijevi 150 V/cm. Napon između katode i anode jednak $U_a = 700$ V, duljina otklonskih pločica $l = 40$ cm i udaljenost između otklonskih pločica $d = 20$ mm. Koliki iznosi udaljenost od centra otklonskih pločica do zaslona ako je priključen napon na otklonskim pločicama $U = 0.8$ V?

108. Kolika je statička osjetljivost otklonskih pločica osciloskopa (s) ako je statički otklonski faktor katodne cijevi 10 V/mm. Napon između katode i anode jednak $U_a = 250$ V, duljina otklonskih

- pločica $l = 0.03 \text{ m}$ i udaljenost od centra otklonskih pločica do zaslona $L = 10 \text{ cm}$. Izračunajte udaljenost između otklonskih pločica ako je priključen napon na otklonskim pločicama $U = 0.5 \text{ V}$?
109. Kolika je statička osjetljivost otklonskih pločica osciloskopa (s) i statički otklonski faktor katodne cijevi (S) ako je napon između katode i anode jednak $U_a = 500 \text{ V}$, duljina otklonskih pločica $l = 0.5 \text{ dm}$, udaljenost između otklonskih pločica $d = 0.5 \text{ cm}$ i udaljenost od centra otklonskih pločica do zaslona $L = 120 \text{ mm}$? Izračunajte otklon elektronskog snopa na zaslonu katodne cijevi (Y) ako je priključen napon na otklonskim pločicama $U = 0.8 \text{ V}$?
110. Koliko iznosi kapacitet otklonskih pločica katodnog osciloskopa ako im je ploština 4 cm^2 i razmaka 2 mm ? ($\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$)
111. Koliko iznosi razmak otklonskih pločica katodnog osciloskopa ako im je ploština 2.2 cm^2 i kapacitet 1.5 pF ? ($\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$)
112. Koliko iznosi ploština otklonskih pločica katodnog osciloskopa ako im je kapacitet 120 nF i razmaka 0.5 cm ? ($\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$)
113. Kolika je vrijednost faktora otklona Y-ulaza (k_y) ako je ukupno pojačanje vertikalnog stupnja $A_y = 1550$, koeficijent omjera dijeljenja $k = 3.3 \cdot 10^{-3}$, statička osjetljivost katodne cijevi $s = 2 \text{ mm/V}$. Izračunajte otklon u smjeru vertikalne osi na zaslonu ako je priključen istosmjernog napona od 2 V ?
114. Kolika je vrijednost faktora otklona Y-ulaza (k_y) ako je ukupno pojačanje vertikalnog stupnja $A_y = 1000$, koeficijent omjera dijeljenja $k = 18 \cdot 10^{-4}$, statička osjetljivost katodne cijevi $s = 1.3 \text{ mm/V}$. Izračunajte priključeni istosmjerni napon ako je otklon u smjeru vertikalne osi jednak 1.5 cm ?
115. Izračunajte ukupno pojačanje vertikalnog stupnja ako je faktor otklona Y-ulaza jednak 0.5 V/cm , koeficijent omjera dijeljenja $k = 2.5 \cdot 10^{-3}$, statička osjetljivost katodne cijevi 21 mm/V . Koliki je otklon u smjeru vertikalne osi na zaslonu ako je priključen DC napona od 1.8 V ?
116. Pravokutni impuls na vertikalnom pojačalu osciloskopa amplitude 10 V i širine $t_{RP} = 15 \text{ ms}$ priključen je na RC mrežu koja se sastoji od otpornika otpora $15 \text{ k}\Omega$ i kondenzatora kapaciteta 100 nF . Kolika je jakost struje u trenutku $t = t_{RP}$, te koliko iznosi gornja granična frekvencija vertikalnog pojačala?
117. Pravokutni impuls na vertikalnom pojačalu osciloskopa amplitude 12 V i gornje granične frekvencije 20 Hz priključen je na RC mrežu koja se sastoji od otpornika otpora $0.007 \text{ M}\Omega$ i kondenzatora kapaciteta $15 \text{ }\mu\text{F}$. Kolika je jakost struje u trenutku $t = t_{RP}$, te koliko iznosi širina t_{RP} signala?
118. Ulazne priključnice su spojene na AC preklopnik gdje je vrijednost slijednog kondenzatora 150 nF . Ulazni otpor vertikalnog ulaza katodnog osciloskopa iznosi $0.85 \text{ M}\Omega$. Koliko iznosi donja granična frekvencija pojačala?
119. Ulazne priključnice su spojene na AC preklopnik, koliko iznosi donja granična frekvencija pojačala ako je vremenska konstanta $\tau = 0.5 \text{ s}$?
120. Ulazne priključnice su spojene na AC preklopnik gdje je vrijednost slijednog kondenzatora 80 nF . Koliko iznosi ulazni otpor vertikalnog ulaza katodnog osciloskopa ako je donja granična frekvencija pojačala 2.5 Hz ?
121. Koliko iznosi linearna pogriješka trokutastog napona koje daje generator vremenske baze?



122. Koliko iznosi efektivna, srednja i maksimalna vrijednost idealnog trokutastog napona sa slike (gore)?
123. Izračunajte iznose frekvencija izvora napona priključenih na pločice osciloskopa za vertikalni otklon (y-os) ako je na pločice za horizontalni otklon (x-os) priključen izvor napona konstantne frekvencije $f_x = 10$ kHz, a na zaslonu katodne cijevi pojavile su se Lissajousove krivulje prema slikama (dolje)?



124. Otporniku nazivne vrijednosti $R_n = 150 \, \Omega \pm 10\%$ digitalnim je omometrom pet puta uzastopce izmjeren otpor. Dobiveni rezultati mjerenja su: $150.1 \, \Omega$, $150.2 \, \Omega$, $150.17 \, \Omega$, $149.97 \, \Omega$, $150.11 \, \Omega$. Kolika je aritmetička sredina, odnosno konačna vrijednost mjerenja?
125. Koliko iznosi mjerno područje digitalnog mjernog instrumenta mjernog opsega 5, 50, 500 ako je razlučivost $3 \frac{1}{2}$?
126. Digitalni voltmetar s $5 \frac{1}{2}$ znamenke, na mjernom opsegu 900 mV, prikazuje vrijednosti u kojim granicama?
127. Umjeravanjem voltmetra s deset puta točnijim digitalnim multimetrom utvrđuje se da voltmetar na području 200 V pri naponu od 175 V pokazuje napon od 177 V. Kolika je apsolutna, relativna i postotna pogreška?
128. Kolika mora biti minimalna frekv. uzorkovanja analogni signal maksimalne frekvencije 3 kHz?
129. Kolika mora biti maksimalne frekv. signala ako je minimalna frekvencija uzorkovanja 4 kHz?
130. Vrijeme uzimanja uzoraka trenutne vrijednosti analognog signala iznosi $250 \, \mu s$. Izračunajte iznos maksimalne frekvencije ulaznog signala?
131. Koliko iznosi vrijeme uzimanja uzoraka trenutne vrijednosti analognog signala ako je maksimalna frekvencija ulaznog signala 2.5 kHz?
132. A/D pretvornik naponskog područja 100 V i s 8 bitova kvantizira ulazni signal. Izračunajte točnu vrijednost jednog kvanta A/D pretvornika te kolika je pogreška kvantizacije?
133. Vertikalna rezolucija A/D pretvarača iznosi $n = 5$, ako je binarni zapis digitalne vrijednosti jednak $N = [10010]$ koji bit je najmanje značajan a koji najviše?
134. Kako izgleda 8-bitni binarni kod broja -94?
135. Kako izgleda 5-bitni binarni kod broja +17?
136. Električno brojilo ima u tablici označeno 1200 okr/kWh. Kolika je snaga priključenog trošila ako se aluminijska ploča okrene 60 puta za 3.2 minute?
137. Koliko dugo treba svijetliti žarulja od 80 W da bi potrošila 1 kWh električne energije?
138. Brojilo s oznakom 3000 okr/kWh opteretili smo induktivnim teretom. Rotor brojila okrenuo se 120 puta u 15 minuta. Koliki je faktor snage tereta ako je napon tereta 100 V, a struja 6 A?

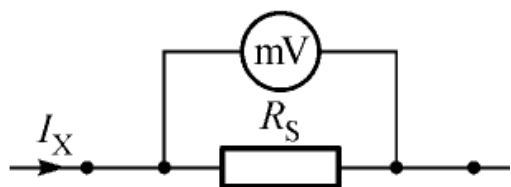
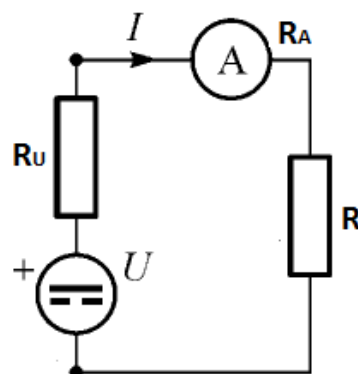
3. MJERNE METODE

3.1 METODE ZA MJERENJE NAPONA I STRUJA

Mjerenje napona i struja provodi se raznim električnim mjernim instrumentima, mjernim uređajima i sustavima, a koji se međusobno mogu razlikovati po mjernom opsegu, frekvencijskom području, točnosti, opterećenju i td.

3.1.1 MJERENJE ISTOSMJERNE STRUJE

Svaki instrument s neposrednim pokazivanjem (osim elektrostatikih elektrometara i voltmetara) mjeri istosmjernu struju. Mjerenje struje može se postići izravno analognim i digitalnim ampermetrom. Unutarnji otpor ampermetra (R_A) utječe na struju u strujnom krugu, stoga mora biti što manjeg iznosa. Analogni ampermetri koriste se za mjerenja struje od 1 μA do 10 mA, razreda točnosti 0.5. Digitalni ampermetri (multimetri) koriste se za mjerenje struje od 1 μA do nekoliko A, gdje nesigurnost ovisi o razredu točnosti (0.2 %).

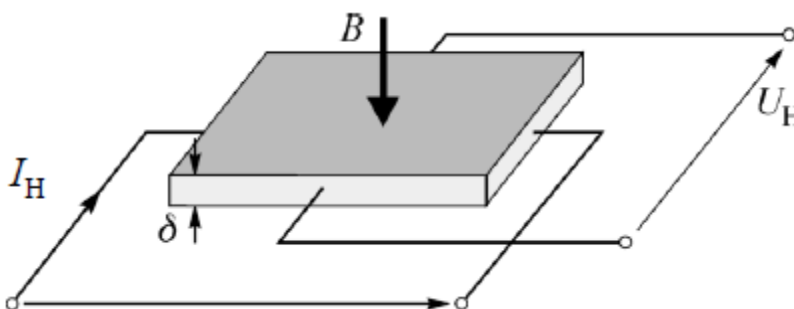


Osim izravne metode mjerenja ampermetrima, istosmjerna struja može se mjeriti neizravno sa vanjskim shuntom (pretvorbom napona). Korištenjem odvojenog (vanjskog) shunta može se mjeriti struja do 30 A. Nesigurnost mjerenja uglavnom ovisi o razredu točnosti instrumenta i karakteristikama shunta (0.0005 % kod odličnih digitalnih mjernih instrumenata i etalonskih laboratorijskih shuntova). Također se mora uzeti u obzir unutarnji otpor voltmetra (R_V) koji bi trebao biti što veći, kako ne bi previše utjecao na prolazak struje u krugu. Stvarna struja koja prolazi spojem izračunava se prema izrazu:

$$I_X = \frac{U_S}{R_S \parallel R_V}$$

Mjerenje većih struja od 30 A pomoću shunta izaziva veliku disipaciju (gubitke) snage na samom otporniku. Stoga se koriste mjerila s Hallovom sondom, čije je glavno svojstvo pretvorba struje u napon. Hallova sonda je tanka pločica uzdužno protjecana upravljačkom strujom I_H , na koju okomito padaju silnice magnetskog polja. Na poprečnim krajevima javlja se Hallov napon U_H , koji je proizveden silama magnetskog polja na naboj u gibanju prema izrazu:

$$U_H = \frac{R_H I_H B}{\delta}$$



Slika 3.1.1 – 1 Hallova sonda

Hallova konstanta R_H (otpor) ovisi o materijalu sam pločice koja može biti izrađena od silicij-indij-antimon, indij-arsen spojeva. Primjena Hallove sonde može se vidjeti kod strujnih kliješta, mjernog opsega od 1 A do 1000 A, s pogreškom mjerenja reda 1%. Također se može koristiti pri mjerenju izmjeničnih struja.

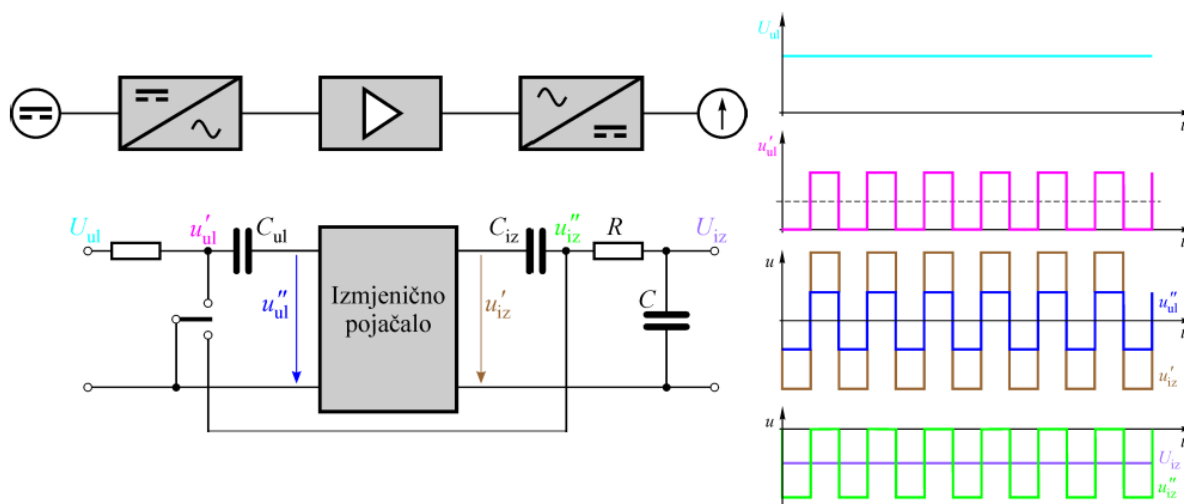


Slika 3.1.1 – 2 Primjeri strujnih kliješta

3.1.2 MJERENJE ISTOSMJERNOG NAPONA

Mjerenje istosmjernog napona može se postići **izravno** analognim i digitalnim voltmetrom. Unutarnji otpor voltmetra (R_v) utječe na struju u strujnom krugu, stoga mora biti što većeg iznosa. Analogni voltmetri koriste se za mjerenja napona od 0.1 mV do 1000 V, mjerne nesigurnosti 0.05 %. Digitalni voltmetri (multimetri) imaju isti mjerni opseg, dok je nesigurnost mjerenja 0.0001 %. Nije moguće mjeriti elektromotornu silu (EMS) neopterećenog izvora osim kod posebnih digitalnih voltmetara koji imaju unutarnji otpor reda 10 G Ω .

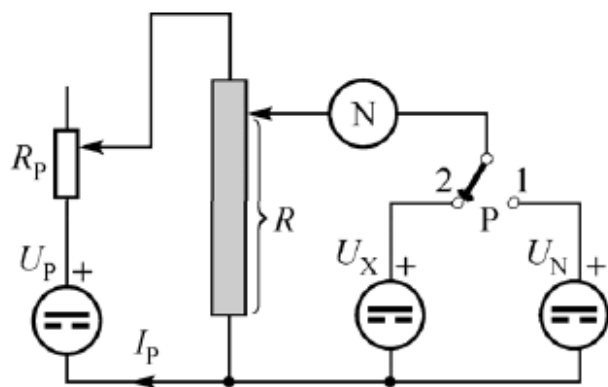
Mjerenje istosmjernog napona manjeg od 0.1 mV (do 1 V) koriste se **pojačala s transpozicijom frekvencije** (chopper od 1 nV), gdje se istosmjerni napon pretvara u izmjenični.



Slika 3.1.2 – 1 Izvedba pojačala s transpozicijom frekvencije i valni oblici napona

Ulazni napon pretvara se u pravokutni, jednake tjemene vrijednosti. Ulazni kondenzator C_{ul} sprječava prolaz istosmjernih (DC) komponenti. Pojačani i ispravljeni napon se filtrira niskim propusnim RC filtrom, nakon kojeg se dovodi na izlaz. Pretvorba DC-AC napona obavlja se najčešće sa tranzistorima s efektom polja (JFET) ili titrajućim kondenzatorima.

Mjerenje istosmjernog napona moguće je postići određenim **kompensacijskim metodama** odnosno postupcima od 1 μV do 1000 V. Jedan od njih je **potenciometarski (Poggendorffov) postupak** gdje imamo precizno ugađanje otpora.



Slika 3.1.2 – 2 Primjer potenciometarskog postupka

Kada je preklopka u poziciji 1 imao uključen etalon U_N i ugađanje otpora R_1 na preciznoj dekadi R . Dok je preklopka u poziciji 2 imamo uključen napon U_X i ugađanje otpora R_2 . Napon U_X dobiva se prema izrazu:

$$U_X = U_N \frac{R_2}{R_1}$$

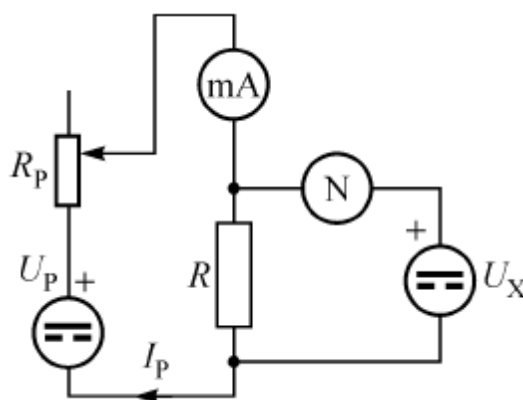
Također se koristi **ampermetarski (Lindeck – Rotheov) postupak** mjerenja istosmjernog napona.

Slika 3.1.2 – 3 Primjer ampermetarskog postupka

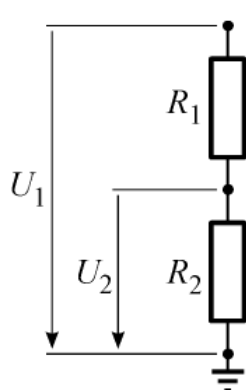
Ovdje imamo kompenzacijski fiksni nepromjenjivi otpor R gdje se pomoćna struja I_P ugađa i mjeri instrumentom. Uvjet kompenzacije postiže se izrazom:

$$U_X = I_P \cdot R$$

Granice točnosti odnosno pogrešaka vrijednosti napona U_X ovise o vodljivosti otpornika i razredu točnosti ampermetra.



Mjerenje visokih istosmjernih napona može se postići na nekoliko načina. Jedan od njih je **elektrostatski voltmetar** koji ima mjerni opseg napona od 10 V do 500 kV. Također mjeri istosmjerne i izmjenične napone točnosti mjerenja od 0.2 do 1 %. Drugi način je **otporničkim VN djelilom** koji se izrađuje od otporne žice malog temperaturnog koeficijenta ili visokoomskih slojnih otpornika.



Disipacija snage opada s povećanjem ukupnog otpora dijelila ($R_1 + R_2$). Ukoliko se napon U_2 na otporniku R_2 mjeri instrumentom vrlo velikog unutarnjeg otpora, tada je mjereni visoki napon jednak prema izrazu:

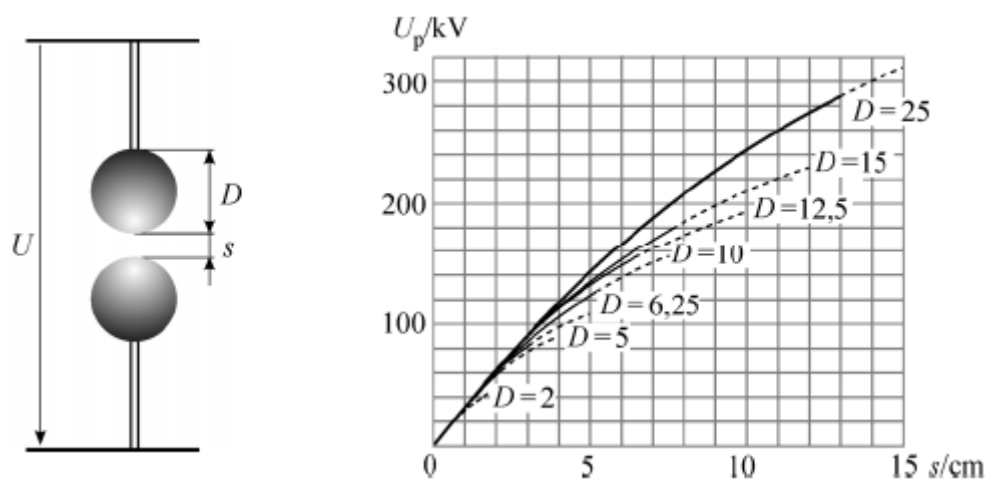
$$U_1 = U_2 \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

Zbog male struje dijelila, jedan od uzroka pogrešaka mogu biti struje kroz izolaciju. Također R_2 može predstavljati i otpor voltmetra, ukoliko je dovoljno velik i točno poznat. Mjerni opseg napona otporničkim VN djelilom je od 100 V do 100 kV.

Kuglastim iskrištem (umjeravanje mjerila) također se mogu mjeriti visoki istosmjerni naponi, gdje do proboja dolazi zbog ionizacije zraka pri određenom naponu U_p . Probojni napon U_p ovisi o razmaku kugli s , promjeru kugli D i relativnoj gustoći zraka ρ (barometarskom tlaku b u milibarima i temperaturi zraka T u $^{\circ}\text{C}$) prema izrazu:

$$\rho = \frac{0.289 b}{273.15 + T} \quad [\text{kg/m}^3]$$

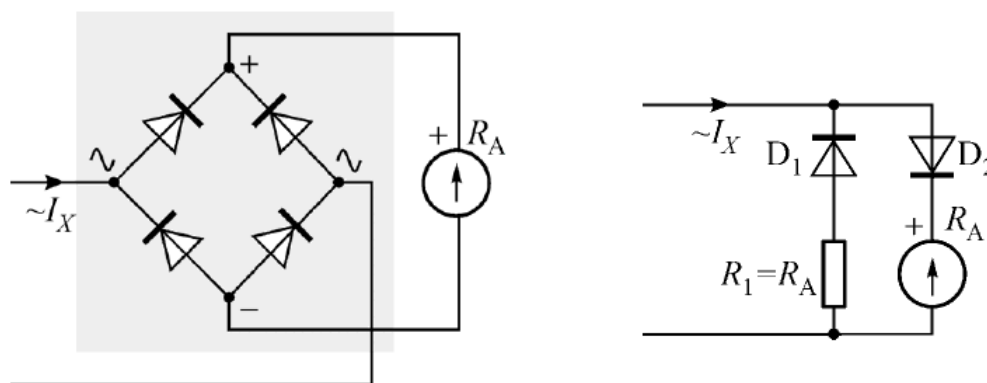
Kuglastim iskrištem se postiže mjerni opseg mjerenja napona od 1 kV do 1000 kV.



Slika 3.1.2 – 2 Prikaz kuglastog iskrišta i dijagram probojnog napona

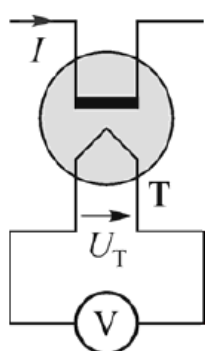
3.1.3 MJERENJE IZMJENIČNE STRUJE

Svaki instrument s neposrednim pokazivanjem (osim instrumenta s pomičnim željezom i elektrodinamički ampermetar) pretvaraju izmjeničnu struju u istosmjernu. Mjerenje izmjenične struje može se postići **izravno** analognim i digitalnim ampermetrom. Digitalnim ampermetrom (multimetrom) mjeri se struja od 100 μA do nekoliko A. Nesigurnost ovisi o razredu točnosti instrumenta u iznosu od 0.1 do 0.5 %. Osim digitalnim multimetrom za mjerenje struje najčešće se koristi **analogni instrument s pomičnim svitkom i ispravljačem**. Ispravljanje izmjeničnog oblika signala u istosmjerni postiže se primjenom punovalnog ispravljača ili poluvalnog ispravljača s dvije diode.



Koristi se za mjerenje izmjeničnih struja od 10 mA do 30 A (univerzalni instrumenti s ugrađenim ispravljačem i unutarnjim shuntovima), razreda točnosti od 1.5 do 2.5. U slučaju nesinusne struje nastupa pogreška zbog faktora oblika ξ prema izrazu:

$$p\% = \frac{\xi_0 - \xi}{\xi} \cdot 100\%$$

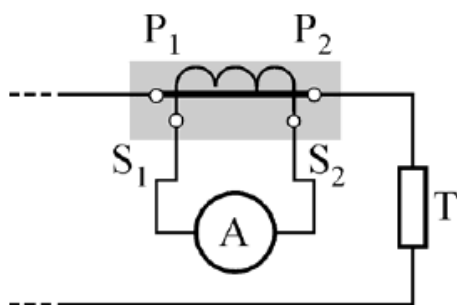


Mjerenje struje moguće je provesti **instrumentom s termopretvornikom**. Termopretvornik omogućuje dobivanje istosmjernih napona koji su ovisni o efektivnoj vrijednosti mjerene izmjenične struje. Termoelement grije se ogrjevnom žicom i dolazi do termoelektričnog efekta. Termoelektrični efekt (Seebeckov efekt) je zagrijavanje spojišta dvaju različitih kovina ili legura, gdje se na njihovim slobodnim krajevima javlja termoelektrični napon ovisan o razlici temperature vrućeg spojišta i hladnih krajeva. Termoelektrični napon približno je razmjeran snazi utrošenoj za grijanje spojnog mjesta prema izrazu:

$$U = k_1 (T_1 - T_0) = k_2 \cdot I^2 \cdot R$$

Termoparovi izrađuju se materijalima kao što su: bakar – konstantan, željezo – konstantan, nikalkrom – nikal, platinarodij – platina. Naponi koji se dobivaju su reda veličine 10 mV i mjere se osjetljivim instrumentom s pomičnim svitkom ili digitalnim instrumentom. Instrumentom s termopretvornikom mogu se mjeriti struje od 100 mA do 10 A, do frekvencije 100 kHz. Mjerenja su točna i kod odstupanja sinusnog valnog oblika jer ne ovise o faktoru oblika. Nedostatak im je mala preopteretivost (temperatura žice pri nazivnoj struji je 200 °C, a pri dvostrukoj nazivnoj struji 800 °C).

Mjerenje strujnim mjernim transformatorom također se može mjeriti izmjenična struja. Strujni mjerni transformator transformira struje na mjerljive iznose i izolira mjerne instrumente. Nazivne sekundarne struje transformatora su 1 i 5 A.



Sastavni dijelovi strujnog mjernog transformatora su: magnetska jezgra, primarni i sekundarni namot. Ukoliko nema gubitaka (idealno) vrijedi jednakost prema izrazu:

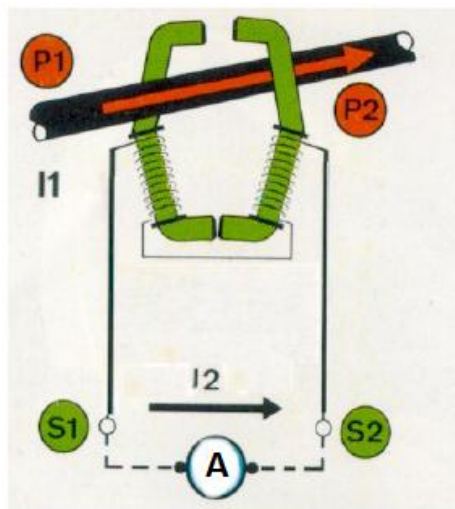
$$I_1 N_1 = I_2 N_2$$

Pogrješka strujnog mjernog transformatora u odnosu prema idealnom slučaju (izraz gore) bit će negativna. Standardizirane snage transformatora su: 2.5 VA, 5 VA, 10 VA, 15 VA, 30 VA.

Za transformatore razreda točnosti 0.1 – 1 pogrješke ne smiju biti premašene uz teret snage između 25 % i 100 % nazivne snage tereta, kojih je faktor snage 0.8. Nazivna impedancija izračunava se prema izrazu:

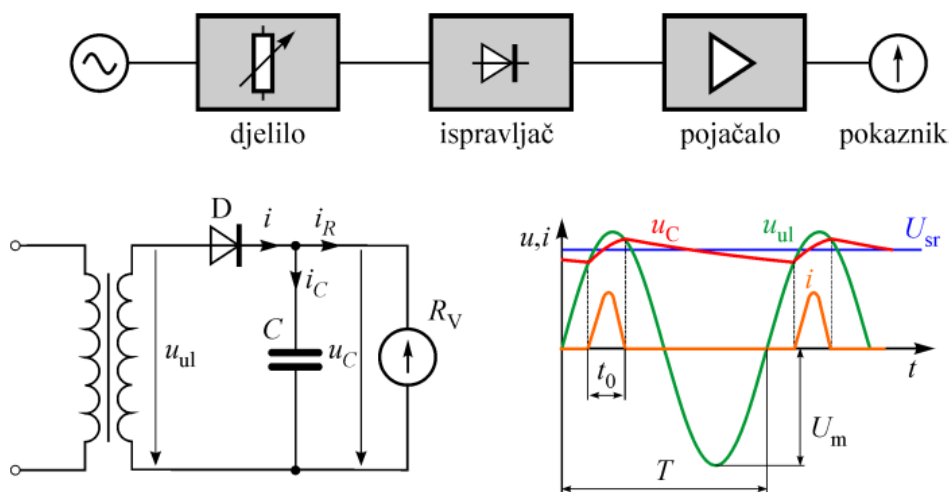
$$Z_n = \frac{P_n}{I_{2n}^2}$$

Slika 3.1.3 -1 Izvedba strujnog mjernog transformatora za pogonska mjerenja – Dietzova kliješta

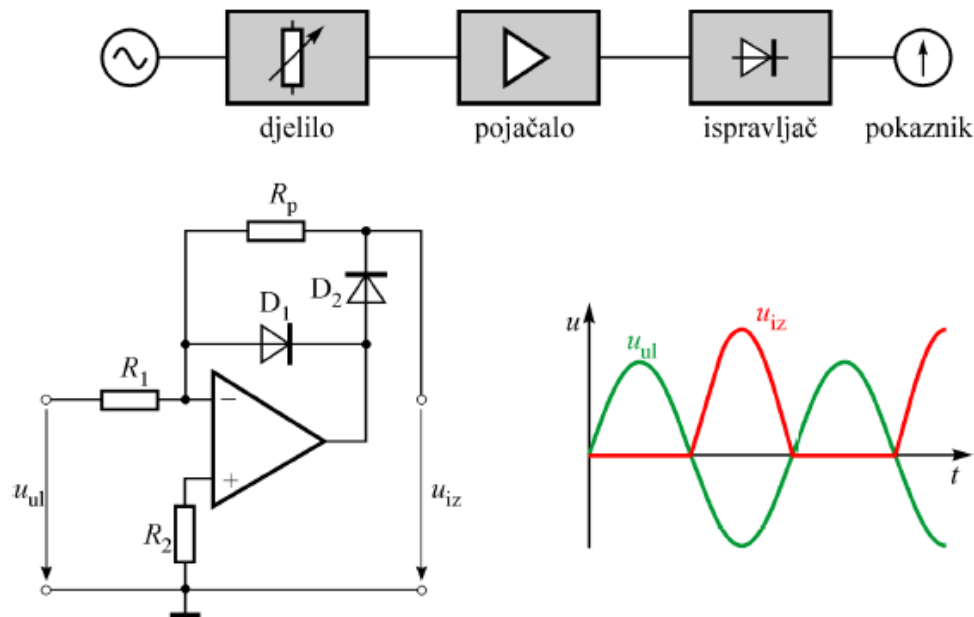


3.1.4 MJERENJE IZMJENIČNOG NAPONA

Mjerenje izmjeničnog napona može se postići **izravno** analognim i digitalnim voltmetrom. **Mjerenje izmjeničnog napona istosmjernim voltmetrom i ispravljačem** moguće je postići pomoću dva osnovna tipa: ispravljač – pojačalo (diodni voltmetri – najmanji MO 3V) i pojačalo – ispravljač.



Slika 3.1.4 – 1 Prikaz ispravljač – pojačalo tip digitalnog voltmetra i valni oblici napona

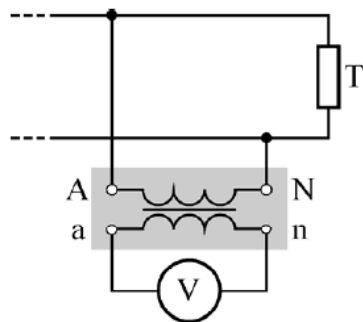


Slika 3.1.4 – 2 Prikaz pojačalo – ispravljač tipa voltmetra i valni oblici napona

Mjerenje istosmjernim voltmetrom i ispravljačem tipa pojačalo – ispravljač ima mogućnost mjerenja malih izmjeničnih napona reda veličine mV. Pomoću dioda izbjegnuta je nelinearnost ljestvice, ali kod napona nesinusnog valnog oblika nastupa pogreška zbog valnog oblika. Također postoji tip pojačalo – ispravljač za punovalno ispravljanje izlaznog napona.

Mjerenje izmjeničnog napona **analognim voltmetrom s pomičnim željezom** bez ispravljača izvodi se sa prvom efektivnom vrijednošću napona. Razred točnosti ovakvog instrumenta nalazi se u granicama od 0.2 do 2.5, a frekvencijski opseg do nekoliko stotina Hz. **Elektrostatskim voltmetrom** bez ispravljača također se može mjeriti prava efektivna vrijednost izmjeničnog napona. Namijenjen je za mjerenja visokih napona gdje nema velikih gubitaka.

Mjerenje **naponskim mjernim transformatorom** transformira se primarni napon do 750 kV na napone mjerljivih iznosa i izolira mjerne instrumente. Sekundarno opterećenje čine unutarnji otpori voltmetra te otpori naponskih grana voltmetara i brojila.



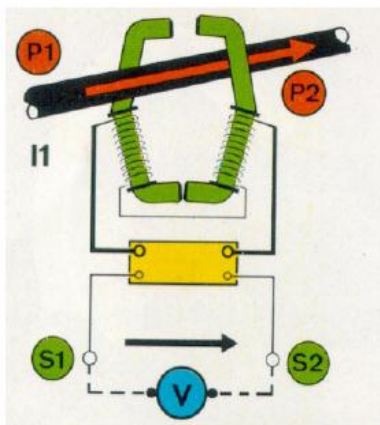
Sastavni dijelovi naponskog mjernog transformatora su: magnetska jezgra, primarni i sekundarni namot. Ukoliko nema gubitaka (idealno) vrijedi jednakost prema izrazu:

$$U_1 N_2 = U_2 N_1$$

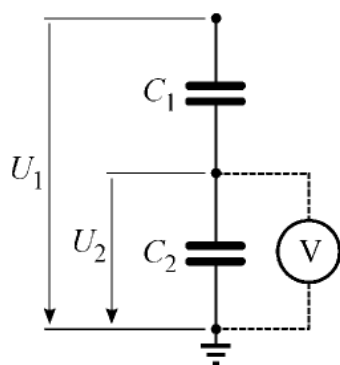
Pogrješka naponskog mjernog transformatora u odnosu prema idealnom slučaju (izraz gore) bit će negativna i raste s teretom, no smanjuje se korekcijom broja zavoja. Standardizirane snage transformatora su: 10 VA, 25 VA, 50 VA, 100 VA, 200 VA, 500 VA.

Pogrješke ne smiju biti premašene za napone između 80 % i 120 % nazivnog napona, uz teret snage između 25 % i 100 % nazivne vrijednosti, gdje je faktor snage 0.8.

Slika 3.1.4 – 3 Izvedba naponskog mjernog transformatora za pogonska mjerenja – Dietzova kliješta



Kapacitivni naponski mjerni transformator ima kapacitivno dijelilo za napone iznad 110 kV. Osnovni dio je visokonaponski kondenzator kapaciteta C_1 .



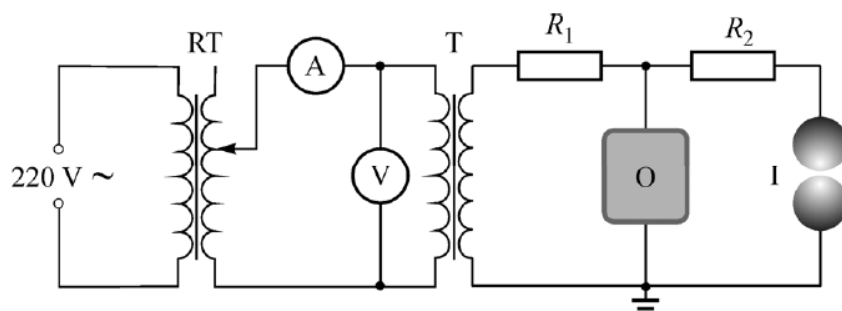
Uz zanemarive gubitke voltmetra vrijedi izraz:

$$U_1 = U_2 (1 + C_2/C_1)$$

Smanjenje kapaciteta C_2 postiže se povećanjem prividne snage na njemu i time smanjuje relativan utjecaj potroška instrumenta.

Kondenzatori su smješteni u porculanski izolator ispunjen uljem.

Kuglasto iskrište koristi se za mjerenje tjemene vrijednosti ispitnog izmjeničnog napona.



Ispitivani objekt O podvrgava se nazivnoj vrijednosti visokog ispitnog napona U_{isp} . Kugle se postavljaju na razmak koji odgovara naponu manjem od ispitnog (ali ne manjeg od $0.8 \cdot U_{isp}$) pa se odredi otklon α_p voltmetra za taj odbojni napon U_p . Kugle se razmaknu, napon se podigne na iznos ispitnog napona, odnosno do otklona α_{isp} , a izračunava se prema izrazu:

$$\alpha_{isp} = \alpha_p \frac{U_{isp}}{U_p}$$

Kuglasto iskrište ima mjerni opseg mjerenja visokih izmjeničnih napona od 1 kV do 1000 kV.

3.2 METODE ZA MJERENJE SNAGE

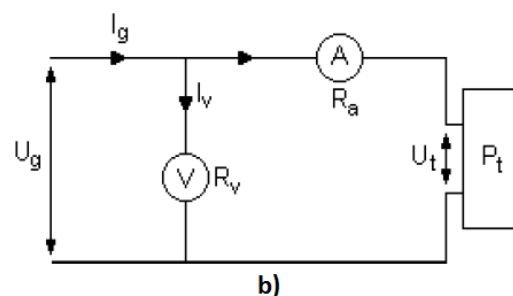
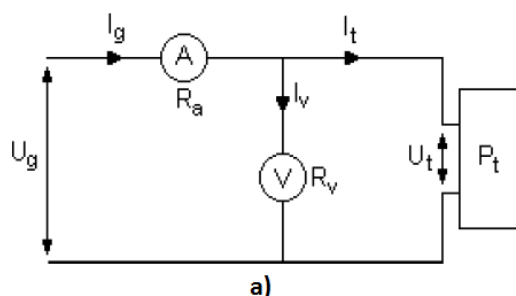
3.2.1 MJERENJE SNAGE U JEDNOFAZNOM SUSTAVU

Mjerenje snage u istosmjernom sustavu mjeri se tako što se pomoću ampermetra mjeri struja potrošača I_p , a pomoću voltmetra napon na tereta U_p . Snaga je produkt napona i struje, a dobiva se prema izrazu:

$$P_p = U_p \cdot I_p$$

Moguće je priključiti instrumente na dva načina:

- ampermetar ispred voltmetra (a)
- voltmetar ispred ampermetra (b)



Slika 3.2.1 – 1 Mjerenje snage u istosmjernom jednofaznom sustavu

Mjerenje snage tereta prema slici 3.2.1 – 1 (a), kroz ampermetar teče struja I_g – struja generatora koja je zbroj struje tereta I_t i struje voltmetra I_v (prvi Kirchhoffov zakon). Struja kroz voltmetar izračunava se prema izrazu:

$$I_v = \frac{U_t}{R_v}$$

Snaga na trošilo izračunava se prema izrazu:

$$P_t = U_t \cdot I_t = U_t \cdot (I_g - I_v) = U_t \cdot I_g - U_t \cdot I_v = U_t \cdot I_g - \frac{U_t^2}{R_v}$$

Snaga generatora (izvora) dobiva se prema izrazu:

$$P_g = (U_t + I_g \cdot R_a) \cdot I_g = U_t \cdot I_g + I_g^2 \cdot R_a$$

Može se zaključiti da u ovom spoju ampermetar mjeri struju koju daje generator, a voltmetar mjeri napon koji je za pad napona niži od napona generatora.

Mjerenje snage tereta prema slici 3.2.1 – 1 (b), sada instrumenti mjere veću snagu, jer voltmetar mjeri i pad napona na ampermetru, odnosno stvarni napon izvora – generatora prema izrazu:

$$P_t = (U_g - I_t \cdot R_a) \cdot I_t = U_g \cdot I_t - I_t^2 \cdot R_a$$

Snaga generatora (izvora) dobiva se prema izrazu:

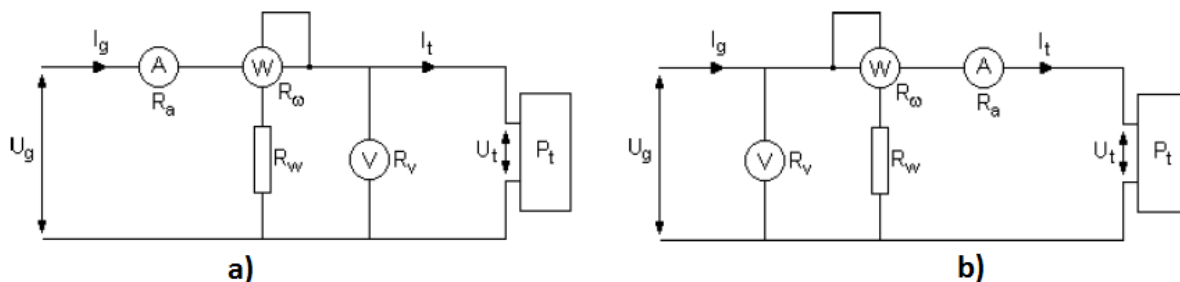
$$P_g = U_g \cdot (I_t - I_v) = U_g \cdot I_t + \frac{U_g^2}{R_v}$$

Ovakve spojeve koristimo pri mjerenju vrlo malih snaga gdje utrošak instrumenta ima veliku ulogu na rezultat mjerenja. Stoga se u praksi više koristi spoj (b), a točnost mjerenja ovisi o točnosti samih ampermetara i voltmetara. Kada je otpor tereta znatno veći od otpora ampermetra, odabire se spoj (b), a kada je otpor tereta zanemariv spram otpora voltmetra odabire se spoj (a).

Ukoliko se mjeri snaga u **izmjeničnom jednofaznom sustavu**, potrebno je snagu mjeriti vatmetrom.

Izravno mjerenje snage s pomoću vatmetra moguće je na dva načina:

- kada je naponska grana vatmetra spojena na stezaljke tereta (a)
- kada je naponska grana vatmetra spojena na stezaljke izvora (b)



Slika 3.2.1 – 2 Mjerenje snage u izmjeničnom jednofaznom sustavu

Vatmetar se sastoji od strujnog i naponskog svitka čiji su krajevi izvedeni na stezaljke instrumenta, stoga se svaki mora posebno priključiti strujnom krugu. Na samom vatmetru nalaze se četiri priključnice, no ako je vatmetar rađen za više naponskih mjernih opsega onda je broj priključnih stezaljki znatno više. Priključne stezaljke strujnog svitka su često veće i jače od naponskih. Kod prenosivih vatmetara priključne stezaljke često se nalaze u jednom redu. Kako ne bi došlo do pogreške pri spajanju i uključanju instrumenta, proizvođač instrumenta označava dovodne stezaljke. Budući da vatmetar mjeri snagu koja je produkt struje i napona, kroz strujni svitak teče struja opterećenja, dok je naponski svitak priključen neposredno ili preko predotpornika na napon U . Preporučuje se da u seriju sa strujnim svitkom priključimo ampermetar kako bi kontrolirali jakost struje koja je dozvoljena na strujnom svitku. Voltmetar se priključuje paralelno naponskom svitku kada postoji mogućnost da se poveća napon.

Kada je naponska grana vatmetra spojena na stezaljke tereta (a), snaga izvora dobiva se prema izrazu:

$$P_g = P_w + I_g^2 \cdot (R_w + R_a)$$

Snaga tereta dobiva se prema izrazu:

$$P_t = P_w - (U_t^2/R_v + U_t^2/R_w)$$

Kada je naponska grana vatmetra spojena na stezaljke izvora (b), snaga izvora dobiva se prema izrazu:

$$P_g = P_w + U_g^2/R_v + U_g^2/R_w$$

Snaga tereta dobiva se prema izrazu:

$$P_t = P_w - I_t^2 \cdot (R_w + R_a)$$

U izmjeničnom sustavu možemo razlikovati djelatnu, prividnu i jalovu snagu, za razliku od istosmjerne struje gdje je snaga definirana produktom napona i struje, ovdje se uzima u obzir fazni pomak φ između napona i struje.

Prividna snaga definirana je produktom napona i struje koje mjere ampermetar i voltmetar, a dobiva se prema izrazu:

$$S = U \cdot I = \sqrt{P^2 + Q^2} \text{ [VA]}$$

Prividna snaga predstavlja maksimalnu snagu koja se postiže kod izmjenične struje, što predstavlja djelatnu snagu kada je $\cos \varphi = 1$.

Djelatna snaga definirana je produktom prividne snage i kosinusom faznog kuta φ , a dobiva se prema izrazu:

$$P = S \cdot \cos \varphi = U \cdot I \cdot \cos \varphi = U^2/R = I^2 \cdot R \text{ [W]}$$

Na otporniku u izmjeničnom strujnom krugu za sinusni oblik napona i struje imamo fazni pomak jednak nuli. Energiju koju izvor preda strujnom krugu, potpuno je iskorištena za rad u trošilu (otporniku) i naziva se djelatna ili radna energija, dok se snaga razvijena na trošilu naziva **djelatna ili radna snaga**.

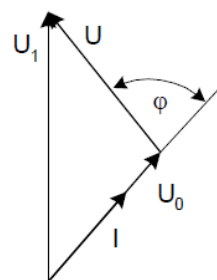
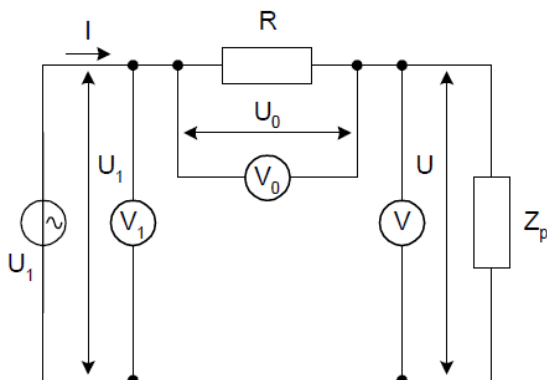
Jalova snaga definirana je produktom prividne snage i sinusom faznog kuta φ , a dobiva se prema izrazu:

$$Q = S \cdot \sin \varphi = U \cdot I \cdot \sin \varphi = U^2/X = I^2 \cdot X \text{ [VAR]}$$

Jalovu snagu očitavamo na reaktivnom dijelu trošila, a to nam može predstavljati induktivitet ili kapacitet. To znači da možemo imati induktivnu ili kapacitivnu jalovu snagu. U izmjeničnom strujnom krugu za sinusni oblik napona i struje imamo fazni pomak koji nije jednak nuli.

Neizravno mjerenje djelatne snage ostvaruje se pomoću spoja s tri voltmetra ili ampermetra.

Mjerenje djelatne snage s tri voltmetra ostvaruje se tako da se u seriju s mjernim teretom spaja poznati djelatni otpor R i mjeri napon tereta U, napon U_0 na otporu R i ukupni napon U_1 .



Slika 3.2.1 – 3 Mjerenje snage s tri otpora i vektorski dijagram

Napon U_0 je u fazi sa strujom I , dok napon U ima prema toj struji fazni pomak φ , a ukupni napon može se dobiti prema izrazu:

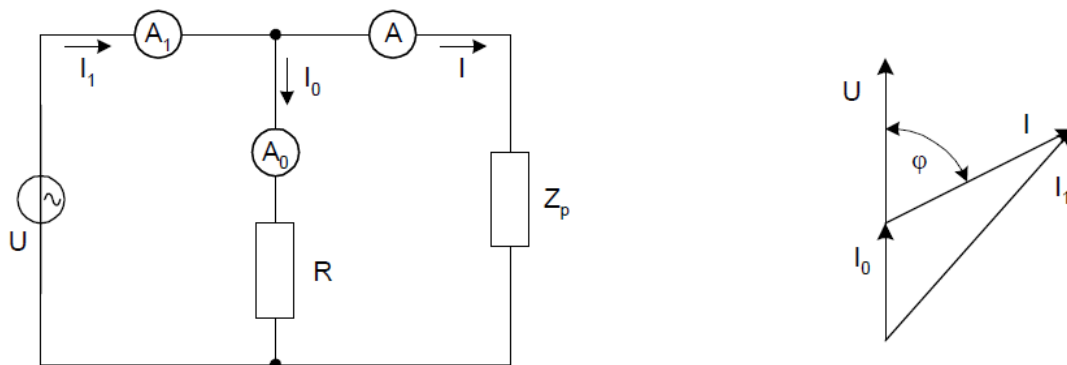
$$U_1^2 = U_0^2 + U^2 - 2U_0 \cdot U \cdot \cos(180^\circ - \varphi)$$

Djelatna snaga na teretu računa se prema izrazu:

$$P = U \cdot \frac{U_0}{R} \cdot \cos \varphi = \frac{U_1^2 - U_0^2 - U^2}{2R}$$

Nesigurnost mjerenja ovisi o tri instrumenta, no korištenjem vrhunskih digitalnih voltmetara može se postići vrlo uska granica pogrešaka. Ovom metodom mjerenja snage može se mjeriti i u području visokih frekvencija.

Mjerenje djelatne snage s tri ampermetra izvodi se na isti način kao i s tri voltmetra. Ostvaruje se tako da se u paralelu s mjernim teretom spaja poznati djelatni otpor R i mjeri struja tereta I , struja I_0 na otporu R i ukupna struja I_1 .



Slika 3.2.1 – 3 Mjerenje snage s tri otpora i vektorski dijagram

Struja I_0 je u fazi sa naponom U , dok struja I ima prema tom naponu fazni pomak φ , a ukupna struja može se dobiti prema izrazu (kosinusov poučak):

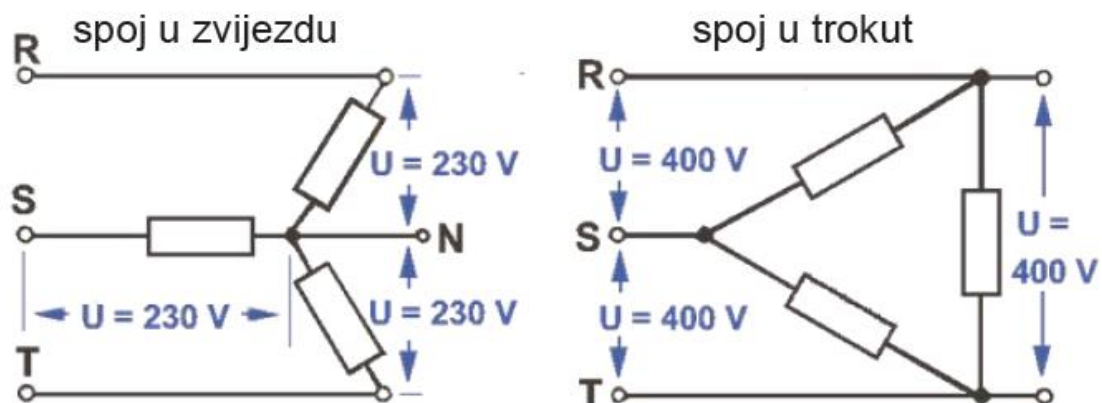
$$I_1^2 = I_0^2 + I^2 - 2I_0 \cdot I \cdot \cos(180^\circ - \varphi)$$

Djelatna snaga na teretu računa se prema izrazu:

$$P = I \cdot I_0 \cdot R \cdot \cos \varphi = \frac{I_1^2 - I_0^2 - I^2}{2} \cdot R$$

3.2.2 MJERENJE SNAGE U TROFAZNOM SUSTAVU

Trofazni sustav može bi u spoju trokut ili zvijezda, te trožičani bez nulvodiča – visokonaponski prijenosni sustavi ili četverožičani sa nulvodičem – niskonaponske mreže. Linijski napon nije jednak faznom u spoju zvijezda ($U_L = \sqrt{3} U_F$), dok su u spoju trokut jednakog iznosa.



Slika 3.2.2 – 1 Spojevi trofaznog sustava

Snaga simetričnog trofaznog sustava (impedancije su jednakog iznosa) izračunava se prema izrazu:

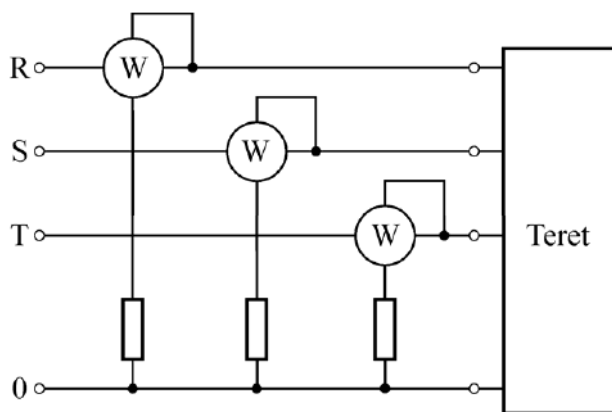
$$P = 3 \cdot P_F = 3 \cdot U_F \cdot I_F \cdot \cos \varphi$$

Snaga trofaznih nesimetričnih sustava (impedancije nisu jednakog iznosa) odgovara zbroju snaga svih triju faza:

$$P_R = U_R \cdot I_R \cdot \cos \varphi_z \quad ; \quad P_S = U_S \cdot I_S \cdot \cos \varphi_z \quad ; \quad P_T = U_T \cdot I_T \cdot \cos \varphi_z$$

$$P = P_R + P_S + P_T$$

Mjerenje djelatne snage metodom triju vatmetara (četverožičano) ostvaruje se tako da kroz strujne grane vatmetara teku fazne struje tereta, dok su njihove naponske grane priključene na pripadajuće fazne napone.



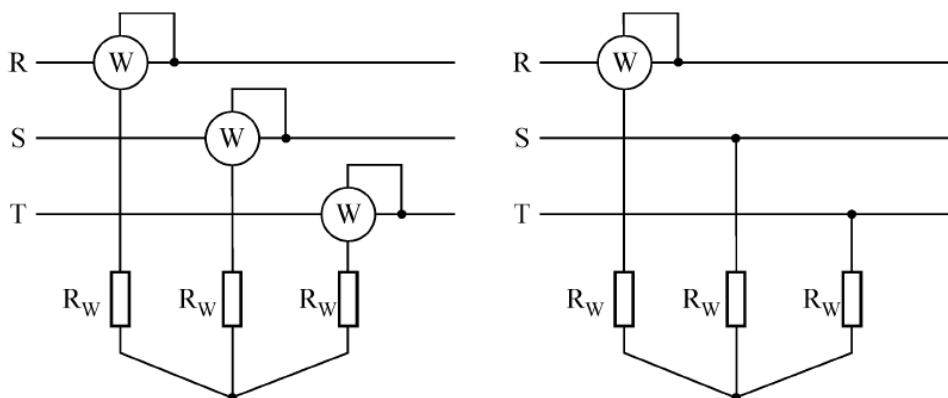
Slika 3.2.2 – 2 Mjerenje snage triju vatmetara četverožičanog sustava

Svaki vatmetar mjeri snagu u jednoj fazi, a ukupna snaga dobiva se prema izrazu:

$$P = P_{W1} + P_{W2} + P_{W3}$$

Pri mjerenju snage reaktivnih tereta, potrebno je koristiti vatmetre koji su prilagođeni za mjerenje malog faktora snage (npr. za 0.2, 0.1 ili 0.05).

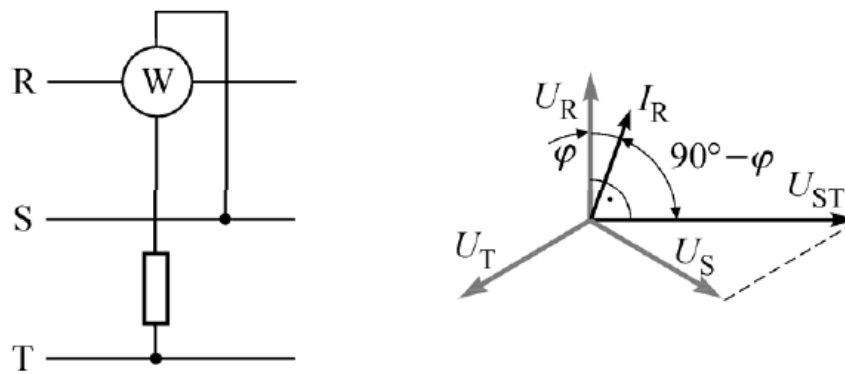
Mjerenje djelatne snage metodom triju vatmetara (trožičano) ostvaruje se tako da se izlazne naponske stezaljke spoje zajedno i tako uspostavi umjetna nul-točka sustava. Pri mjerenju snage simetričnog sustava snaga se može mjeriti samo u jednoj fazi, nadomještajući naponske grane za preostale dvije faze otpornicima otpora jednakog iznosa (R_W).



Slika 3.2.2 – 3 Mjerenje snage triju vatmetara trožičanog sustava

Mjerenje jalove snage izvodi se varmetrom, ili vatmetrom kojemu je naponska grana priključena na linijski napon U_{ST} . Napon U_{ST} fazno je pomaknut za 90° prema faznom naponu U_R . Linijski napon je za $\sqrt{3}$ veći od faznog, pa za slučaj simetričnog tereta vrijedi izraz:

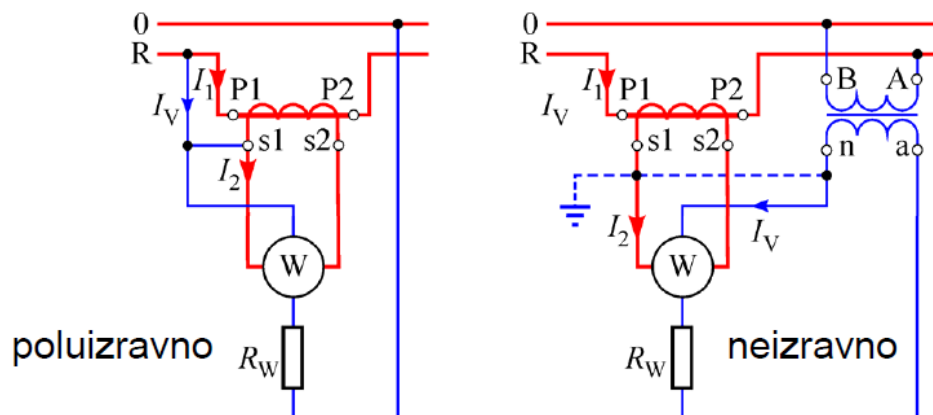
$$Q = 3 \cdot \frac{U_{ST}}{\sqrt{3}} \cdot I_R \cdot \cos (90^\circ - \varphi) = \sqrt{3} U_{ST} \cdot I_R \cdot \sin \varphi$$



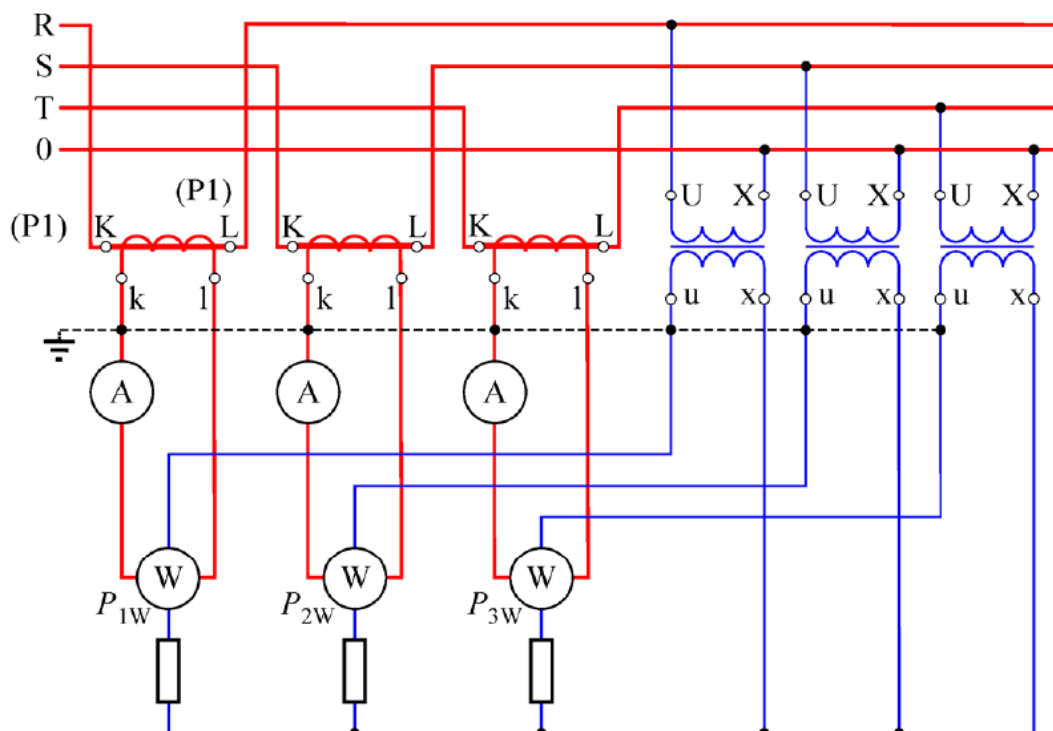
Slika 3.2.2 – 4 Mjerenje jalove snage vatmetrom

3.2.3 POLUIZRAVNO I NEIZRAVNO MJERENJE SNAGE

Pri mjerenju većih snaga na nižim naponima do 750 V koristi se **poluizravna metoda**, gdje se strujna grana vatmetra u mjerni sustav priključuje preko strujnog mjernog transformatora. Viši naponi zahtijevaju pojačanu izolaciju mjernih sustava, dovoda i instrumenata i stalna su opasnost pri rukovanju, te se koristi neizravna metoda gdje se, osim strujnog mjernog transformatora koristi i naponski mjerni transformator za priključak naponske grane vatmetra.



Slika 3.2.3 – 1 Poluizravno i neizravno mjerenje u jednofaznom sustavu



Slika 3.2.3 – 1 Neizravno mjerenje u trofaznom sustavu

3.3 METODE ZA MJERENJE OTPORA

Metode za mjerenje otpora dijele se na:

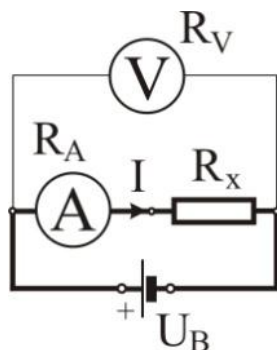
- mjerenje otpora metodom mjerenja napona i struje (U-I metoda)
- metodom usporedbe
- omometarskom metodom (izravna)
- metodom stalne struje
- mjerenje otpora uz pomoć mjernih mostova (mosne metode), a primjenjuju se ovisno o prilikama u kojima se otpor mjeri.

3.3.1 MJERENJE OTPORA U – I METODOM

Omski otpor je definiran kao svojstvo materijala da se suprotstavlja prolasku električne struje, tj. kao veličina koja povezuje napon i struju pomoću Ohmovog zakona [$U=R \cdot I$]. Ova veličina može biti konstantna ili promjenljiva. Ako je R promjenljiva veličina govorimo o nelinearnom električnom otporu. Nelinearni električni otpor R ne možemo iskazati drugačije već grafički ili matematičkom aproksimacijom odnosa između napona i struje. **Mjerenje otpora U-I metodom** primjenjuje se u mjerenju konstantnih električnih otpora, tj. onih koji imaju linearni grafički prikaz, ili jednostavnije rečeno $R = \text{konstanta}$. Napon ćemo mjeriti voltmetrom, a struju ampermetrom. Kod toga ove instrumente možemo spojiti na samo dva načina:

- spoj za mjerenje velikih otpora (strujni spoj)
- spoj za mjerenje malih otpora (naponski spoj)

Strujni spoj koristi se za mjerenje velikih otpora (mnogo većih od otpora ampermetra R_A), do $1 \text{ T}\Omega$, gdje je ampermetar spojen serijski u krug s nepoznatim otpornikom dok je voltmetar spojen ispred ampermetra paralelno. Pogreške nastaju zbog konačnog malog otpora R_A pa se nepoznati otpor R_x dobiva korekcijom napona.



Prema ovoj shemi vidimo da je napon koji mjeri voltmetar veći od napona na nepoznatom otporu za pad napona na ampermetru:

$$U_x = U_v - R_A \cdot I_A$$

Struja koju mjeri ampermetar jednaka je struji kroz nepoznati otpor:

$$I_x = I_A$$

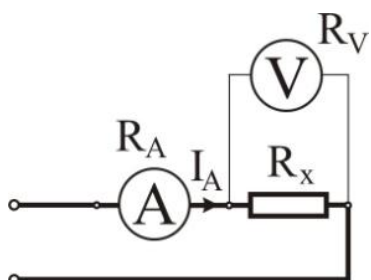
Nepoznati otpor dobiva se pomoću izraza:

$$R_x = U_x / I_x = \frac{U_v - R_A \cdot I_A}{I_A} = \frac{U_v}{I_A} - R_A$$

Ako je otpor mjerenja jednak naponu na voltmetru i struji na ampermetru, odnosno $R_{mj} = U_v / I_A$ tada dobivamo nepoznati otpor prema izrazu:

$$R_x = R_{mj} - R_A$$

Naponski spoj koristi se za mjerenje malih otpora (mnogo manjih od otpora voltmetra R_V), do $1 \mu\Omega$, gdje je voltmetar spojen paralelno u krug s nepoznatim otpornikom dok je ampermetar spojen ispred voltmetra serijski u strujni krug. Pogreške nastaju zbog konačnog velikog otpora R_V pa se nepoznati otpor R_x dobiva korekcijom struje.



Prema ovoj shemi vidimo da je struja koju mjeri ampermetar veća od struje I_x na nepoznatom otporu za struju I_v koja teče kroz voltmetar:

$$I_x = I_A - U_v / R_V$$

Napon koji mjeri voltmetar jednaka je naponu kroz nepoznati otpor:

$$U_x = U_v$$

Nepoznati otpor dobiva se pomoću izraza:

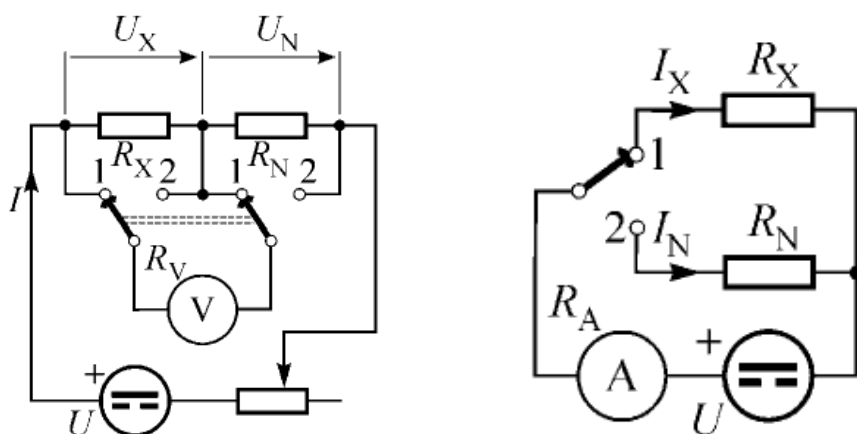
$$R_X = U_X / I_X = \frac{U_V}{I_A - \frac{U_V}{R_V}}$$

Ako je otpor mjerenja jednak naponu na voltmetru i struji na ampermetru, odnosno $R_{mj} = U_V / I_A$ tada dobivamo nepoznati otpor prema izrazu:

$$R_X = \frac{R_{mj}}{1 - \frac{R_{mj}}{R_V}} = R_{mj} \cdot \left(1 - \frac{R_A}{R_{mj}}\right)$$

3.3.2 MJERENJE OTPORA METODOM USPOREDBE

Mjerenje otpora dobiva se usporedbom s točno poznatim otporom R_N (etalon), putem padom napona na oba otpora vezanih serijski, odnosno struja u njihovom paralelnom spoju.



Slika 3.3.2 – 1 Serijski i paralelni spoj mjerenja otpora metodom usporedbe

Serijski spoj mjerenja otpora metodom usporedbe služi za mjerenje otpora mnogo manjih od unutarnjeg otpora voltmetra R_V . Tijekom usporedbe ne smije se mijenjati struja u mjernom krugu.

Paralelni spoj mjerenja otpora metodom usporedbe služi za mjerenje otpora mnogo većih od unutarnjeg otpora ampermetra R_A . Tijekom usporedbe ne smije se mijenjati napon izvora.

U oba slučaja se nepoznati otpor iskazuje omjerom otklona α_X i α_N očitanih na istom mjernom instrumentu i dobiva se izraz:

$$R_X = R_N \cdot \frac{\alpha_X}{\alpha_N}$$

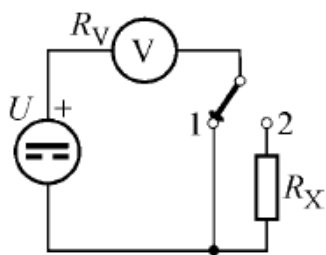
Netočnost instrumenata znatno manje utječe na rezultat nego kod U-I metode mjerenja otpora. Uvodi se korekcija zbog utjecaja vlastitog utroška unutarnjeg otpora instrumenata, prema izrazima:

$$R_X = R_N \cdot \frac{U_X}{U_N} \cdot \frac{R_V}{R_V + R_N \left(1 - \frac{U_X}{U_N}\right)} \quad \dots \text{za serijski spoj}$$

$$R_X = \frac{I_N}{I_X} (R_N + R_A) - R_A \quad \dots \text{za paralelni spoj}$$

3.3.3 MJERENJE OTPORA OMOMETARSKOM METODOM

Omometri su električni mjerni instrumenti kojima se može **izravno** mjeriti nepoznata vrijednost otpora otpornika pri istosmjernoj struji. Uglavnom se izrađuju kao prijenosni instrumenti klase točnosti 1.5 i 2.5. Skala omometra je neravnomjerna, a najveći otklon kazaljke α odgovara kada je R_X jednak nuli. Prije početka svakog novog mjerenja omometri se podešavaju, što predstavlja nedostatak ovakvih instrumenata. Omometarska metoda nije prikladna za mjerenje malih otpora (malih R_X), jer bi trajnost baterije bila znatno smanjena zbog velike struje tijekom mjerenja.



Ako instrumentu sa zakretnim svitkom i trajnim magnetom dodamo bateriju i klizni otpornik (potenciometar) dobiti ćemo instrument s kojim ćemo moći mjeriti otpor nekog otpornika. Mjeri se struju kroz zakretni svitak instrumenta, a ona ovisi o naponu baterije i nepoznatom otporu R_X . Ako je napon baterije uglavnom konstantan onda se može izraditi skala na kojoj se može s dovoljnom točnošću izravno očitavati iznos nepoznatog otpora nekog otpornika.

Položaj 1 preklopke odgovara kratkom spoju priključnih stezaljki instrumenta kada se dobije otklon α_1 , a unutarnji otpor R_u izvora je zanemariv prema otporu R_V instrumenta. Na takav način dobiva se struja kruga prema izrazu:

$$I_1 = \frac{E}{R_V} = k \cdot \alpha_1$$

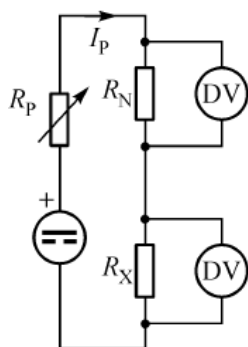
Položaj 2 preklopke odgovara stanju kad je otpor R_X priključen na stezaljke instrumenta i tada se dobije otklon α_2 . Struja kruga dobiva se prema izrazu:

$$I_2 = \frac{E}{R_V + R_X} = k \cdot \alpha_2$$

Iz omjera struja (otklona) dobiva se vrijednost nepoznatog otpora prema izrazu:

$$R_X = R_V \cdot \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} - 1 \right)$$

3.3.4 MJERENJE OTPORA METODOM STALNE STRUJE

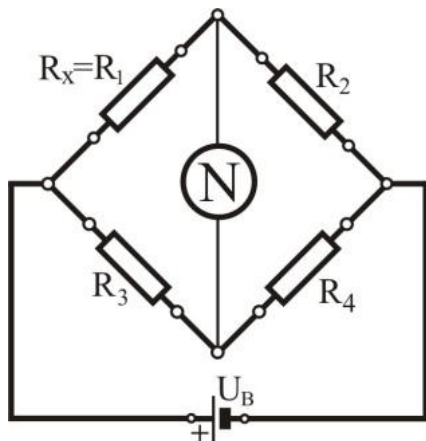


Mjerenje otpora **metodom stalne struje** vrlo je slična metodi usporedbe u serijskom spoju, gdje se uspoređuju padovi napona na otporima. Struja u mjernom krugu mora biti tolika da ne izazove zamjetno povišenje temperature otpornika, a time i promjenu njihova otpora. Primjenom dvaju voltmetra neutralizira se utjecaj termonapona.

Ova metoda primjenjuje se kod mjerenja otpora velike točnosti, gdje je nesigurnost mjerenja reda 10^{-6} .

3.3.5 MJERENJE OTPORA MOSNOM METODOM

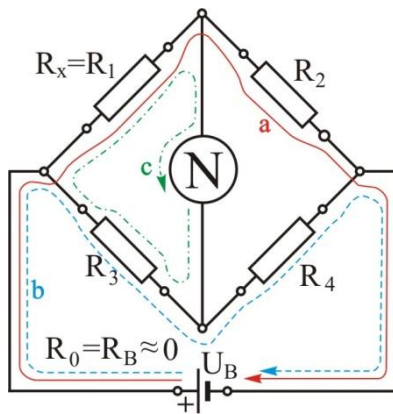
Mjerenje otpora mosnim metodama najviše se izvodi **Wheatstoneovim mostom** za istosmjernu struju. Služi za mjerenje otpora reda veličine od 1Ω do $10 M\Omega$.



Mostovi su električne mreže kod kojih su elementi mosta povezani u četverokut, a po dva nasuprotna čvora povezana su međusobno dijagonalama.

Ravnoteža ne ovisi o značajkama instrumenta, niti o naponu napajanja mosta. Napon napajanja utječe na osjetljivost: s jedne strane, većim naponom se postiže veća osjetljivost a s druge, povećano zagrijavanje mijenja otpore u granama i stvara dodatne termonapone te smanjuje točnost. Utjecaj termonapona se može poništiti komutacijom struje (komutacija je prijelaz struje s jedne grane sklopa na drugu), kada se kao točan rezultat uzima aritmetička srednja vrijednost

rezultata prije i poslije komutacije. Izračunavanje se izvodi metodom konturnih struja da bi se ustanovila kolika struja teče kroz nul-indikator uz pretpostavku da je otpor u grani s izvorom R_0 jednak nuli. Otpornik R_1 predstavlja nepoznati otpor R_X .



Kontura a. → Jednadžba a. $I_a \cdot (R_1 + R_2) + I_c \cdot R_1 = U_B$

Kontura b. → Jednadžba b. $I_b \cdot (R_3 + R_4) - I_c \cdot R_3 = U_B$

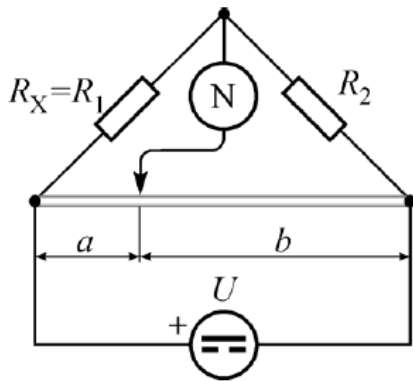
Kontura c. → Jednadžba c. $I_c \cdot (R_1 + R_2) + I_a \cdot R_1 - I_b \cdot R_3 = 0$

Iz jednadžbi a i b možemo izračunati konturne struje Ia i Ib:

$$I_a = \frac{U_B - I_c \cdot R_1}{R_1 + R_2} \quad I_b = \frac{U_B + I_c \cdot R_3}{R_3 + R_4}$$

Most je uravnotežen onda kada je struja kroz nul-indikator jednaka nuli, tj. kada je $I_N = I_c = 0$. Tada vrijedi uvjet ravnoteže i nepoznati se otpor dobiva prema izrazu:

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3 \rightarrow R_x = R_1 = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4}$$

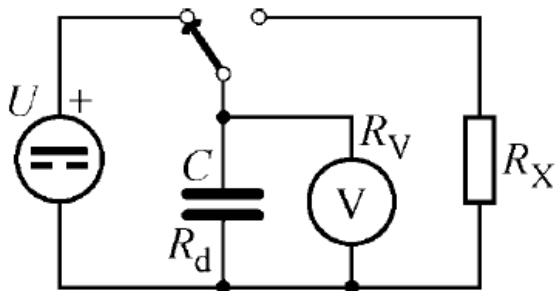


Inačica Wheatstoneova mosta je s kliznom žicom. Ovisno o vrijednosti otpora R_1 ravnoteža se postiže u različitim položajima kliznika te se, uz poznatu ukupnu duljinu žice ($l=a+b$). Uvjet ravnoteže mosta dobiva se izrazom:

$$R_x = R_1 = R_2 \cdot \frac{a}{b}$$

3.3.6 METODE ZA MJERENJE VELIKIH OTPORA

3.3.6.1 Metoda gubitka naboja



Metoda gubitka naboja koristi se za vrlo velike otpore. Kondenzator C se nabija na poznati napon U, a zatim se mjeri vrijeme t potrebno da se preko ukupnog otpora kruga izbije, najčešće do $U/2$ – izbijanje se opisuje eksponencijalnim zakonom prema izrazu:

$$U_c = U \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \rightarrow R_{uk} = \frac{\Delta t}{C \cdot \ln\left(\frac{U}{U_c}\right)}$$

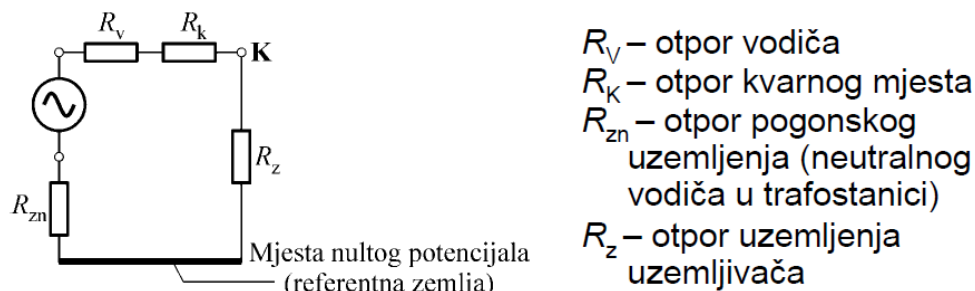
Otpor voltmetra mora biti dovoljno velik, barem reda veličine nepoznatog otpora R_x . Kondenzator C se stoga osim preko otpora R_x izbija i preko R_v i velikog otpora dielektrika kondenzatora R_d . Mjerni otpor dobiva se preko izraza:

$$R_x = \frac{R_{uk} \cdot R_p}{R_p - R_{uk}} \quad \text{gdje je } R_p = R_v \parallel R_d$$

3.3.6.2 Mjerenje otpora uzemljenja

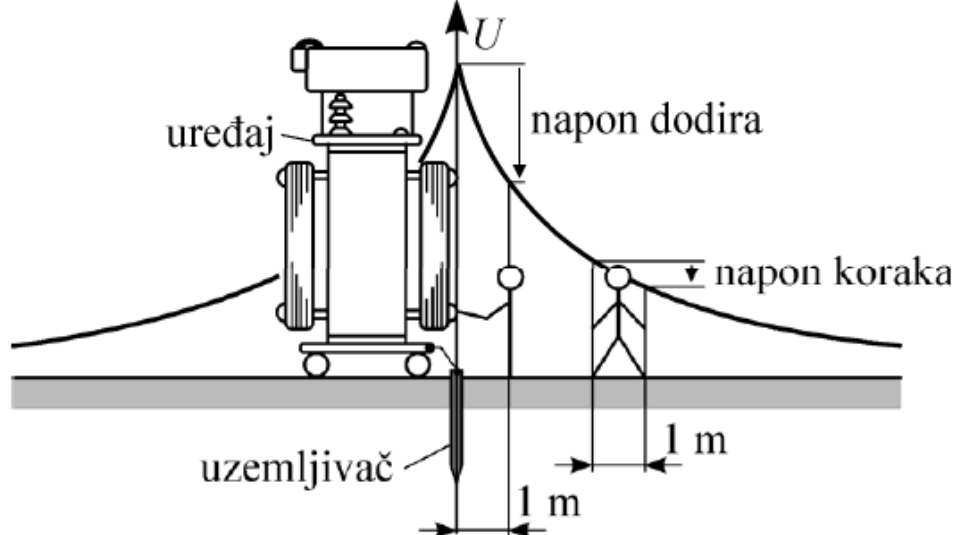
Dijelovi električnih uređaja koji ne pripadaju strujnom krugu a izloženi su dodiru (metalno kućište aparata, prekidači i sl.) moraju biti propisno izolirani. Uslijed kvara ti dijelovi mogu doći pod napon što znači opasnost za čovjeka koji rukuje uređajem, dijelovi se moraju uzemljiti. Postoje vrpčasti, štapasti, cijevni uzemljivači od profilnog metala ukopanog u zemlju, a povezuju se zemljovodom. Glavni nedostatak je tromost osigurača - u trenutku nastanka kvara trošilo će stanovito kratko vrijeme još biti pod naponom, kao i njegovo kućište. Istraživanja pokazuju da najmanji otpor između ruku čovjeka (ili ruke i noge) pri frekvenciji 50 Hz iznosi 1000 Ω (ovisi o vlažnosti kože i dodirnoj

površini). Definirani su naponi i struje koji se ovisno o trajanju kvara smatraju granično opasnim po život – za dodir u trajanju nekoliko sekundi taj napon iznosi 80 V!



Slika 3.3.6.2 – 1 Dijelilo napona mreže

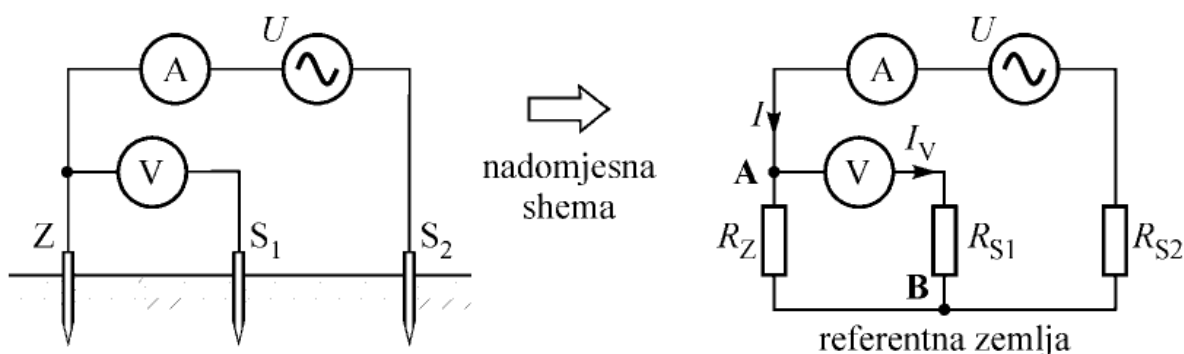
Nepropisno uzemljenje znači da otpor uzemljenja R_z nije dovoljno malen, a napon na kućištu (točka K) prilikom kvara poprima nedopušteno visoku vrijednost. Pod otporom uzemljenja R_z podrazumijeva se zbroj otpora rasprostiranja uzemljivača i otpora zemljovoda. Većinom je opravdano moguće zanemarivanje otpora zemljovoda, te se R_z svodi na otpor rasprostiranja uzemljivača (ili jednostavnije - otpor uzemljenja).



Slika 3.3.6.2 – 2 Primjer uzemljenja uređaja

Napon koraka U_k je dio napona uzemljivača koji može biti premošten korakom (duljine 1 m), pri čemu struja teče kroz noge, dok napon dodira U_d je dio napona uzemljivača koji čovjek dodiranjem može premostiti (vodoravni razmak 1 m), pri čemu struja teče kroz ruku i nogu. Za mjerenje otpora uzemljivača U-I metodom potrebno je:

- pomoćna sonda S2,
- naponska sonda S1,
- izvor napona,
- ampermetar i voltmetar.



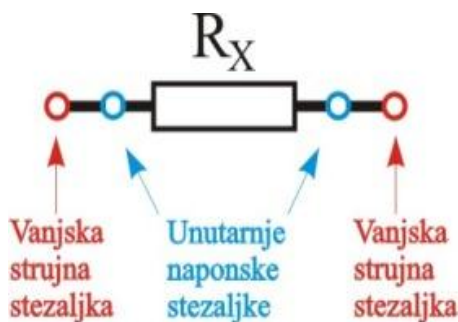
Propisi udaljenosti su za $S_1 > 2.5 \times$ najveća dimenzija uzemljivača (ne manje od 20 m), $S_2 > 4 \times$ najveća dimenzija uzemljivača (ne manje od 40 m). Sonde su metalne šipke ($l \approx 1\text{ m}$, $d =$ od 10 do 20 mm). Također propisi zahtijevaju da je otpor voltmetra $R_v > 10 R_{s1}$.

U-I metodom dobije se otpor uzemljivača prema izrazu:

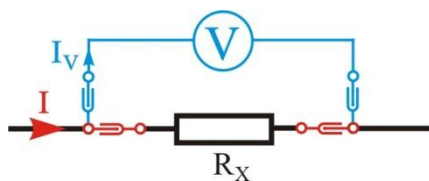
$$R_z = U_v / I_a$$

3.3.7 METODE ZA MJERENJE VRLO MALIH OTPORA

Kod mjerenja otpora vrlo malih iznosa veliku smetnju predstavlja promjenljivi otpor kontakata (prelazni otpor sa priključnog vodiča na sam otpornik). Iznos otpora kontakata ovisi o načinu kako se izvode priključci; da li uticanjem banana utikača u odgovarajuću utičnicu (oko $0.5 - 2\text{ m}\Omega$), pritezanjem vijkom i navrtkom (oko $0.1\text{ m}\Omega$) ili mekim odnosno tvrdim lemom itd.



Slika 3.3.7 – 1 Prikaz kako se s banana utikačima ostvaruje spoj



Ovaj prelazni otpor, otpor kontakta, ne ovisi samo o izvedbi spoja, već se on mijenja i tokom vremena. Zbog atmosferskih utjecaja kontakti korodiraju, praše se i sl., a to sve ima utjecaj na iznos tog prelaznog otpora. Uz to kod kontakata s vijcima, otpor kontakta ovisi i koliko je jako kontakt pritegnut. Zbog toga mi ne znamo točan iznos ovog otpora, pa njegov utjecaj ne možemo odstraniti korekcijom rezultata mjerenja. Stoga se mali otpori obavezno izrađuju sa četiri priključne stezaljke, dvije vanjske i dvije unutarnje naponske.

Ako umjesto svakog prikazanog rastavljivog kontakta  nacrtamo odgovarajući otpor kontakta dobiti ćemo novu shemu kakva je prikazana na slici lijevo. Iako se može izračunati koji napon ustvari mjeri voltmetar ovdje imamo paralelni spoj pa se pad napona na njemu dobiva izrazima:

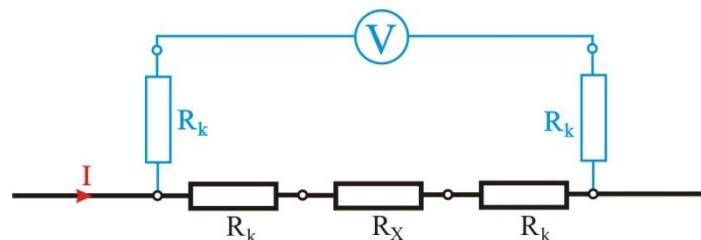
$$U_p = (I - I_v) \cdot (R_x + 2 \cdot R_k) = I_v \cdot (R_v + 2 \cdot R_k)$$

$$I \cdot (R_x + 2 \cdot R_k) = I_v \cdot (R_v + R_x + 4 \cdot R_k)$$

$$I \cdot (R_x + 2 \cdot R_k) = I_v \cdot R_v + I_v \cdot (R_x + 4 \cdot R_k) \quad U_v = I_v \cdot R_v \quad I_v = U_v / R_v$$

$$I \cdot (R_x + 2 \cdot R_k) = U_v + \frac{U_v}{R_v} \cdot (R_x + 4 \cdot R_k)$$

$$I \cdot (R_x + 2 \cdot R_k) = U_v \cdot \left(1 + \frac{R_x + 4 \cdot R_k}{R_v} \right)$$



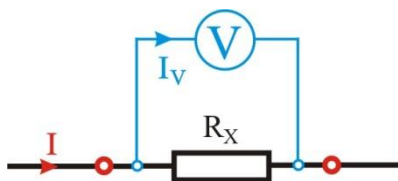
Ako je otpor voltmetra bar nekoliko desetaka tisuća puta veći od malog otpora R_x kojeg mjerimo, te otpora kontakata. Iz toga proizlazi da za izraz iz jednadžbe možemo pisati da je jednak jedinici:

$$1 + \frac{R_x + 4 \cdot R_k}{R_v} \approx 1$$

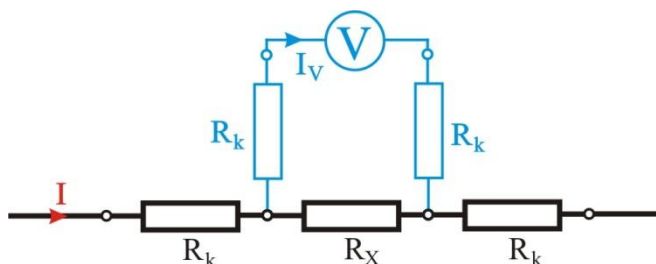
Napon koji će mjeriti voltmetar biti će veći od napona na otporu za pad napona na dva kontakta (kroz jedan struja ulazi a kroz drugi izlazi iz otpora) prema izrazu:

$$I \cdot (R_X + 2 \cdot R_k) = U_V$$

Ako je otpornik izveden s četiri priključne stezaljke imamo sličnu situaciju.



Slika - Spoj otpornika s četiri priključne stezaljke



Slika - Ekvivalentna shema prema slici.

Može se napisati: $U_p = (I - I_V) \cdot R_X = I_V \cdot (R_V + 2 \cdot R_k)$

$$I \cdot R_X = I_V \cdot R_X + I_V \cdot R_V + I_V \cdot 2 \cdot R_k$$

$$I \cdot R_X = I_V \cdot R_V + I_V \cdot (R_X + 2 \cdot R_k)$$

$$U_V = I_V \cdot R_V \quad I_V = U_V / R_V$$

$$I \cdot R_X = U_V + \frac{U_V}{R_V} \cdot (R_X + 2 \cdot R_k)$$

$$I \cdot R_X = U_V \cdot \left(1 + \frac{R_X + 2 \cdot R_k}{R_V} \right)$$

Izraz u zagradi iz jednadžbe praktički je jednak jedinici, jer je otpor voltmetra R_V mnogo veći od malog otpora koji se mjeri (R_X) i još manjih otpora kontakata R_k :

$$1 + \frac{R_X + 2 \cdot R_k}{R_V} \approx 1$$

Dobiva se da je napon na voltmetru praktički jednak naponu na omskom otporu koji se mjeri (razlika je koliko je gornji izraz veći od 1) prema izrazu:

$$I \cdot R_X = U_V$$

3.4 METODE ZA MJERENJE INDUKTIVITETA

Mjerenje induktiviteta je moguće na više načina upotrebom posebnih instrumenata. Ako zahtjevi za velikom točnošću nisu presudni možemo primijeniti U-I metodu mjerenja gdje su potrebna dva instrumenta koji mogu mjeriti AC i DC napone i struje.

Svitak se formira od zavoja vodljive (obično bakrene) žice, pri čemu broj zavoja N , duljina svitka l , presjek njegove jezgre S i permeabilnost μ_r materijala od kojega je napravljena jezgra, mogu varirati u širokim granicama, ovisno o željenoj vrijednosti induktiviteta L :

$$L = N^2 \mu_0 \mu_r S / l$$

Svitci se izrađuju u širokoj izvedbi ovisno o aplikaciji. Dvije temeljne skupine su zračni i svitci s magnetskom jezgrom (prigušnice). Izbor materijala i konstrukcija magnetske jezgre bitno utječu na karakteristike svitka. Realni svitak ima određeni aktivni otpor zavoja, a kada sadrži magnetsku jezgru dodatno se trebaju uzeti u obzir gubici koji nastaju u jezgri i koji uzrokuju nelinearne strujno-naponske odnose. Svitci su pasivni elementi izmjeničnih krugova s vrlo širokim mogućnostima uporabe u elektrotehnici. Primjerice služe za:

- generiranje induciranih napona (transformator, "bobina" u automobilu)
- generiranje magnetskih sila (električni motor, relej, kontaktori)
- filtriranje signala (NF filtri, VF filtri, pojasni filtri)
- skladištenje magnetske energije
- stvaranje električnog otpora

Prigušnice su svitci velikoga induktivnog otpora. Primjenjuju se u različitim vrstama električnih filtara koji osiguravaju raspodjelu struje ovisno o frekvenciji. Niskofrekventne (NF) prigušnice imaju znatan induktivitet od nekoliko ili desetak H , a imaju veliki induktivni otpor već pri niskim frekvencijama. Veliki se otpor u ovom slučaju postiže tako da se svitak konstruira s velikim brojem zavoja ($L \sim N^2$) i sa zatvorenim magnetskom jezgrom ($\mu_r \gg 1$). Visokofrekventne prigušnice (VF) imaju mali induktivitet ($mH, \mu H$) i predstavljaju veliki induktivni otpor samo za visoke frekvencije. Izrađuju se bez jezgre ili sa specijalnom jezgrom (feriti).

Mjerenje struje i napona možemo na posredan način odrediti induktivitet nekog svitka bez željezne jezgre. Moramo mjeriti istosmjernom strujom da bismo odredili radni ili djelatni otpor R_L , a izmjeničnom strujom da bismo odredili prividni otpor ili impedanciju Z prema izrazima:

$$R_L = U_L / I_L$$

gdje su U_L i I_L izmjerene vrijednosti istosmjernog napona i struje.

$$Z = U_L / I_L$$

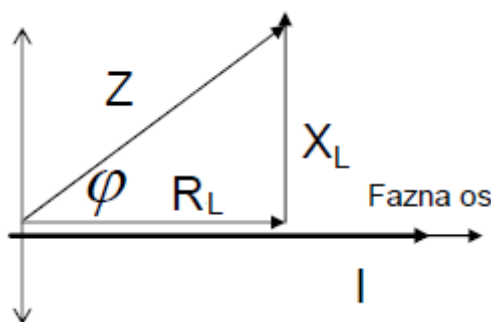
gdje je U_L i I_L izmjerene efektivne vrijednosti izmjeničnog napona i struje.

Efektivna vrijednost neke izmjenične struje ona je vrijednost koju bi trebala imati istosmjerna struja da proizvede isti toplinski učinak kao ta izmjenična struja. Njihov međusobni odnos je:

$$I_{ef} = I_{max} / \sqrt{2} \quad U_{ef} = U_{max} / \sqrt{2}$$

Pomoću R_L i Z možemo izračunati induktivni otpor X_L svitka, induktivitet svitka L i kosinus kuta faznog pomaka između napona i struje prema izrazima:

$$X_L^2 = Z^2 - R_L^2 \quad L = X_L / 2\pi f \quad \cos \varphi = R_L / Z$$

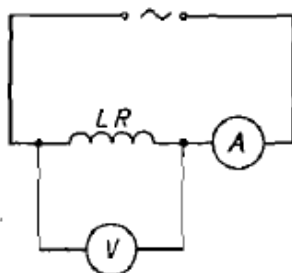


Slika 3.4 – 1 Karakteristični trokut otpora svitka

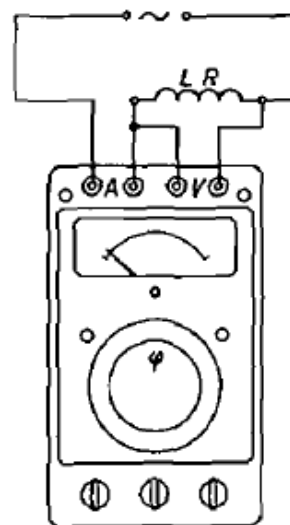
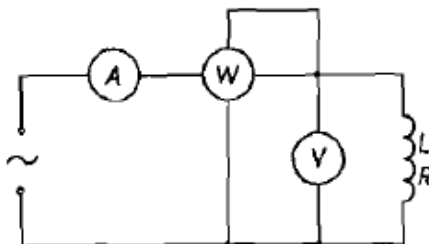
Pri mjerenju **U-I metodom** potrebno je mjeriti djelatni otpor u hladnom stanju, i to strujom koja nije veća od $0.1 I_n$ do $0.3 I_n$ (nazivne vrijednosti struje) svitka. Moramo također obratiti pozornost na izvedbu instrumenata kojima mjerimo. Tako za mjerenje napona i struje kod određivanja djelatnog otpora (istosmjerne struje) voltmetar i ampermetar moraju biti s pomičnim svitkom, a kod

određivanja prividnog otpora (izmjenična struja) voltmetar i ampermetar moraju biti s pomičnim željezom ili pomičnim svitkom i ispravljačem. Na točnost mjerenja utječe frekvencija struje pa moramo voditi računa da je frekvencija mreže stabilna ili je mjerimo posebnim instrumentom.

**Mjerenje induktiviteta
mjerenjem napona i
struje**



**Mjerenje induktiviteta
mjerenjem napona, struje
i snage**



**Mjerenje induktiviteta
vektormetrom**

Slika 3.4 – 2 Neizravno i izravno mjerenje induktiviteta

Struju i napon svitka mjerimo ampermetrom i voltmetrom, a gubitke P vatmetrom, a vrijednost induktiviteta dobiva se prema izrazu:

$$L = \frac{1}{\omega I^2} \sqrt{U^2 I^2 - P^2}$$

Samoinduktivitet i djelatni otpor svitka pri izmjeničnoj struji možemo odrediti **vektormetrom**. Najprije izmjerimo vektormetrom struju svitka, tako da postavimo fazni zakretač vektormetra u položaj u kojem dobivamo najveći otklon instrumenta. Zatim priključimo vektormetar paralelno svitku. Tada on mjeri djelatni pad napona U_R , a ako zakrenemo fazni zakretač za 90° , mjerit će vektormetar jalovi pad napona U_L pa je induktivitet svitka:

$$L = \frac{U_L}{I \omega}$$

3.4.1 MOSNE METODE MJERENJA INDUKTIVITETA

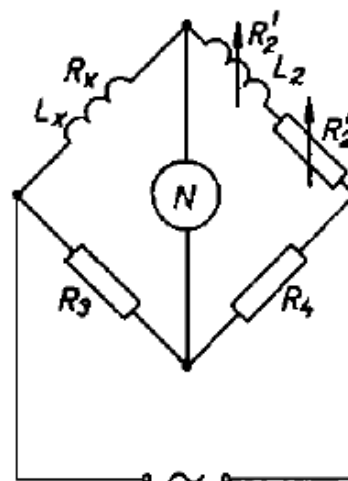
Mosne metode mjerenja induktiviteta svode se na usporedbu nepoznatog induktiviteta i pripadnog djelatnog otpora s poznatim induktivitetima i djelatnim otporima, ili na usporedbu s poznatim kapacitetima i djelatnim otporima. U prvu grupu spadaju mostovi s promjenjivim poznatim induktivitetom i most s dvije klizne žice, a u drugu mostovi poznati pod imenom: Maxwelllov, Owenov, Hayov, Andersonov i rezonantni most.

Most s promjenjivim induktivitetom imaju u prvoj grani mosta svitak nepoznatog induktiviteta L_x , i djelatnog otpora R_x , a u drugoj grani promjenjivi induktivitet L_2 djelatnog otpora R_2' i još jedan promjenjivi otpor R_2'' . U trećoj i četvrtoj grani nalaze se djelatni otpori R_3 i R_4 . Za uravnotežen most vrijedi:

$$Z_1 \cdot Z_4 = Z_2 \cdot Z_3$$

odnosno:

$$(R_x + j\omega L_x) R_4 = (R_2' + R_2'' + j\omega L_2) R_3$$



Nakon množenja i odvajanja realnih komponenata od imaginarnih, dobivamo:

$$R_x = (R_2' + R_2'') \frac{R_3}{R_4} \quad ; \quad L_x = L_2 \frac{R_3}{R_4}$$

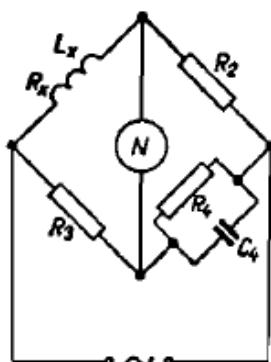
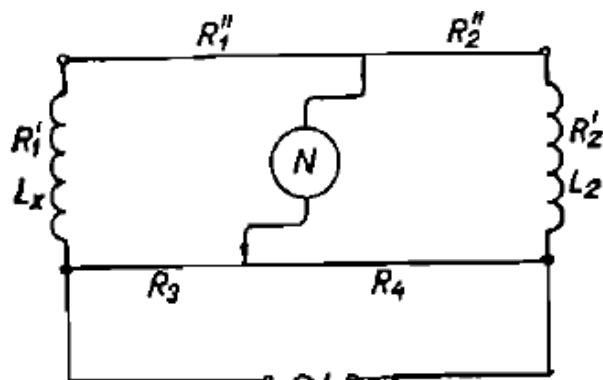
Pri ugađanju ravnoteže pomoću L_2 i R_3 , kut između pravaca se dobiva prema izrazu:

$$P = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{\omega L_2}{R_2} = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{\omega L_x}{R_x}$$

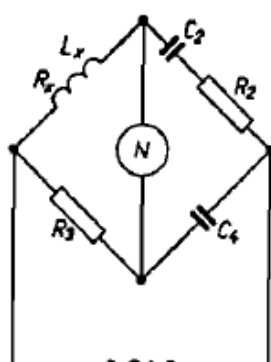
Most s dvije klizne žice ravnotežu mosta postiže pomicanjem kliznika na jednoj i drugoj kliznoj žici. Poznati induktivitet L_2 , ima konstantan iznos. U stanju ravnoteže vrijedi:

$$R_1' = (R_2' + R_2'') \frac{R_3}{R_4} - R_1''$$

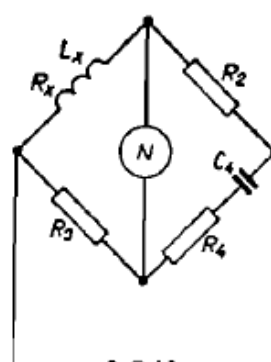
$$L_x = L_2 \frac{R_3}{R_4}$$



Maxwellov most



Owenov most



Hazov most

Maxwell-Wienov most u granama mosta nalaze ima slijedeće impedancije:

$$Z_x = R_x + j\omega L_x \quad ; \quad Z_2 = R_2 \quad ; \quad Z_3 = R_3 \quad ; \quad Z_4 = R_4 / (1 + j\omega C_4 R_4)$$

Ravnoteža mosta postižemo kada je zadovoljen uvjet:

$$(R_x + j\omega L_x) R_4 = (1 + j\omega C_4 R_4) R_2 R_3$$

Nakon množenja i odvajanja realnih komponenata od imaginarnih, dobivamo:

$$R_x = R_2 \frac{R_3}{R_4} \quad ; \quad L_x = C_4 R_2 R_3$$

Na uvjete ravnoteže ne utječe frekvencija.

Owenov most slično kao i kod Maxwellova mosta, određuje se nepoznati induktivitet pomoću poznatih djelatnih otpora i kapaciteta. U granama mosta nalaze se slijedeće impedancije:

$$Z_x = R_x + j\omega L_x \quad ; \quad Z_2 = R_2 - \frac{j}{\omega C_2} \quad ; \quad Z_3 = R_3 \quad ; \quad Z_4 = \frac{1}{j\omega C_4}$$

Ravnoteža mosta postižemo kada je zadovoljen uvjet:

$$(R_x + j\omega L_x) / (j\omega C_4) = (R_2 - \frac{j}{\omega C_2}) R_3$$

Nakon množenja i odvajanja realnih komponenata od imaginarnih, dobivamo:

$$R_x = R_3 \frac{C_4}{C_2} \quad ; \quad L_x = C_4 R_2 R_3$$

Hayov most ima u četvrtoj grani serijsku kombinaciju kapaciteta i otpora, za razliku od Maxwelllova mosta koji ima paralelnu. Ravnoteža mosta postižemo kada je zadovoljen uvjet:

$$(R_x + j\omega L_x) \left(R_4 - \frac{j}{\omega C_4} \right) = R_2 R_3$$

Nakon množenja i odvajanja realnih komponenata od imaginarnih, dobivamo:

$$R_x = \frac{\omega^2 C_4^2 R_2 R_3 R_4}{1 + \omega^2 C_4^2 R_4^2} \quad ; \quad L_x = \frac{C_4 R_2 R_3}{1 + \omega^2 C_4^2 R_4^2}$$

Za određivanje L_x i R_x potrebno je poznavati frekvenciju, što nije potrebno kod prethodnih mostova.

3.5 METODE ZA MJERENJE KAPACITETA

Mjerenje kapaciteta je moguće na više načina korištenjem posebnih instrumenata. Ako zahtjevi za velikom točnošću nisu presudni možemo primijeniti U-I metodu mjerenja gdje su potrebna dva instrumenta za mjerenje AC i DC napona i struja.

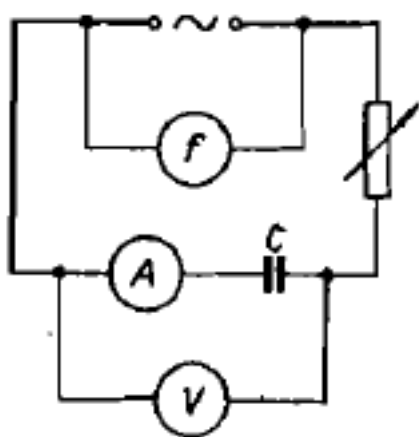
Pored aktivnih otpora kondenzatori najčešće su korištene pasivne komponente izmjeničnih krugova. Uporaba im je vrlo raznovrsna. Između ostalog služe za:

- odvajanje istosmjerne komponente od izmjenične komponente struje
- ostvarivanje faznog pomaka napona i struje
- kratko spajanje izmjeničnih napona
- konstrukciju filtara i rezonantnih krugova
- pohranu električne energije
- realizaciju vremenskog kašnjenja

Za istosmjernu struju po završetku kratkotrajne prijelazne pojave **kondenzator** postaje mjesto prekida strujnog kruga. Da bi se uspostavio stalni tok struje mora postojati zatvoreni strujni krug. Za vremenski promjenljiv napon izvora, krug se zatvara preko pomaćne struje (dielektrične struje), koja predstavlja oscilacijsko kretanje vezanih naboja dielektrika pod djelovanjem izmjeničnoga električnog polja. Kad nije priključen napon centri pozitivnog i negativnog naboja atoma dielektrika se poklapaju. Međutim, kada je na krug narinut izmjenični izvor, jezgre atoma se pomjeraju u smjeru djelovanja električnog polja, a prema tome elektroni se eliptično izdužuju u suprotnom smjeru. Dakle, **pomaćna struja** se opisuje kao oscilatorno kretanje jezgri atoma i periodička deformacija putanje elektrona u ritmu narinutih promjena napona izvora. Deformacije su "elastične" (dielektrik se vraća u stacionarno stanje kada nije priključen električni izvor) sve dok se ne prijeđe granična vrijednost jakosti električnog polja. Tada dolazi do proboja dielektrika (plastična deformacija). Kondenzator gubi svoju funkciju, jer je dielektrik nepovratno uništen. Kondenzator se periodički puni pri povećanju, odnosno prazni pri smanjenju napona. Izmjenična struja je, fizikalno gledano, struja punjenja i pražnjenja kondenzatora, a „zatvara“ se preko polariziranih naboja u dielektriku.

Mjerenje struje i napona može se odrediti kapacitet kondenzatora. Djelatni ili radni otpor kondenzatora R_c možemo zanemariti, pa možemo reći da je kapacitivni otpor X_c jednak prividnom Z ($X_c = Z$), što znači da ćemo kapacitivni otpor X_c odrediti iz napona na kondenzatoru U_c i struje kondenzatora I_c prema izrazu:

$$X_c = U_c / I_c$$



Slika 3.5 – 1 Mjerenje kapaciteta U – I metodom

Budući da kapacitivni otpor ovisi o kapacitetu kondenzatora i kružnoj frekvenciji ω , odnosno frekvenciji struje ($\omega = 2\pi f$), možemo izračunati kapacitivni otpor X_c prema izrazu:

$$X_c = 1 / (2\pi f C) \quad C = I_c / (2\pi f U_c)$$

3.5.1 MOSNE METODE MJERENJA KAPACITETA

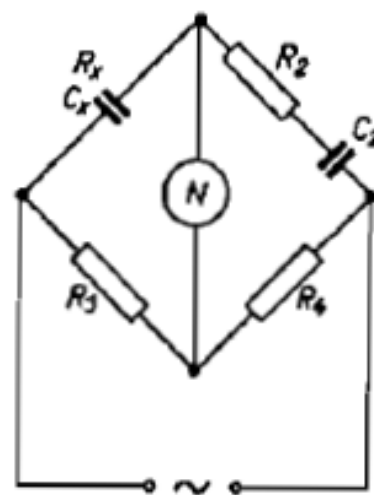
Mosne metode mjerenja omogućuju ne samo usporedbu nepoznatog i poznatog kapaciteta, već i određivanje razlike kuta gubitaka jednog i drugog kondenzatora.

Kod **Wienova mosta** nalazi se u prvoj grani mjerni nesavršeni kondenzator predložen serijskom kombinacijom kapaciteta C_x i otpora R_x , a u drugoj grani etalonski kondenzator u seriji s promjenjivim djelatnim otporom R_2 . U trećoj i četvrtoj grani nalaze se otpori R_3 i R_4 . Ravnoteža mosta postižemo kada je zadovoljen uvjet:

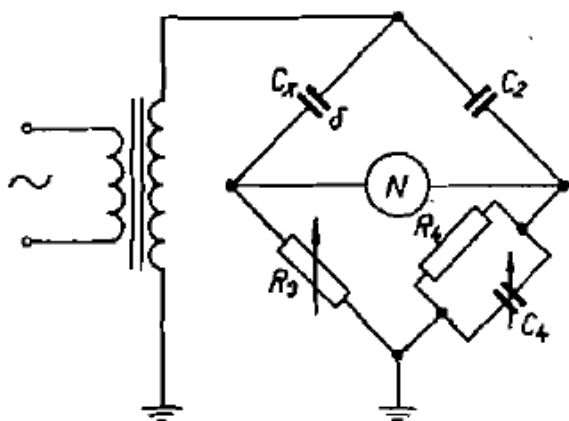
$$\left(R_x + \frac{1}{j\omega C_x}\right) R_4 = \left(R_2 + \frac{1}{j\omega C_2}\right) R_3$$

Nakon množenja i odvajanja realnih komponenta od imaginarnih, dobivamo:

$$R_x = R_2 \frac{R_3}{R_4} \quad ; \quad C_x = C_2 \frac{R_4}{R_3}$$



Most može mjeriti kapacitete od 20 pF do 10 μ F, a granice pogrešaka mu iznose oko 1 % mjerene vrijednosti, uvećane za ± 3 pF.



Scheringov most se prvenstveno koristi za mjerenje kuta gubitaka električne opreme i izolacijskih materijala (osobito na višim naponima). Takva mjerenja imaju veliko praktično značenje, jer omogućavaju ne samo uvid u kvalitetu izolacije, već i u njezino električno naprezanje. Kondenzator kapaciteta C_2 u drugoj grani mosta je etalonski kondenzator zanemarivo malog kuta gubitaka. U trećoj grani nalazi se djelatni otpor R_3 , a u četvrtoj paralelna kombinacija otpora R_4 i kapaciteta C_4 .

Ravnoteža mosta postižemo kada je zadovoljen uvjet:

$$\left(R_x + \frac{1}{j\omega C_x}\right) \frac{R_4}{1 + j\omega C_4 R_4} = \frac{R_3}{j\omega C_2}$$

Nakon množenja i odvajanja realnih komponenata od imaginarnih, dobivamo:

$$R_x = R_3 \frac{C_4}{C_2} \quad ; \quad C_x = C_2 \frac{R_4}{R_3}$$

Tangens kuta gubitaka iznosi:

$$\tan \delta = \omega R_x C_x = \omega R_4 C_4$$

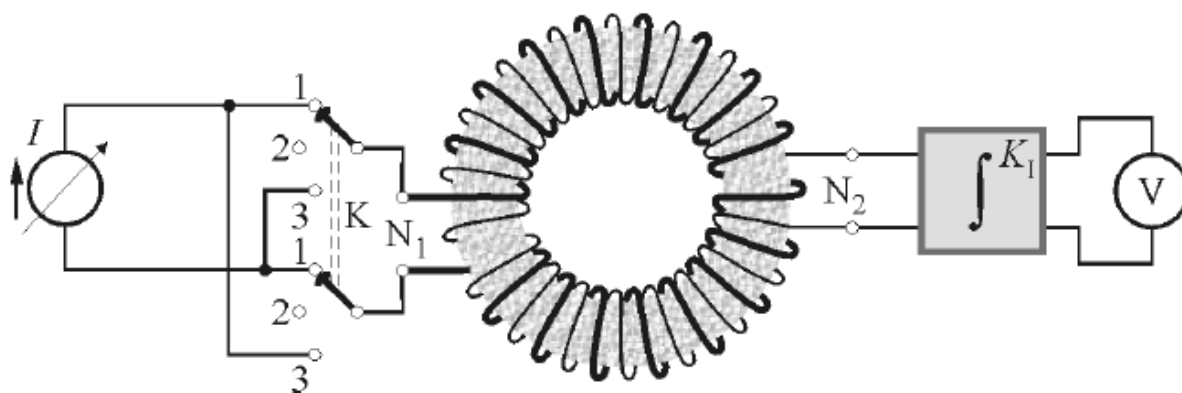
3.6 MAGNETSKA MJERENJA

Magnetska mjerenja prema mjernom objektu možemo podijeliti na ispitivanje magnetskih svojstava jezgre transformatora i mjerenje gubitaka u željezu.

Ispitivanje magnetskih svojstava jezgre transformatora obuhvaća snimanje krivulje magnetiziranja, histereze, krivulje demagnetiziranja i permeabiliteta. Ovisno o svojstvu magnetskog materijala, njegovoj veličini i obliku te brzini i točnosti mjerenja, upotrebljava se u praksi mnoštvo istosmjernih i izmjeničnih mjernih metoda, npr.:

- Integracijska metoda s prstenastim uzorkom
- Hopkinsonov jaram
- Koepselov aparat
- Metoda istma
- Burrowsov permeametar
- Fahy-Simplexov permeametar
- Sanford-Winterov permeametar
- Stablein-Steinitzov jaram
- Neumannov jaram
- Gumlichova metoda
- Iliovicijev jaram

Integracijska metoda s prstenastim uzorkom namijenjena je snimanju krivulje prvog magnetiziranja (statičke komutacijske krivulje) te snimanju petlje histereze. **Krivulja prvog magnetiziranja** jest krivulja po kojoj raste magnetska indukcija potpuno razmagnetiziranog željeza pri postupnom povećavanju jakosti magnetskog polja od nule naviše. **Statička komutacijska krivulja** jest krivulja koja spaja vrhove pojedinih petlja histereza snimanih uz različite iznose maksimalnih jakosti magnetskog polja, i praktički se poklapa s krivuljom prvog magnetiziranja.

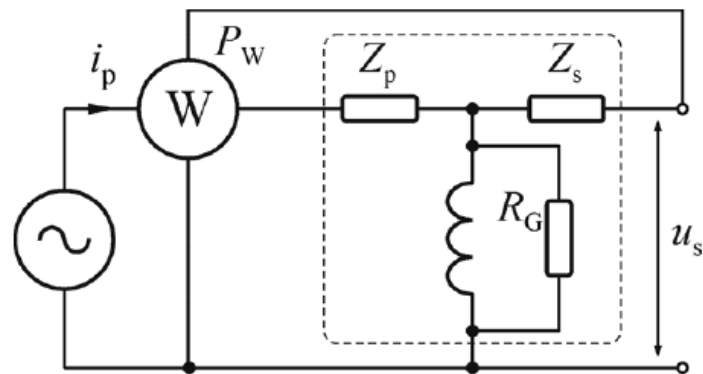


Slika 3.6 – 1 Integracijska metoda s prstenastim uzorkom

Jezgra prstenastog oblika (toroidna jezgra) omotana je uzbudnim namotom od N_1 zavoja, te pomoćnim sekundarnim namotom od N_2 zavoja. Metoda se temelji na integraciji naponskog impulsa (naponskog udara) induciranog u sekundarnom namotu uslijed promjene smjera (komutacije) istosmjerne struje koja teče uzbudnim namotom. Jezgra prstenastog uzorka prethodno mora biti

razmagnetizirana. Snimanje komutacijske krivulje kreće se od neke male početne vrijednosti struje kroz uzбудni namot, a tijekom ugađanja na ispitne vrijednosti ne smije se smanjiti od neke veće vrijednosti na manju. Za razliku od snimanja statičke komutacijske krivulje, snimanje petlje histereze započinje naravnavanjem struje kroz uzbudni namot koja odgovara krajnjoj točki petlje histereze. Dinamička petlja histereze može se snimiti **izravnim integriranjem valnog oblika induciranog napona** (valni oblik indukcije B) uz pobudu uzorka sinusoidnim magnetskim poljem H .

Vatmetrička metoda mjerenja gubitaka u željezu namijenjena je određivanju ukupnih gubitaka u magnetskim materijalima, koji osim gubitaka uslijed histereze uključuju i gubitke zbog vrtložnih struja. Vrtložne struje nastaju djelovanjem izmjeničnoga magnetskog toka i mogu poprimiti značajne vrijednosti već na području tehničkih frekvencija. Metoda mjeri gubitke u magnetskim limovima normiranih dimenzija, koji su složeni u svežnjeve kvadratične jezgre – Epsteinov aparat.



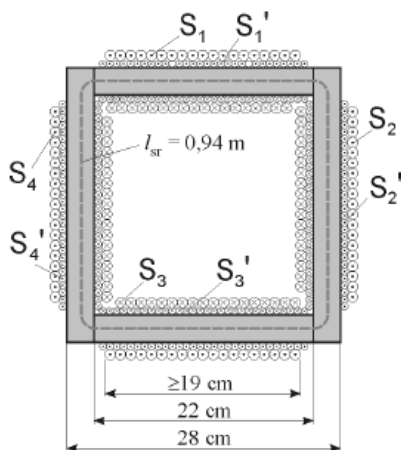
Slika 3.6 – 2 Epsteinov aparat

Vatmetar W mjeri srednju vrijednost valnog oblika trenutne snage prema izrazu:

$$P = u_s \cdot i_p$$

Za sinusni valni oblik pobudnog napona vrijedi izraz:

$$P_w = U_s \cdot I_{p1} \cdot \cos \varphi$$



Epsteinov aparat ima četiri svežnja međusobno izoliranih limova, uložena u četiri dugoljasta svitka ($S_1 - S_4$). Limovi su na kutovima isprepleteni i pritegnuti radi bolje magnetske vodljivosti. Sekundarni namot se sastoji također od četiri svitka ($S_1' - S_2'$), tijesno omotana oko ispitivanih svežnjeva. Svi namoti imaju jednak broj zavoja (npr. 600).

Mali Epsteinov aparat rabi trake magnetskih limova duljine 28 cm, a veliki 50 cm.

Otpor primarnog kruga, te unutarnji otpor izvora napona vatmetričke metode moraju biti što manji, kako bi, uz sinusni pobudni napon, i magnetski tok također bio sinusnog oblika.

Vatmetar W je strujnom granom priključen u krug primarne struje, dok je na naponsku granu primijenjen sekundarni napon. Gubici u željezu redovito se navode u W/kg , pa je potrebno poznavati ukupnu masu željeza koju određujemo vaganjem. Iz mase uzorka, te ukupne duljine svežnjeva i gustoće ispitivanog željeza ($7.55 - 7.85 \text{ kg/dm}^3$), određuje se i površina S_{Fe} presjeka željeza. Indukciju u željezu pri kojoj se mjere gubici određujemo na osnovi napona induciranog u sekundarnom namotu:

$$B = \frac{U_s}{4 \xi S_{Fe} N_2 f}$$

Gubitci histereze ne ovise o faktoru oblika induciranog napona jer tjemena vrijednost indukcije ovisi o srednjoj vrijednosti induciranog napona. **Gubitci vrtložnih struja** ovise o kvadratu efektivne vrijednosti induciranog napona. Razlučivanje ukupnih gubitaka u željezu na gubitke vrtložnih struja i gubitke histereze postiže se sa istom indukcijom, ali različitim frekvencijama.

3.7 MJERNI PRETVORNICI NEELEKTRIČNIH VELIČINA

Mjerne pretvornike nelinektričnih veličina možemo podijeliti prema mjerenju pomaka, zakreta, sile, razine tekućine, temperature, brzine vrtnje i protoka fluida. Gotovo sve nelinektrične veličine se uporabom prikladnih pretvornika (eng. transducer) mogu **mjeriti električnim postupcima**. Takvom pretvorbom mogu se:

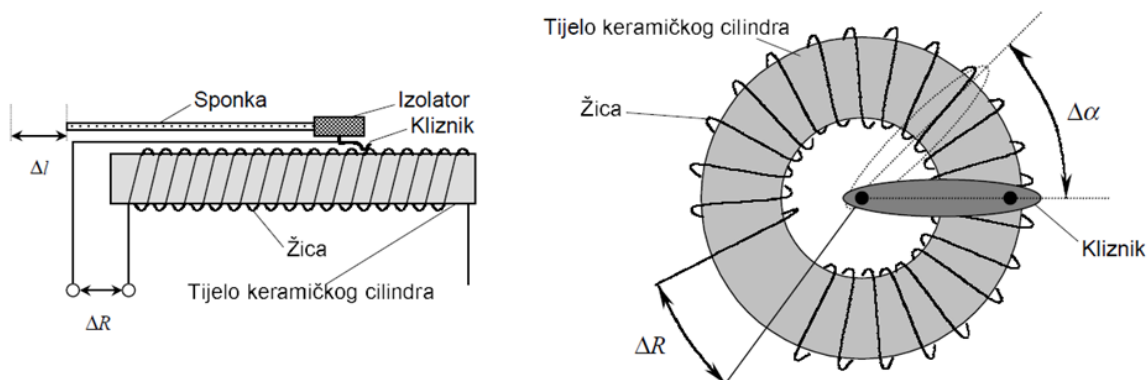
- razne fizikalne veličine mjeriti jednom vrstom mjernog instrumenta ili metodom
- male promjene nelinektrične veličine, nakon pretvorbe u električnu, pojačati, a zatim lako prikazati i izmjeriti manje osjetljivim mjerilima
- obaviti mjerenja na daljinu
- mjeriti i bilježiti vrlo brze promjene nelinektričnih veličina

Mjerni pretvornici pretvaraju nelinektrične veličine u električne, a mogu se podijeliti na aktivne i pasivne. **Aktivni mjerni pretvornici** izravno pretvaraju nelinektrične veličine u napon na temelju:

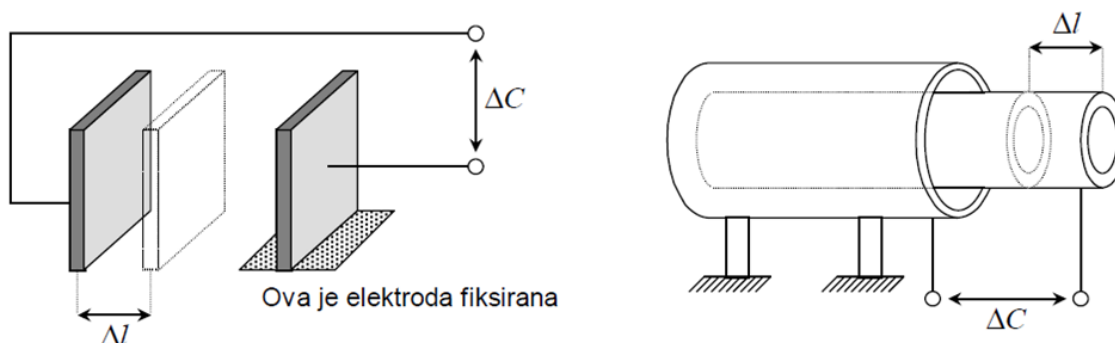
- elektromagnetske indukcije – mehanička energija u električnu energiju
- piezo efekta – mehanička energija u električni naboj
- termoelektričnog djelovanja – toplinska energija u napon
- fotoelektričnog djelovanja – svjetlosna energija u napon

Pasivni mjerni pretvornici pretvaraju nelinektrične veličine u promjene električnih veličina (otpora, kapaciteta, induktiviteta). Za mjerenje tih promjena potreban je pomoćni izvor i zato ove pretvornike nazivamo pasivnim.

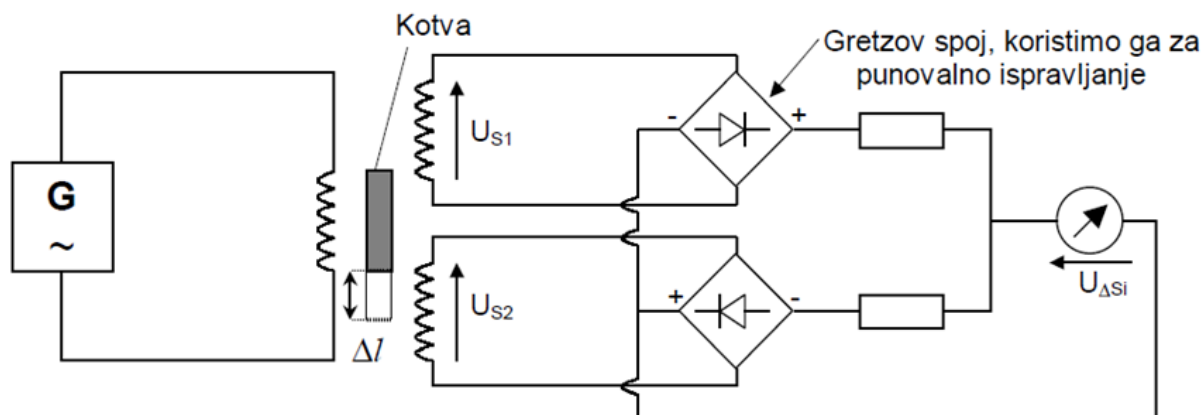
Mjernim pretvornicima pomaka možemo mjeriti prijeđeni put, razinu tekućine, hrapavost površine, vibraciju, silu, tlak...



Slika 3.7 – 1 Otpornički pretvornici pomaka s kliznikom

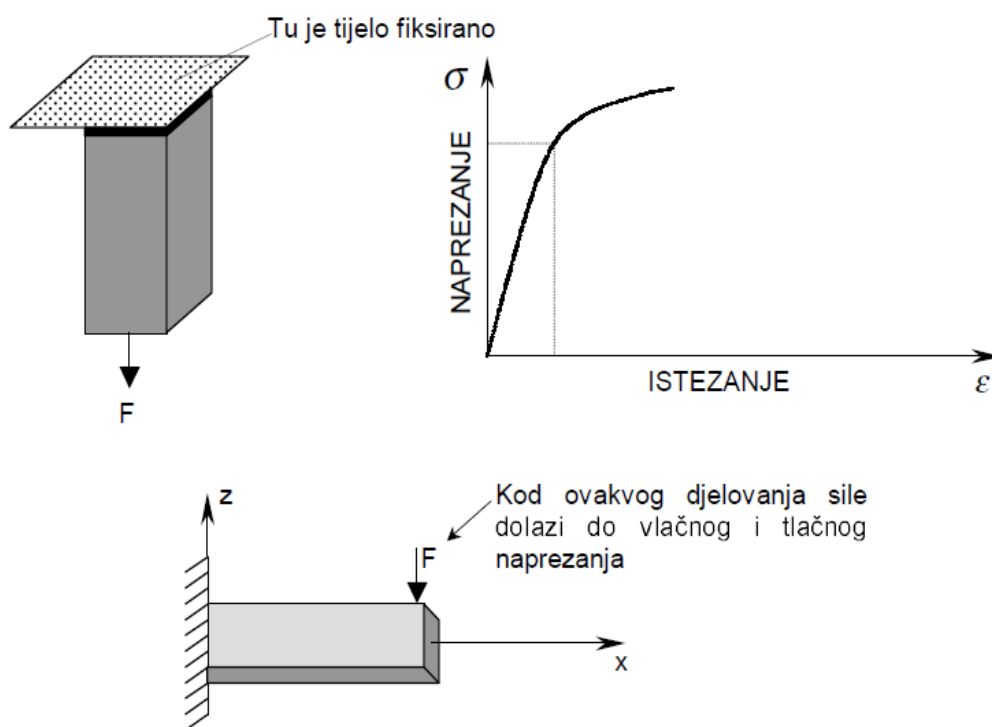


Slika 3.7 – 2 Kapacitivni pretvornici pomaka



Slika 3.7 – 3 Induktivni pretvornici pomaka

Mjerni pretvornici sile sastoje se od elastičnog tijela na koje djeluje sila i od osjetnika koji mjeri deformaciju elastičnog tijela. Mjerni pretvornici sile koriste se u elektroničkim vagama.

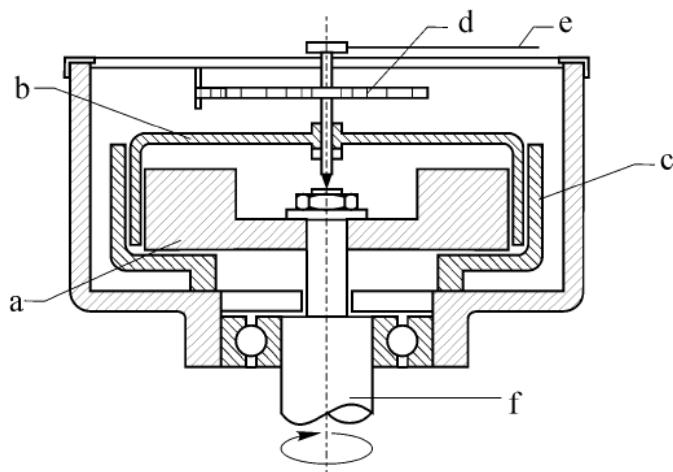


Mjernim pretvornicima temperature se osim temperature može mjeriti i toplinski tok, toplinska vodljivost, toplinsko zračenje, protok plina i td. Najčešće korišteni mjerni pretvornici temperature su:

- termootpornici – promjena otpora promjenom temperature
- termoparovi - pretvornici koji pretvaraju razliku temperature u razliku elektromotorne sile (termonapon)
- termistori - poluvodiči većeg otpora (1 kΩ do 100 kΩ) nego termootpornici
- integrirani krugovi

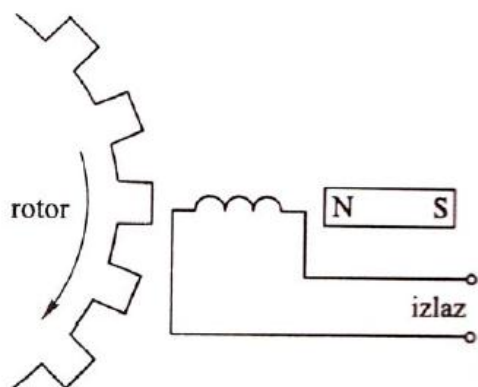
Mjerenje brzine vrtnje koristi se kod mjerenja brzina vrtnje rotacijskih strojeva, a najčešće se iskazuje brojem okretaja u minuti. Neki primjeri mjeritelja brzine su tahogenerator, induksijski tahometar i induktivno osjetilo brzine vrtnje. **Tahogenerator** je generator istosmjernog ili izmjeničnog napona posebne izvedbe, čiji je izlazni napon precizno razmjernan brzini vrtnje rotora, i to od 7 V / 1000 okr/min do 500 V / 1000 okr/min. Gornja granica mjernog opsega je 50 000 okr/min, a granice pogrešaka od $\pm 0.1\%$ do $\pm 0.5\%$, s linearnošću od $\pm 0.05\%$. **Indukcijski tahometar** vrtnjom permanentnog magneta (a) povezanog sa osovinom (f) stvara vrtložnu struju u aluminijskom ili bakrenom bubnju (b) smještenom između magneta i jarema (c), uz spiralnu oprugu (e) i kazaljku (d)

dobivamo očitavanje. Zakretni moment bubnja razmjernan je vrtložnim strujama, a one brzini vrtnje magneta.



Slika 3.7 – 4 Indukcijski tahometar

Induktivno osjetilo brzine vrtnje temelji svoj rad na načelu promjenjivog magnetskog otpora (reluktancije), uslijed čega dolazi do induciranja napona na krajevima svitka. Frekvencija induciranog napona razmjernan je brzini vrtnje i broju zubaca na rotoru.



Slika 3.7 – 5 Induktivno osjetilo brzine vrtnje

3.8 PITANJA ZA PROVJERU ZNANJA

1. Koje su granice mjerenja istosmjerne struje analognih i digitalnih ampermetara?
2. Kako se sve može mjeriti istosmjerna struja?
3. Pojasnite izravno mjerenje istosmjerne struje.
4. Kada se koristi Hallova sonda za mjerenje struje?
5. Koja je primjena Hallove sonde?
6. Koje su granice mjerenja istosmjernog napona analognih i digitalnih voltmetara?
7. Kako se izvršava potenciometarski postupak mjerenja istosmjernog napona?
8. Kako se izvršava ampermetarski postupak mjerenja istosmjernog napona?
9. Kako se mjere visoki istosmjerni naponi?
10. Koja je uloga kuglastog iskrišta u mjerenju istosmjernog napona?
11. Koje su granice mjerenja izmjenične struje analognih i digitalnih instrumenata?
12. Kako se mjeri izmjenična struja instrumentom s termopretvornikom?
13. Kako se mjeri izmjenična struja strujnim mjernim transformatorom?
14. Kako se mjeri izmjenični napon naponskim mjernim transformatorom?
15. Kako se mjeri izmjenični napon kapacitivnim naponskim mjernim transformatorom?

16. Kako se mjeri izmjenični napon kuglastim iskrištem?
17. Na koje sve načine možemo mjeriti snagu istosmjernog sustava?
18. Na koje sve načine možemo mjeriti snagu izmjeničnog sustava?
19. Kako se vatmetar spaja u jedan strujni krug?
20. Koje su sve snage u izmjeničnom sustavu?
21. Kako se mjeri djelatna snaga s tri voltmetra?
22. Kako se mjeri djelatna snaga s tri ampermetra?
23. Koje su karakteristike trofaznog sustava?
24. Kako se izvršava mjerenje djelatne snage s tri voltmetra u trofaznom (četverožičanom) sustav?
25. Kako se izvršava mjerenje djelatne snage s tri voltmetra u trofaznom (trožičanom) sustav?
26. Kako se izvodi mjerenje jalove snage?
27. Kako se izvodi poluizravno i neizravno mjerenje snage?
28. Koje su sve metode mjerenja djelatnog otpora?
29. Pojasnite mjerenje otpora U-I metodom.
30. Kako se izvodi mjerenje otpora metodom usporedbe?
31. Pojasnite omometarsku metodu mjerenja otpora.
32. Kako se izvodi mjerenje otpora metodom stalne struje?
33. Pojasnite Wheatstoneov most.
34. Kako se izvodi mjerenje velikih otpora metodom gubitaka naboja?
35. Kako se izvodi mjerenje otpora uzemljenja?
36. Pojasnite metode za mjerenje vrlo malih otpora.
37. Definirajte što je svitak i prigušnica.
38. Koje su sve metode mjerenja induktiviteta?
39. Pojasnite mosnu metodu mjerenja induktiviteta s promjenjivim induktivitetom.
40. Koje su razlike između Maxwellovog, Owenovog i Hazovog mosta za mjerenje induktiviteta?
41. Definirajte što je kondenzator.
42. Pojasnite U-I metodu mjerenja kapaciteta.
43. Pojasnite Wienov most za mjerenje kapaciteta.
44. Kako Scheringov most mjeri nepoznati kapacitet?
45. Koja je podjela magnetskih mjerenja?
46. Pojasnite integracijsku metodu s prstenastim uzorkom.
47. Pojasnite vatmetričku metodu mjerenja gubitaka u željezu.
48. Koje su podjele mjernih pretvornika?
49. Čemu služe mjerni pretvornici pomaka?
50. Čemu služe mjerni pretvornici sile?
51. Čemu služe mjerni pretvornici temperature?
52. Kako se sve izvodi mjerenje brzine vrtnje?

3.9 ZADATCI

1. Zaokružite sve instrumente koji mjere istosmjernu struju:

a) instrument s pomičnim željezom	b) instrument s pomičnim magnetom	c) elektrostatski instrument	d) induksijski instrument
-----------------------------------	-----------------------------------	------------------------------	---------------------------
2. Unutarnji otpor realnih analognih i digitalnih ampermetra mora biti:

a) što veći	b) što manji	c) jednak trošilu	d) jednak nuli
-------------	--------------	-------------------	----------------
3. Zaokružite sve vrijednosti istosmjerne struje koje analogni ampermetri ne mogu mjeriti:

a) 5 μ A	b) 1 nA	c) 0.5 A	d) 0.1 A
--------------	---------	----------	----------
4. Zaokružite sve vrijednosti istosmjerne struje koje analogni ampermetri ne mogu mjeriti:

a) 100 nA	b) 1 mV	c) 50 μ A	d) 0.5 mA
-----------	---------	---------------	-----------
5. Zaokružite sve vrijednosti istosmjerne struje koje digitalni ampermetri ne mogu mjeriti:

a) 5 μ A	b) 1 nA	c) 0.5 A	d) 0.1 A
--------------	---------	----------	----------
6. Zaokružite sve vrijednosti istosmjerne struje koje digitalni ampermetri ne mogu mjeriti:

a) 100 nA	b) 0.001 mA	c) 0.5 mV	d) 1 A
-----------	-------------	-----------	--------

7. Zaokružite sve vrijednosti koje možemo mjeriti istosmjernu struju neizravnom metodom:
- a) 200 A b) 20 A c) 2 A d) 0.2 A
8. Glavno svojstvo neizravne metode mjerenja istosmjerne struje je:
- a) pretvorba struje iz AC u DC b) pretvorba struje iz DC u AC c) pretvorba napona u struju d) pretvorba struje u napon
9. Zaokružite sve istosmjerne struje koje može mjeriti strujna kliješta:
- a) 500 A b) 50 A c) 5 A d) 0.5 A
10. Unutarnji otpor realnih analognih i digitalnih voltmetara mora biti:
- a) što veći b) što manji c) jednak trošilu d) jednak nuli
11. Zaokružite sve vrijednosti istosmjernog napona koje analogni voltmetri ne mogu mjeriti:
- a) 500 V b) 1 V c) 0.5 V d) 0.1 kV
12. Zaokružite sve vrijednosti istosmjernog napona koje digitalni voltmetri ne mogu mjeriti:
- a) 5 μ V b) 100 VA c) 0.5 mV d) 10 kV
13. Precizno ugađanje otpora pri mjerenju istosmjernog napona postiže se sa:
- a) korištenjem digitalnog voltmetra b) potenciometarskim postupkom c) U-I metodom mjerenja napona d) pojačalom s transpozicijom frekv.
14. Zaokružite najveći istosmjerni napon koji može mjeriti elektrostatski voltmetar:
- a) 0.5 kV b) 5 kV c) 50 kV d) 500 kV
15. Zaokružite sve istosmjerne napone koje može mjeriti otporničko VN dijelilo:
- a) 0.1 kV b) 10 kV c) 100 kV d) 1000 kV
16. Zaokružite sve istosmjerne napone koje može mjeriti kuglasto iskrište:
- a) 0.1 kV b) 10 kV c) 100 kV d) 1000 kV
17. Zaokružite sve instrumente koji mjere izmjeničnu struju:
- a) instrument s pomičnim željezom b) instrument s pomičnim svitkom c) elektrostatski instrument d) instrument s termopretvornikom
18. Zaokružite sve vrijednosti izmjenične struje koje analogni ampermetri ne mogu mjeriti:
- a) 0.005 A b) 0.5 A c) 50 A d) 500 A
19. Zaokružite sve vrijednosti izmjenične struje koje instrument s termopretvornikom mjeri:
- a) 0.005 mA b) 0.5 mA c) 5 A d) 50 A
20. Zaokružite sve standardizirane vrijednosti snaga mjernih strujnih transformatora:
- a) 2.5 VA b) 5 VA c) 7.5 VA d) 10 VA
21. Zaokružite sve standardizirane vrijednosti snaga mjernih strujnih transformatora:
- a) 10 VA b) 15 VA c) 25 VA d) 50 VA
22. Zaokružite sve instrumente koji mjere izmjenični napon:
- a) instrument s pomičnim željezom b) instrument s pomičnim svitkom c) elektrostatski instrument d) instrument s termopretvornikom
23. Zaokružite sve standardizirane vrijednosti snaga mjernih naponskih transformatora:
- a) 10 VA b) 15 VA c) 25 VA d) 50 VA
24. Zaokružite sve standardizirane vrijednosti snaga mjernih naponskih transformatora:
- a) 100 VA b) 250 VA c) 500 VA d) 1000 VA
25. Zaokružite sve izmjenične napone koje može mjeriti kuglasto iskrište:
- a) 0.1 kV b) 1 kV c) 100 kV d) 1000 kV

26. Mjerenje snage u istosmjernom sustavu postiže se tako da:

- | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| a) ampermetar mjeri struju potrošača | b) ampermetar mjeri struju tereta | c) voltmetar mjeri napon potrošača | d) voltmetar mjeri napon tereta |
|--------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|

27. Izravno mjerenje snage s pomoću vatmetra u izmjeničnom jednofaznom sustavu postiže se:

- | | | | |
|---|--|---|--|
| a) kada je naponska grana vatmetra spojena na teret | b) kada je strujna grana vatmetra spojena na teret | c) kada je naponska grana vatmetra spojena na izvor | d) kada je strujna grana vatmetra spojena na izvor |
|---|--|---|--|

28. Prividna snaga definirana je produktom:

- | | | | |
|---|---|---------------------------------------|--------------------|
| a) djelatne snage i kosinusom faznog kuta | b) jalove snage i kosinusom faznog kuta | c) jalove snage i sinusom faznog kuta | d) napona i struje |
|---|---|---------------------------------------|--------------------|

29. Djelatna snaga definirana je produktom:

- | | | | |
|---|---|---|--------------------|
| a) prividne snage i kosinusom faznog kuta | b) jalove snage i kosinusom faznog kuta | c) prividne snage i sinusom faznog kuta | d) napona i struje |
|---|---|---|--------------------|

30. Jalova snaga definirana je produktom:

- | | | | |
|---|---|---|--------------------|
| a) djelatne snage i kosinusom faznog kuta | b) prividne snage i kosinusom faznog kuta | c) prividne snage i sinusom faznog kuta | d) napona i struje |
|---|---|---|--------------------|

31. Neizravno mjerenje snage ostvaruje se pomoću:

- | | | | |
|-----------------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------|
| a) spoja s jednim vatmetrom | b) spoja s tri vatmetra | c) spoja s tri ampermetra | d) spoja s tri voltmetra |
|-----------------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------|

32. Zaokružite sve moguće izvedbe trofaznog sustava:

- | | | | |
|----------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------|
| a) spoj trokut | b) spoj trokut s nulvodičem | c) spoj zvijezda s nulvodičem | d) spoj zvijezda |
|----------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------|

33. Linijski napon jednak je faznom u:

- | | | | |
|-----------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------|
| a) spoju trokut | b) spoju trokut s nulvodičem | c) spoju zvijezda s nulvodičem | d) spoju zvijezda |
|-----------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------|

34. Linijska struja jednaka je faznoj u:

- | | | | |
|-----------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------|
| a) spoju trokut | b) spoju trokut s nulvodičem | c) spoju zvijezda s nulvodičem | d) spoju zvijezda |
|-----------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------|

35. Fazni napon niskonaponske mreže u spoju zvijezda iznosi:

- | | | | |
|----------|----------|----------|----------|
| a) 220 V | b) 230 V | c) 360 V | d) 400 V |
|----------|----------|----------|----------|

36. Fazni napon niskonaponske mreže u spoju trokut iznosi:

- | | | | |
|----------|----------|----------|----------|
| a) 220 V | b) 230 V | c) 360 V | d) 400 V |
|----------|----------|----------|----------|

37. Linijski napon niskonaponske mreže u spoju zvijezda iznosi:

- | | | | |
|----------|----------|----------|----------|
| a) 220 V | b) 230 V | c) 360 V | d) 400 V |
|----------|----------|----------|----------|

38. Linijski napon niskonaponske mreže u spoju trokut iznosi:

- | | | | |
|----------|----------|----------|----------|
| a) 220 V | b) 230 V | c) 360 V | d) 400 V |
|----------|----------|----------|----------|

39. Zaokružite sve metode za mjerenje otpora:

- | | | | |
|----------------|--------------------------|-----------------------|----------------------|
| a) U-I metodom | b) Wheatstoneovim mostom | c) Maxwellovim mostom | d) metodom usporedbe |
|----------------|--------------------------|-----------------------|----------------------|

40. Spoj za mjerenje velikih otpora pri mjerenju otpora U-I metodom još se naziva:

- | | | | |
|------------------|--------------------|---------------|-----------------|
| a) naponski spoj | b) otpornički spoj | c) shunt spoj | d) strujni spoj |
|------------------|--------------------|---------------|-----------------|

41. Spoj za mjerenje malih otpora pri mjerenju otpora U-I metodom još se naziva:
 a) naponski spoj b) otpornički spoj c) shunt spoj d) strujni spoj
42. Zaokružite najveći otpor koji može mjeriti U-I metoda strujnog spoja:
 a) 1 nΩ b) 1 μΩ c) 1 kΩ d) 1 GΩ
43. Zaokružite najveći otpor koji može mjeriti U-I metoda naponskog spoja:
 a) 1 nΩ b) 1 μΩ c) 1 kΩ d) 1 GΩ
44. Serijski spoj mjerenja otpora metodom usporedbe služi za mjerenje otpora:
 a) mnogo većih od b) mnogo manjih od c) mnogo većih od d) mnogo manjih od
 unutarnjeg otpora unutarnjeg otpora unutarnjeg otpora unutarnjeg otpora
 voltmetra voltmetra ampermetra ampermetra
45. Paralelni spoj mjerenja otpora metodom usporedbe služi za mjerenje otpora:
 a) mnogo većih od b) mnogo manjih od c) mnogo većih od d) mnogo manjih od
 unutarnjeg otpora unutarnjeg otpora unutarnjeg otpora unutarnjeg otpora
 voltmetra voltmetra ampermetra ampermetra
46. Omometarska metoda nije pogodna za mjerenje:
 a) jako velikih otpora b) malih otpora c) velikih otpora d) srednjih otpora
47. Mjerenje otpora metodom stalne struje može kod velikih struja u otporniku izazvat:
 a) parazitni kapacitet b) smanjenje otpora c) termonapon d) magnetizam
48. Zaokružite sve vrijednosti otpora koje Wheatstoneov most za istosmjernu struju može mjeriti:
 a) 1 mΩ b) 1 Ω c) 1 kΩ d) 1 MΩ
49. Metoda gubitka naboja pogodna je za mjerenje:
 a) jako velikih otpora b) malih otpora c) velikih otpora d) srednjih otpora
50. Zaokružite sve vrijednosti otpora koje mogu imati banana utikači:
 a) 1 mΩ b) 1 Ω c) 0.001 Ω d) 1 μΩ
51. Prigušnica je svitak:
 a) bez magnetske b) sa magnetskom c) sa malim d) sa velikim
 jezgre jezgrom induktivnim otporom induktivnim otporom
52. Vektormetrom možemo mjeriti:
 a) jalovi napon b) samoinduktivitet c) induktivni otpor d) djelatni napon
53. Mostovi za mjerenje nepoznatog induktiviteta ostvaruju se kod:
 a) mosta s b) mosta sa stalnim c) mosta s dvije klizne d) mosta s poznatim
 promjenjivim induktivitetom i žice kapacitetima i
 induktivitetom djelatnim otporom djelatnim otporima
54. Kapacitivni otpor kondenzatora ovisi o:
 a) kapacitetu b) kružnoj c) izmjeničnom d) izmjeničnoj struji
 kondenzatora frekvenciji naponu
55. Zaokružite sve mosne metode mjerenja kapaciteta:
 a) Scheringov most b) Owenov most c) Wienov most d) Hazov most
56. Ispitivanje magnetskih svojstava jezgre transformatora obuhvaća snimanje krivulje:
 a) magnetiziranja b) demagnetiziranja c) histereze d) permeabiliteta

57. Gubitci vrtložnih struja ovise o:

- a) efektivnoj vrijednosti napona b) max. vrijednosti napona c) kvadratu max. Vrijednosti napona d) kvadratu efektivne vrijednosti napona

58. Zaokružite sve aktivne mjerne pretvornike:

- a) otpornik b) baterija c) fotočelija d) zavojnica

59. Zaokružite sve pasivne mjerne pretvornike:

- a) otpornik b) baterija c) fotočelija d) zavojnica

60. Izmjenični napon mjeri se dvama voltmetrima: voltmetrom V1 s odzivom na el. srednju vrijednost i voltmetrom V2 s odzivom na efektivnu vrijednost. Ako su njihova očitavanja redom $U_{V1} = 46,5 \text{ V}$ i $U_{V2} = 53,7 \text{ V}$, odredite faktor oblika mjerenog napona.

61. Odredite faktor snage tereta ukoliko je vatmetrom, čija je naponska grana spojena prema teretu, izmjerena snaga $P = 74 \text{ W}$, voltmetrom napon na teretu $U_t = 232 \text{ V}$, a ampermetrom struja izvora $I_g = 0,65 \text{ A}$. Otpor naponske grane vatmetra iznosi $65 \text{ k}\Omega$, a otpor voltmetra $250 \text{ k}\Omega$.

62. Vatmetar je svojom strujnom granom spojen u fazu R simetričnog trofaznog sustava s dostupnom nultočkom. Ako naponsku granu spojimo između faze R i nultočke, vatmetar pokazuje $P_1 = 4200 \text{ W}$, a spojimo li je između faza S i T, vatmetar pokazuje $P_2 = 2800 \text{ W}$. Kolika je prividna snaga jedne faze trofaznog simetričnog trošila spojenog u zvijezdu?

63. Kroz primarni namot strujnog transformatora $100 \text{ A} / 5 \text{ A}$, nazivne snage 50 VA , teče struja od 25 A . Koliki je napon na njegovim sekundarnim stezaljkama, ako je priključen nazivni teret?

64. Strujni mjerni transformator $300 \text{ A} / 5 \text{ A}$ spojen je u jednu fazu trofazne simetrične mreže nazivnog linijskog napona 35 kV . Kolika je djelatna snaga trošila faktora snage 0.5 ako ampermetar na sekundaru transformatora pokazuje 2.2 A ?

65. Koliko iznosi snaga i faktor snage trošila ako smo metodom tri ampermetra izmjerili ukupnu struju 15 A , struju kroz otpornik $R_N = 45 \Omega$ u iznosu od 3.941 A i struju kroz trošilo 11.95 A ?

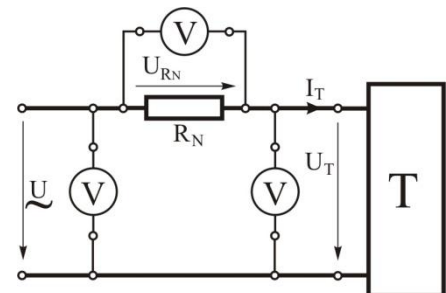
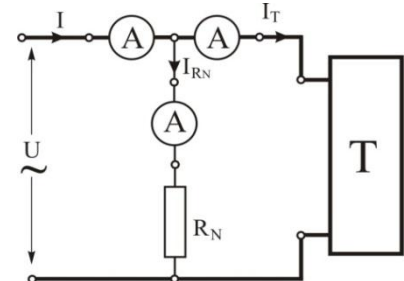
66. Koliko iznosi jalova snaga trošila ako smo metodom tri ampermetra izmjerili ukupnu struju 19 A , struju kroz otpornik $R_N = 24.24 \Omega$ u iznosu od 8.4 A i struju kroz trošilo 11.2 A ?

67. Koliko iznosi snaga i faktor snage trošila ako smo metodom tri voltmetra izmjerili ukupni napon od 290 V , napon na otporniku $R_N = 7.5 \Omega$ u iznosu od 82.1 V i napon na trošilu od 217.6 V ?

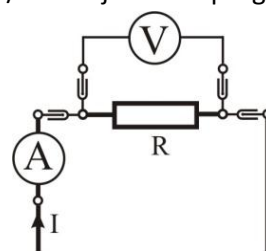
68. Koliko iznosi napon trošila $U_T = ?$ i faktor snage trošila ako smo metodom tri voltmetra izmjerili snagu trošila $P_T = 3000 \text{ W}$, kod ukupnog napona od 291.3 V , napon na otporniku $R_N = 5 \Omega$ u iznosu od 80.2 V ?

69. Naponskom U-I metodom određuje se nepoznata vrijednost otpora otpornika. Voltmetar unutarnjeg otpora $2 \text{ M}\Omega$ mjeri napon od 6 V , a ampermetar jakost električne struje od 2 mA . Koliki je otpor otpornika?

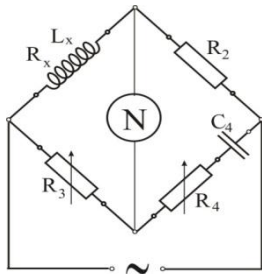
70. Strujnom U-I metodom određuje se nepoznata vrijednost otpora otpornika. Voltmetar mjeri napon od 6 V , a ampermetar unutarnjeg otpora 12Ω jakost električne struje od 150 mA . Koliki je otpor otpornika?



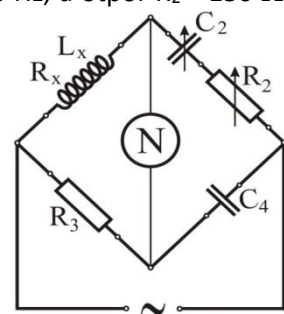
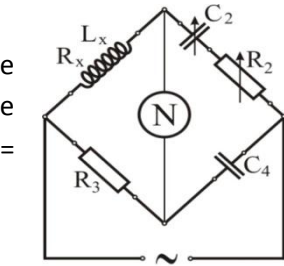
71. Otpor R_x mjeren je UI-metodom u spoju za mjerenje malih otpora. Napon je mjeren voltmetrom mjernog dometa 6 V sa 60 d.sk., karakterističnog otpora $2.2 \text{ k}\Omega/\text{V}$, a struja ampermetrom mjernog dometa 0.1 A sa 100 d.sk., unutarnjeg otpora 10Ω . Na voltmetru je očitano 57 d.sk., a na ampermetru 83 d.sk. Kolika je relativna pogreška mjerenja otpora R_x ? (d.sk. – dijelovi skale)
72. Provedbom U-I mjernog postupka za mjerenje malih otpora dobili smo slijedeće vrijednosti mjerenih veličina: $I = 200 \text{ mA}$, $U = 6 \text{ V}$. Mjerni instrumenti su imali slijedeći unutrašnji otpor: voltmetar $R_{UV}=1\text{k}\Omega$ a ampermetar $R_{UA}=100 \text{ m}\Omega$. Potrebno je:
- nacrtati shemu mjernog kruga za U-I postupak za mjerenje malih otpora i
 - Izračunati vrijednost otpora R_x uvažavajući unutrašnje otpore mjernih instrumenata
 - Izračunati apsolutnu i relativnu pogrešku mjernog postupka.
73. Ampermetrom mjernog dometa 100 mA s unutarnjim otporom $50 \text{ m}\Omega$ i voltmetrom mjernog dometa 2 V s karakterističnim otporom $10 \text{ k}\Omega/\text{V}$ mjerimo otpor R_x približnog iznosa 30 Ω . Odabрати spoj i odrediti mjereni otpor ako je ampermetrom izmjerena struja 58 mA, a voltmetrom napon 1,96 V.
74. Ravnoteža Wheatstoneovog mosta postignuta je uz $R_2 = 300 \Omega$, $R_3 = 50 \Omega$ i $R_4 = 50 \Omega$. Kolika je u trenutku ravnoteže snaga izvora ako je njegova elektromotorna sila 6 V, a unutarnji otpor 20 Ω ?
75. Otpor R_x nekog otpornika mjeri se ometarskim postupkom. Uz kratko spojeni otpornik, voltmetar za 150 V, karakterističnog otpora $1000 \Omega/\text{V}$ pokazuje 125 V. Uz uključen otpornik, voltmetar pokazuje 50 V. Koliki je R_x ako izvor napajanja ima unutrašnji otpor $R_i = 2 \text{ k}\Omega$?
76. Nepoznati otpor R_x izmjeren je nepažnjom za vrijeme rano jesenskog vala zahlađenja kod temperature okoline od 12.5°C . Koliko iznosi sistematska pogreška ovog mjerenja (u %) ako je temperaturni koeficijent otpora $\alpha = -0,00085 \text{ K}^{-1}$?
77. Otpor bakrenog svitka mjeren je Wheatstoneovim mostom. Pri 20°C , uz $R_2 = 100 \Omega$, dobiveno je $R_3 = 38.8 \Omega$ i $R_4 = 61.2 \Omega$. Na koju se temperaturu zagrijavao svitak ako je prilikom mjerenja njegova otpora u zagrijanom stanju omjer R_3/R_4 iznosio 0.758? Temperaturni koeficijent otpora bakra iznosi $\alpha_{Cu} = 0.0039 \text{ K}^{-1}$.
78. Koliku pogrešku unosi otpor uzemljenja R_{s1} sonde S1 iznosa 100 Ω kod U-I metode mjerenja otpora uzemljivača, ako se koristi voltmetar karakterističnog otpora $1 \text{ k}\Omega/\text{V}$ na mjernom opsegu 6 V?
79. Koliku ćemo načiniti postotnu pogrešku pri mjerenju otpora $R = 62 \text{ m}\Omega$ UI-metodom prema shemi, ako se spojevi ostvaruju sa stezaljkama od kojih otpor kontakta iznosi po $1.5 \text{ m}\Omega$? Stezaljke su prikazane simbolom $\circ \equiv \circ$. Nacrtajte ekvivalentnu shemu! Otpor voltmetra na korištenom mjernom području iznosi 600 Ω .
80. Izmjenični most sastavljen je od impedancija $Z_1 = Z_x$, $Z_2 = 150 \angle 0^\circ \Omega$, $Z_3 = 200 \angle -40^\circ \Omega$, $Z_4 = 250 \angle 30^\circ \Omega$. Koliki mora biti Z_x da se postigne ravnoteža mosta?
81. Impedancije grana izmjeničnog Wheatstoneovog mosta pri nekoj frekvenciji jesu: $Z_2 = 90 \angle 15^\circ \Omega$, $Z_3 = 220 \angle 45^\circ \Omega$, $Z_4 = 180 \angle 30^\circ \Omega$. Koliki mora biti Z_1 da bi most bio u ravnoteži?
82. Koliko iznose R i L mjerenog svitka ako je UI-metodom izmjereno kod istosmjernog izvora napajanja od 2.61 V, struja od 1.85 A, a kod izmjeničnog sinusoidnog izvora napajanja frekvencije $f = 500 \text{ Hz}$ kod napona 16.2 V struja od 0.94 A?
83. Kolikom je frekvencijom $f = ?$ izvršeno mjerenje U-I metodom omskog otpora $R = ?$ i induktiviteta $L = 12 \text{ mH}$ mjernog svitka, ako je kod istosmjernog izvora napajanja izmjereno napon 4.23 V i struja 1.85 A, a kod izmjeničnog sinusoidnog izvora napajanja 25.22 V i 0.94 A? Koliki je otpor R mjerenog svitka?



84. Koliko je trajanje jedne periode ako je frekvencija izmjenične sinusne struje $f = 850 \text{ Hz}$? Izračunajte kružnu frekvenciju.
85. Koliki je induktivitet torusnog svitka ako ima 2000 zavoja, presjek torusa 30 cm^2 , srednju duljinu 60 cm i relativne permeabilnosti $\mu_r = 1$? ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$)
86. Na zavojnici induktiviteta $L = 10 \text{ mH}$ priključen je napon $u(t) = 14.142 \sin 314t \text{ V}$. Odredite efektivnu vrijednost napona i struje te induktivni otpor.
87. Zavojnica induktiviteta $L = 1.5 \text{ H}$ priključena je na izmjenični izvor sinusnog napona 220 V i frekvencije 50 Hz . Izračunajte induktivni otpor i struju zavojnice.
88. Kroz zavojnicu teče struja $i(t) = 2.82 \sin 1000t \text{ A}$. Treba odrediti efektivnu vrijednost priključenog napona i njegov vremenski oblik, induktivni otpor, impedanciju i fazni pomak, ako je zadano $L = 4 \text{ mH}$, $R_L = 3 \Omega$.
89. Struju i napon svitka mjerimo ampermetrom koji pokazuje 3 mA , voltmetrom koji pokazuje 32 V , te gubitke vatmetrom koji pokazuje 6 mW . Koliko iznosi induktivitet spoja ako je frekvencija 50 Hz ?
90. Vektormetar mjeri jalovi pad napona 60 V , dok je na njemu priključeni strujni izmjenični izvor 2 A i 50 Hz . Koliko iznosi induktivitet svitka?
91. Most s promjenjivim induktivitetom nalazi se u ravnoteži. Zadani su djelatni otpori treće i četvrte grane 50Ω i 100Ω , dok su promjenjive vrijednosti druge grane jednake $R_2' + R_2'' = 30 \Omega$ i $L_2 = 0.5 \text{ H}$. Koliko iznose nepoznati induktivitet i djelatni otpor?
92. Ravnoteža mosta se postiže pomicanjem kliznika na vrijednost $R_3 = 1/3$ ukupnog otpora od 150Ω . Koliko iznose nepoznati induktivitet i djelatni otpor ako je zadano: $R_2' + R_2'' = 100 \Omega$, $R_1'' = 25 \Omega$ i $L_2 = 5 \text{ mH}$.
93. Koliko iznosi otpor R_x i induktivitet L_x rezonantnog mosta ako je frekvencija napona priključenog izvora bila $f = 5007.9 \text{ Hz}$ i ako je rezonantni most postigao ravnotežu pri: $C_1 = 1.01 \mu\text{F}$; $R_2 = 80 \Omega$; $R_3 = 375 \Omega$ i $R_4 = 200 \Omega$?

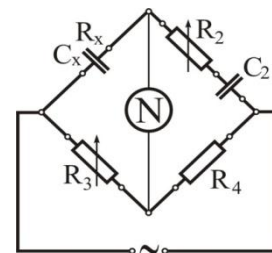


94. Hayovim mostom izmjereno je da je $R_x = 46.1 \Omega$ i $L_x = 104 \text{ mH}$. Kod toga je frekvencija izvora napajanja mosta $f = 2400 \text{ Hz}$, a otpor $R_2 = 150 \Omega$ i $C_4 = 3 \mu\text{F}$. Odredite koji je bio iznos otpora R_3 i R_4 !



95. Koliko je iznosio otpor R_2 i kapacitet C_2 Owenovog mosta ako je njime izmjeren nepoznati induktivitet prigušnice $L_x = 0.75 \text{ H}$, kao i njezin nepoznati omski otpor $R_x = 160 \Omega$ pri čemu je bio otpor $R_3 = 125 \Omega$ i kapacitet $C_4 = 12 \text{ mF}$?
96. Ako kroz metal teče struja $I = 2 \text{ A}$, koliko elektrona u svakoj sekundi prođe kroz presjek vodiča? ($e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$)
97. Dvije metalne paralelne ploče površine 10 cm^2 razmaknute su na udaljenost od 2 mm ispunjenu dielektrikom $\epsilon_r = 4$ i naelektrizirane su suprotnim nabojima iznosa 6 nC . Odredite električni pomak D i jakost električnog polja te napon koji vlada između ploča. ($\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$)
98. Dvije metalne paralelne ploče površine 20 cm^2 razmaknute su na udaljenost od 1.5 mm ispunjenu dielektrikom $\epsilon_r = 2$ i naelektrizirane su suprotnim nabojima iznosa 5 nC . Odredite kapacitet i akumuliranu energiju ako je priključen napon 220 V . ($\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$)
99. Odredite napon na kondenzatoru kapaciteta 1 mF ako kroz njega teče struja $i(t) = 2 \sin 314t \text{ A}$.

100. Izračunajte kapacitet kondenzatora priključenog na sinusni napon $U = 15 \text{ V}$, frekvencije 50 Hz ako kroz njega teče struja od 0.1 A .
101. Koliko iznosi kapacitet C_x mjenog kondenzatora kao i njegov tangens kuta gubitaka, ako je ravnoteža Wienovog mosta postignuta pri; $R_2 = 120 \Omega$; $R_3 = 500 \Omega$; $R_4 = 750 \Omega$ i $C_2 = 100 \text{ nF}$? Frekvencija izvora napajanja iznosi $f = 400 \text{ Hz}$!



102. Scheringovim mostom mjeri se kapacitet kondenzatora s uzorkom izolacijskog materijala između elektroda. Uz $C_2 = 1000 \text{ pF}$ i $R_4 = 4 \text{ k}\Omega$, u ravnoteži se dobilo $R_3 = 8.8 \text{ k}\Omega$ i $C_4 = 5.1 \text{ nF}$. Kolika je relativna dielektričnost materijala uzorka ako je promjer visokonaponske elektrode 10 cm , a debljina uzorka je 1 mm ?
103. Koliki iznosi efektivni napon frekvencije 50 Hz , da bi u uzorku od transformatorskog lima (gustoće 7.65 kg/dm^3) kod malog Epsteinovog aparata dobili indukciju od 1 T ? Ukupna masa uzorka je 0.925 kg , duljina jednog lima 0.28 m , a primarni i sekundarni namoti imaju po 700 zavoja. Ako pri indukciji od 0.5 T primarnim namotom Epsteinova aparata teče sinusna struja efektivne vrijednosti 0.42 A , kolika je srednja relativna permeabilnost materijala od kojega je načinjena jezgra?
104. Za neki magnetski materijal treba ustanoviti koliki su gubici histereze, a koliki vrtložnih struja pri frekvenciji 100 Hz . U tu svrhu izmjerilo se ukupne gubitke uz istu indukciju pri frekvenciji 60 Hz i 100 Hz . Pri frekvenciji 60 Hz ukupni gubici su 420 W , a pri frekvenciji 100 Hz , 850 W . Koliki su gubici histereze i vrtložnih struja pri 100 Hz ?